

2023

SATELĪTATTĒLU INTERPRETĀCIJA

Juris Žagars
Linda Gulbe
Kārlis Zālīte

Juris Žagars,
Linda Gulbe,
Kārlis Zālīte

SATELĪTATTĒLU INTERPRETĀCIJA

Lekcijas tālizpētē

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Žagars, J., Gulbe, L., Zālīte, K. Satelītattēlu interpretācija. Rīga, RTU Izdevniecība, 2023. 368 lpp.

Grāmatas saturs veidots, balstoties uz vairāk nekā 10 gadu pieredzi, ko autori guvuši, pasniedzot dažādiem satelītattēlu apstrādes aspektiem veltītus studiju kursus Ventspils Augstskolā (Informācijas tehnoloģiju fakultātē), Latvijas Universitātē (Fizikas, matemātikas un optometrijas un Zemes zinātņu fakultātē), kā arī Lorēnas Universitātē (Francijā) un Tartu Universitātē (Igaunijā). Grāmatā izmantota starpdisciplināra pieeja, ietverot gan fizikas un datorzinātņu, gan astronomijas un ģeogrāfijas, gan signālapstrādes un matemātiskās modelēšanas, gan arī citu pētniecības jomu sasniegumus. Lekcijas tālīzpētē ir augstākās izglītības studiju kurss dabas un inženierzinātņu specializāciju studentiem. Ar to būs noderīgi un interesanti iepazīties ne tikai studentiem, bet arī pasniedzējiem un pētniekiem, kas nodarbojas ar satelītattēlu apstrādi un interpretāciju. Grāmatā saglabāts autoru lietotais decimāldaļskaitļu rakstības stils, atdalot decimāldaļu ar punktu.

Recenzenti

Dr. geol. Aivars Markots, Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un zemes zinātņu fakultātes docents

Dr. sc. ing. Jānis Kaminskis, Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes asociētais profesors

Zinātniskais redaktors Ilgonis Vilks

Literārā redaktore Inga Gulbe

Tehniskā redaktore Anita Vēciņa

Korektore Rūta Lapsa

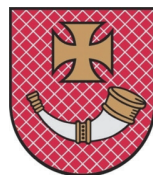
Maketētāja un datorgrafiķe Baiba Puriņa

Vāka dizains Paula Lore

Vāka attēls no *Shutterstock.com*

Mācību grāmata tapusi ar Ventspils Starptautiskā radioastronomijas centra atbalstu.

Mācību grāmata tapusi ar Ventspils valstspilsētas pašvaldības domes finansiālu atbalstu.



ISBN 978-9934-22-810-0 (print) © Rīgas Tehniskā universitāte, 2023

ISBN 978-9934-22-811-7 (pdf) © Juris Žagars, Linda Gulbe, Kārlis Zālīte, 2023

Priekšvārds

Lekcijas tālīzpētē ir augstākās izglītības studiju kurss dabas un inženierzinātņu specializāciju studentiem. Ar to būs noderīgi un, cerams, interesanti iepazīties ne tikai studentiem, bet arī mācībspēkiem un pētniekiem, kas tādā vai citādā veidā nodarbojas ar satelītattēlu apstrādi un interpretāciju. Grāmatas saturs veidots, balstoties vairāk nekā 10 gadu pieredzē, ko autori guvuši, docējot dažādiem satelītattēlu apstrādes aspektiem veltītus studiju kursus Ventspils Augstskolā (Informācijas tehnoloģiju fakultātē), Latvijas Universitātē (Fizikas, matemātikas un optometrijas un Zemes zinātņu fakultātē), kā arī Lorēnas Universitātē (Francijā) un Tartu Universitātē (Igaunijā). Apkopojot šo pieredzi, ir izveidots mācību līdzeklis, kas atbilst Latvijas 4 kredītpunktu (jeb 6 ECTS kredītpunktu) akadēmiskajam apjomam un ir strukturēts 30 lekcijās četrās tematiskajās jomās. Katra no tematiskajām jomām ietver 7–8 lekcijas un atbilst vienam Latvijas kredītpunktam. Taču lekcijas iespējams strukturēt arī citādi, veidojot mazāka apjoma (2–3 kredītpunktu) studiju kursus, jo satelītattēlu interpretācija (tālīzpēte) ir samērā jauna starpdisciplināra nozare, kas izmanto gan fizikas un datorzinātņu, gan astronomijas un ģeogrāfijas, gan signālapstrādes un matemātiskās modelēšanas, gan arī citu pētniecības jomu sasniegumus. Tādēļ šī grāmata nav jālasa “lineāri” (t. i., no sākuma līdz beigām), jo katra lekcija vai to grupa aptver kādu vairāk vai mazāk nodalītu kopīgās problēmas aspektu.

Vienlaikus starpnozaru specifika apgrūtina loģiski secīga studiju kursa izveidi. Tādēļ mēs (autori) centāmies šo grāmatu iespējami “homogenizēt”, mēģinot panākt, lai pāreja no vienas tēmas pie nākamās tomēr būtu iespēju robežās loģiski saistīta un pamatota. Grāmatas pirmā daļa “Tālīzpētes fizikālie pamati” veltīta to fizikas kursa sadaļu apguvei (vai atkārtošanai), kas tieši iesaistītas tālīzpētes procesā, proti, elektromagnētiskajam starojumam un tā mijiedarbībai ar vidi un virsmu. Tieši šīs mijiedarbības rezultātā elektromagnētiskajā signālā tiek iekodēta informācija par planētas (Zemes) virsmu un atmosfēru, kas jāiegūst, apstrādājot tālīzpētes datus. Neizprotot fizikālos procesus, ir grūti vai pat neiespējami optimizēt tālīzpētes informācijas ieguves algoritmus un sekmīgi novadīt līdz rezultātam tālīzpētes datu apstrādes procesu. Grāmatas pirmā daļa noslēdzas ar divām ģeofizikālās ievirzes lekcijām, kas veltītas Zemes atmosfērai un elektromagnētiskā starojuma mijiedarbībai ar to. Grāmatas otrajā daļā “Multispektrālās un mikroviļņu tehnoloģijas” apskatītas divas minētās tālīzpētes tehnoloģijas un to specifiskās īpatnības, tostarp lidaru (lāzeru radaru) izmantošanas pamatprincipi. Samērā detalizēti analizētas mikroviļņu tehnoloģijas, ieskaitot sintezētās apertūras radaru (SAR) sistēmu (PolSAR, InSAR, DInSAR) principus un to realizāciju. Šīs lekcijas iepazīstina arī ar izcili asprātīgajiem risinājumiem, kādi tika atklāti un lietoti, lai ar mikroviļņu iekārtām sasniegtu satelītattēlu ievērojami (vairākas kārtas) augstāku telpisko izšķirtspēju, nekā to pieļauj difrakcijas teorija. Grāmatas trešā daļa “Apstrādes un interpretācijas metodes” ir viseklektiskākā no visām daļām, jo tajā apkopotas vairāku citu lietišķo zinātņu atziņas, bez kurām tālīzpētes process tomēr nav īstenojams. Apmēram puse no šīs grāmatas daļas veltīta signālapstrādei tās digitālo attēlu apstrādes versijā. Ļoti konspektīvi apskatītas digitālo attēlu signālapstrādes pamatmetodes: telpiskais formālisms, spektrālais formālisms, kā arī segmentācijas un klasifikācijas metodes un algoritmi. Viena lekcija veltīta arī mākslīgajiem neironu tīkliem (gan pilnā sajūguma, gan t. s. konvolūcijas tīkliem) un to dziļajai apmācībai, jo šīs lietišķās matemātikas tehnoloģijas

arvien vairāk izmanto ne tikai satelītattēlu klasifikācijai, bet arī daudzās citās mākslīgā intelekta metodēs tālīzpētē. Otrā pusē no minētās daļas lekcijām ietver informāciju par satelītu orbītām (astronomija), kartogrāfijas un fotogrammetrijas pamatiem un noslēdzas ar ģeoreferencēšanas un ģeotransformēšanas problēmu un metožu īsu apskatu. Grāmatas ceturtnā daļa "Tālīzpētes lietojumi" ietver lekcijas, kas veltītas ģeogrāfiskās informācijas sistēmām (GIS), un tālīzpētes lietojumu praktiskus piemērus, ilustrējot gan multispektrālo, gan mikroviļņu tehnoloģiju izmantošanas īpatnības un iespējas. Apskatīti zemes virsmas pārseguma un lietojuma kartēšanas lietojumi, mežu apsaimniekošanas un pilsētvides plānošanas multispektrālās tālīzpētes piemēri, kā arī plūdu un ūdens piesārņojuma detektēšana, izmantojot SAR, un citi praktisku lietojumu piemēri.

Grāmata ir kolektīva darba rezultāts, kurā autoru ieguldījums ir šāds: 1.–8. lekciju, 16.–19. lekciju un 21.–23. lekciju uzrakstījis LZA korespondētājloceklis *Dr. habil. phys.* Juris Žagars, 9.–11. lekciju un 20. lekciju J. Žagars uzrakstījis kopā ar Ventpils Starptautiskā radioastronomijas centra (VSRC) pētnieci *Dr. sc. comp.* Lindu Gulbi, 24.–27. lekciju un 30. lekciju uzrakstījusi L. Gulbe, 12.–15. lekciju un 28.–29. lekciju uzrakstījis J. Žagars kopā ar *Ph. D.* Kārli Zālīti no Tartu Universitātes.

Priekšvārda noslēgumā gribam uzsvērt, ka mūsu kopīgais darbs ir veltīts arī Ventpils Augstskolas Inženierzinātņu institūta "Ventpils Starptautiskais radioastronomijas centrs" 25. gadskārtai. VSRC ilgstoši ir bijis mūsu kopīgā darba vieta, un mūsu sadarbība ar institūtu ir bijusi konstruktīva un ieinteresētības pilna daudzu gadu garumā. VSRC ir atbalstījis mūsu darbu gan morāli, gan materiāli. Paldies arī Ventpils Augstskolai, Ventpils valsts-pilsētas pašvaldības domei, Latvijas Universitātei, Tartu Universitātei (Igaunijā), Lorēnas Universitātei (Francijā) un visiem mūsu kolēģiem, kas ar padomiem, aizrādījumiem vai norādījumiem uz neprecizitātēm ir palīdzējuši šī darba tapšanā.

Autori

Saturs

Ievads (1. lekcija)

0.1. Kopsavilkums	12
0.2. Ieskats kosmisko tehnoloģiju vēsturē.....	12
0.3. Tālizpētes process, tā īpatnības	16
0.4. Tālizpētes galvenie lietojumi	19
0.4.1. Lauksaimniecība un meži	19
0.4.2. Reģionālā plānošana un pārvaldība.....	20
0.4.3. Militārā joma	20
0.4.4. Planētu fizika	20
0.4.5. Kartogrāfija	21
0.4.6. Ģeoloģija un ģeofizika.....	21
0.4.7. Ekoloģija un ekosistēmas.....	21
0.4.8. Dabas un industriālo katastrofu monitoringi.....	22
0.4.9. Eksotiskie lietojumi	23
0.5. Tālizpētes vēsture un attīstības tendences	23
0.6. Nobeiguma piezīmes	26

1. daļa

Tālizpētes fizikālie pamati 27

1.1. Elektromagnētiskais lauks (2. lekcija)	27
1.1.1. Kopsavilkums	27
1.1.2. Maksvela vienādojumi.....	27
1.1.3. Elektromagnētiskais vilnis	28
1.1.4. Polarizācija	29
1.1.5. Pointinga vektors	31
1.1.6. Interference	32
1.1.7. Difrakcija	34
1.2. Saules starojums (3. lekcija)	37
1.2.1. Kopsavilkums	37
1.2.2. Enerģijas plūsma.....	37
1.2.3. Starojuma intensitāte.....	39
1.2.4. Apstarojums un spīdība	40
1.2.5. Spožums	41
1.2.6. Saules starojuma spektrālais blīvums	42
1.2.7. Termiskā starojuma galvenās likumsakarības	44
1.2.8. Saules un tās starojuma raksturlielumi.....	45
1.3. Starojuma mijiedarbība ar virsmu (4. lekcija)	48
1.3.1. Kopsavilkums	48
1.3.2. Refleksija, refrakcija un dispersija	48
1.3.3. Absorbēšana un krāsa	50

1.3.4.	Frenela formulas	51
1.3.5.	Laušanas koeficienti dažādām vidēm	55
1.3.6.	Doplera efekts	58
1.4.	Difūzā refleksija (5. lekcija)	59
1.4.1.	Kopsavilkums	59
1.4.2.	Releja raupjuma kritēriji	59
1.4.3.	Bidirekcionālā refleksijas sadalījuma funkcija	60
1.4.4.	Direkcionālais un difūzais albedo	62
1.4.5.	<i>BRDF</i> funkcijas modelēšana	63
1.4.6.	Mikroviļņu izkliedes modelēšana	63
1.4.7.	Radara vienādojumi	67
1.5.	Starojuma mijiedarbība ar vidi (6. lekcija)	70
1.5.1.	Kopsavilkums	70
1.5.2.	Starojuma pārnese vienādojumi	70
1.5.3.	Starojuma pārnese okeānos un ledājos	71
1.5.4.	Izkliedētā starojuma modelēšana	73
1.5.5.	Starojuma absorbcijas modelēšana, Bēra likums	74
1.5.6.	Absorbcijas vertikālie profili, Čepmena likums	76
1.6.	Zemes atmosfēra un hidrosfēra (7. lekcija)	78
1.6.1.	Kopsavilkums	78
1.6.2.	Atmosfēras sastāvs un galvenie absorbētāji	78
1.6.3.	Atmosfēras blīvums un spiediens	81
1.6.4.	Temperatūras sadalījums atmosfērā	83
1.6.5.	Hidrosfēra	85
1.7.	Starojuma mijiedarbība ar atmosfēru (8. lekcija)	88
1.7.1.	Kopsavilkums	88
1.7.2.	Starojuma termodinamiskais līdzsvars	88
1.7.3.	Aerosoli	90
1.7.4.	Mākoņi un nokrišņi	91
1.7.5.	Difūzā izkliede atmosfērā	92
1.7.6.	Spožuma temperatūra	94
1.7.7.	Starojuma mijiedarbība ar jonosfēru	96

2. daļa

Multispektrālās un mikroviļņu tehnoloģijas 97

2.1.	Tālīzpēte optiskajā (VIR) diapazonā (9. lekcija)	97
2.1.1.	Kopsavilkums	97
2.1.2.	EMS optiskā diapazona izmantošana tālīzpētē	97
2.1.3.	Spektrālās signatūras (hiperspektrālais koncepts)	98
2.1.4.	Multispektrālie sensori	103
2.1.5.	Multispektrālo sensoru konstrukcijas	105
2.1.5.1.	Elektromehāniskie skeneri	106
2.1.5.2.	Fotoelementu vektori	106
2.1.5.3.	Fotoelementu matricas	107
2.1.5.4.	Kombinētās metodes	108

2.1.6.	MSS satelītprogrammas	109
2.1.6.1.	LANDSAT programma	110
2.1.6.2.	SENTINEL programma	110
2.1.6.3.	"Digital Globe" tālīzpētes kompānija	111
2.2.	Multispektrālo attēlu interpretācija (10. lekcija)	111
2.2.1.	Interpretācijas mērķis	111
2.2.2.	Telpiskā izšķirtspēja un pārklājums	112
2.2.3.	Telpiskās izšķirtspējas robeža	113
2.2.4.	Radiometriskā izšķirtspēja un pārklājums	116
2.2.5.	Spektrālā izšķirtspēja un pārklājums	117
2.2.6.	Jaukto pikseļu ietekme	119
2.2.7.	Temporālā izšķirtspēja un pārklājums	122
2.3.	Lidaru tehnoloģijas (11. lekcija)	124
2.3.1.	Kopsavilkums	124
2.3.2.	Ievads un vēsture	124
2.3.3.	Dati un to raksturlielumi	124
2.3.4.	Vertikālā un horizontālā precizitāte	127
2.3.5.	Digitālie augstuma modeļi	128
2.3.6.	Informācijas produktu veidošana	131
2.3.7.	Lidaru izmantošanas jomas	135
2.3.7.1.	Mežsaimniecība	135
2.3.7.2.	Pilsētvides izpēte	135
2.3.7.3.	Citas lietojumu jomas	136
2.4.	Mikroviļņu tehnoloģijas (12. lekcija)	137
2.4.1.	Kopsavilkums	137
2.4.2.	Mikroviļņu izmantošana tālīzpētē	137
2.4.3.	Radaru ģeometrija un difrakcijas izšķirtspēja	139
2.4.4.	Impulsu radari, to īpatnības	140
2.4.5.	Impulsu pārklāšanās novēršana	143
2.4.6.	Radarattēlu distorsijas	144
2.4.7.	Spekls un tā filtrēšana	146
2.4.8.	Atpakaļizkliedes galvenie veidi	149
2.5.	Sintezētās apertūras radari (SAR) (13. lekcija)	150
2.5.1.	Kopsavilkums	150
2.5.2.	Impulsu lokalizācija, izmantojot korelācijas, čirksti	150
2.5.3.	Datu reģistrācijas kompleksā forma	153
2.5.4.	Precizitātes paaugstināšana azimutālajā virzienā, SAR	154
2.5.5.	Korelācijas funkcija un tās aprēķināšana	157
2.5.6.	SAR attēlu izšķirtspēja, koherences nosacījumi	157
2.5.7.	Kustīgu objektu distorsijas	159
2.5.8.	SAR kalibrēšana un fokusēšana	161
2.6.	SAR polarimetrija (PolSAR) (14. lekcija)	164
2.6.1.	Kopsavilkums	164
2.6.2.	Radaru signālu polarizācijas veidi	164
2.6.3.	Polarizācijas elipse un Džonsa vektors	165
2.6.4.	Objekta efektīvais (jeb radara) šķērsriezums	167

2.6.5.	Atpakaļizkliedes jeb Sinklēra matricas.....	168
2.6.6.	Izkliedes vektori un polarizācijas matricas	169
2.6.7.	Atpakaļizkliedes fizikālā modelēšana	170
2.6.8.	Polarizācijas matricu dekompozīcija	172
2.7.	SAR interferometrija (InSAR) (15. lekcija)	176
2.7.1.	Kopsavilkums	176
2.7.2.	Ievads SAR interferometrijā	176
2.7.3.	Interferogrammu iegūšana (aprēķināšana)	177
2.7.4.	InSAR ģeometriskie aspekti	178
2.7.5.	Vertikālā reljefa noteikšana.....	180
2.7.6.	Diferenciālā SAR interferometrija (DInSAR).....	182
2.7.7.	Sistemātiskās un gadījuma kļūdas	183
2.7.8.	Korelācijas (koherences) koeficientu modelēšana	185

3. daļa

Apstrādes un interpretācijas metodes..... 187

3.1.	Telpiskais formālisms (16. lekcija)	187
3.1.1.	Kopsavilkums	187
3.1.2.	Ievads satelītattēlu apstrādē	187
3.1.3.	Telpiskā formālisma punkta operācijas	189
3.1.4.	Histogrammu transformācijas	194
3.1.5.	Konvolūcija un masku operācijas	196
3.1.6.	Nogludinošie telpiskie filtri	196
3.1.7.	Asumu pastiprinošie telpiskie filtri.....	198
3.2.	Spektrālais formālisms (17. lekcija)	199
3.2.1.	Kopsavilkums	199
3.2.2.	Furjē transformācija.....	199
3.2.3.	Konvolūcijas teorēma	201
3.2.4.	Zemfrekvences filtri	203
3.2.5.	Augstfrekvences filtri	206
3.2.6.	Homomorfā filtrēšana	208
3.3.	Restaurācijas un segmentācijas metodes (18. lekcija).....	210
3.3.1.	Kopsavilkums	210
3.3.2.	Attēlu restaurācija jeb pirmapstrāde.....	210
3.3.3.	Stohastiskie un periodiskie trokšņi	211
3.3.4.	Multiplikatīvā komponente	213
3.3.5.	Attēlu segmentācijas sliekšņu metode	214
3.3.6.	Apstarojuma loma sliekšņu metodē	216
3.3.7.	Globālā sliekšņa metode	216
3.3.8.	Adaptīvā sliekšņa metode.....	217
3.3.9.	Sliekšņa izvēles optimizācija	218
3.3.10.	Lokālā sliekšņa metode.....	219
3.3.11.	Segmentācijas ūdensšķirtņu metode	220

3.4. Attēlu interpretācija un klasifikācija (19. lekcija)	221
3.4.1. Kopsavilkums	221
3.4.2. Izpratne par interpretāciju	221
3.4.3. Fraktālie efekti	222
3.4.4. Interpretācijas veidi	226
3.4.5. Nevadītā klasifikācija	227
3.4.6. Vadītā klasifikācija	229
3.4.7. Atbalsta dati un to loma	230
3.4.8. Klasifikācijas precizitātes novērtēšana	231
3.4.9. Nobeiguma piezīmes	233
3.5. Mākslīgie neironu tīkli un klasifikācija (20. lekcija)	234
3.5.1. Kopsavilkums	234
3.5.2. Nestrukturētā modelēšana	234
3.5.3. Perceptrons divām tēlu klasēm	234
3.5.4. Perceptronu apmācības algoritmi	236
3.5.5. Daudzslimeņu neironu tīkli	237
3.5.6. Atpakaļapmācības algoritms	239
3.5.7. Konvolūcijas neironu tīkli	240
3.5.8. Tīklu arhitektūra un dziļā apmācība	243
3.6. Satelīti un aeroplatformas (21. lekcija)	245
3.6.1. Kopsavilkums	245
3.6.2. Satelīti un to orbītas	245
3.6.3. Ģeostacionārā un ģeosinhronā orbīta	250
3.6.4. "Molnijas" un "Tundras" tipa orbītas	251
3.6.5. Saules sinhronās orbītas	252
3.6.6. Precīzās atkārtojamības orbītas (LANDSAT)	254
3.6.7. Citas specifiskas orbītas un orbitālie manevri	256
3.6.8. Aeroplatformas un to īpatnības	256
3.7. Kartogrāfijas un fotogrammetrijas pamati (22. lekcija)	259
3.7.1. Kopsavilkums	259
3.7.2. Ievads kartogrāfijā	259
3.7.3. Azimutālās projekcijas	262
3.7.4. Koniskās projekcijas	264
3.7.5. Merkatora un Millera cilindriskās projekcijas	266
3.7.6. Citi projekciju veidi	269
3.7.7. Ievads fotogrammetrijā	269
3.7.8. Vertikālo diferenču noteikšana	270
3.8. Ģeoreferencēšana un ģeotransformēšana (23. lekcija)	273
3.8.1. Kopsavilkums	273
3.8.2. Problēmas nostādne un pamatjēdzieni	273
3.8.3. Ģeoreferencēšanas afinās transformācijas	273
3.8.4. Citas ģeoreferencēšanas transformācijas	275
3.8.5. Ģeotransformēšana	277
3.8.6. Ortoattēlu formēšana	279

4. daļa

Tālizpētes lietojumi 281

4.1. Ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (24. lekcija).....	281
4.1.1. Kopsavilkums	281
4.1.2. ĢIS un datu formāti.....	281
4.1.3. ĢIS pamatfunkcionalitāte.....	286
4.1.4. ĢIS funkcionalitātes izmantošanas piemērs	290
4.2. Zemes pārseguma un lietojuma kartēšana (25. lekcija).....	292
4.2.1. Kopsavilkums	292
4.2.2. Problēmas nozīmība.....	292
4.2.3. Izaicinājumi zemes pārseguma kartēšanā	293
4.2.4. Zemes pārsegumu klasifikācijā bieži lietotās metodes	294
4.2.5. Darbplūsmas piemērs.....	296
4.3. Mežu tālizpēte (26. lekcija)	305
4.3.1. Kopsavilkums	305
4.3.2. Problēmas nozīmība.....	305
4.3.3. Uzdevumi mežu tālizpētē.....	307
4.3.4. Darbplūsmas piemērs.....	313
4.4. Pilsētvides tālizpēte (27. lekcija)	317
4.4.1. Kopsavilkums	317
4.4.2. Problēmas nozīmība.....	317
4.4.3. Pilsētvides kartēšana.....	317
4.4.4. Termālo attēlu izmantošana	322
4.4.5. Lidara datu izmantošana	324
4.4.6. Darbplūsmas piemērs.....	324
4.5. Plūdu un ūdens piesārņojuma detektēšana (28. lekcija)	329
4.5.1. Kopsavilkums	329
4.5.2. Problēmu nozīmība	329
4.5.3. Mikroviļņu mijiedarbība ar applūdušu mežu	329
4.5.4. Somā (Igaunija) eksperiments	331
4.5.5. Vienas polarizācijas tehnoloģijas.....	335
4.5.6. Polarimetriskās tehnoloģijas	336
4.6. Zālāju tālizpēte, izmantojot SAR (29. lekcija)	338
4.6.1. Kopsavilkums	338
4.6.2. Problēmas nozīmība.....	338
4.6.3. SAR signālu mijiedarbība ar zālāju	338
4.6.4. Polarimetriskā metode	339
4.6.5. Interferometriskā metode.....	342
4.6.6. Nobeiguma piezīmes.....	345

4.7. Citi tālīzpētes lietojumi (30. lekcija)	347
4.7.1. Kopsavilkums	347
4.7.2. Lauksaimniecība	347
4.7.3. Ūdens resursu monitorings	352
4.7.4. Dabas katastrofu monitorings	353
4.7.5. Arheoloģija	357
4.7.6. Nakts attēlu izmantošana	358
4.7.7. Dzīvās dabas monitorings	359
Atsauces	361

Ievads (1. lekcija)

0.1. Kopsavilkums

Ievadlekcijā iepazīsimies ar satelīttehnoloģiju vēstures galvenajiem posmiem, attīstības tendencēm un kosmosa apguves svarīgākajām industriālajām tehnoloģijām. Viena no tām ir tālīzpēte – zināšanu kopums par satelītattēlu iegūšanu, apstrādi un izmantošanu. Pievērsīsimies gan tālīzpētes vēsturei, gan tās komponentēm un lietošanas jomām, kā arī galvenajām problēmām, ar kurām jāsaskaras, strādājot ar kosmiskajām tehnoloģijām un analizējot un apstrādājot no satelītiem vai aeroplatformām iegūtos datus.

0.2. Ieskats kosmisko tehnoloģiju vēsturē

Cilvēkiem ir piemītusi un piemīt interese par apkārtējo pasauli, tās uzbūvi, likumsakarībām, bet īpaši vilinoša vienmēr bijusi pasaules vēl neizzinātā daļa. Jau no aizvēsturiskiem laikiem mūsu senči ir izrādījuši lielu interesi par astronomiskām parādībām, debess ķermeņiem un to būtību, kā arī par lidošanu kā līdzekli šīs intereses apmierināšanai. To viegli ievērot dažādu tautu folklorā, grieķu varoņteikās par Ikaru un Dedalu, seno indiāņu tautu nostāstos un daudzos citos vēstures avotos. Viena no atraktīvākajām leģendām to vidū ir stāsts par ķīniešu augstmani (mandarīnu) Van-Hu, kurš nenoskaidrojamā pagātnē izgatavoja krēslu, kas aprīkots ar 47 šaujampulvera¹ raķetēm, lai uzlidotu augstu virs Zemes un iepazītu pasauli tādu, kādu to vēl neviens nekad nebija redzējis (0-1. att.).



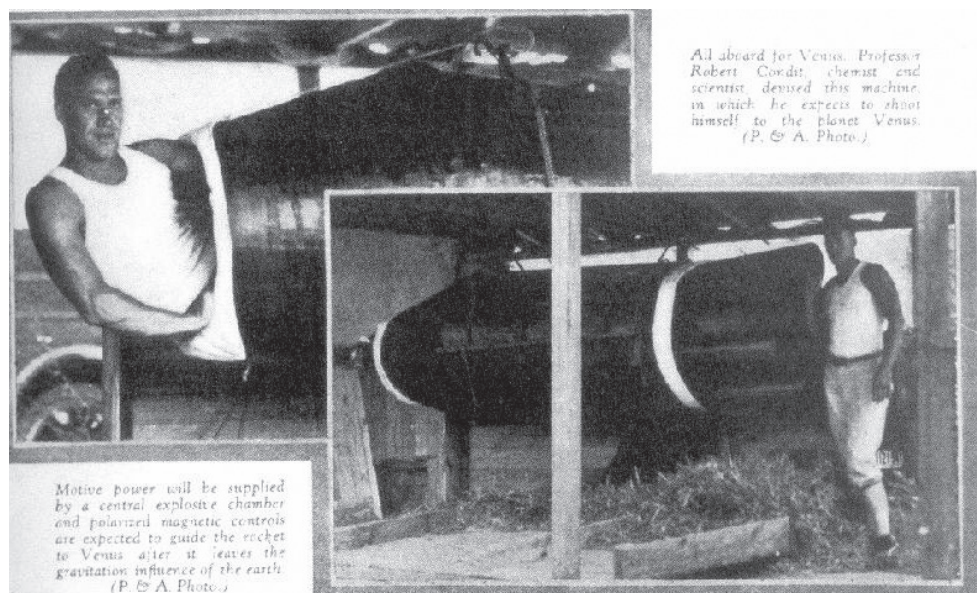
0-1. att. Van-Hu leģendārais lidojums ar reaktīvo ierīci.

1 Šaujampulveri Ķīnā (cik zināms, no 10. gs.) izmantoja militārām vajadzībām un uguņošanai.

Kad raķetes tika vienlaikus aizdedzinātas, notika kas līdzīgs sprādzienam un notikuma vietu apņēma dūmi, bet Van-Hu un viņa lidaparātu neviens vairs netika ne redzējis, ne manījis.

Izlaižot daudzus gadsimtus, kuros interese par lidošanu noturīgi dzīvoja cilvēku prātos, nonākam 18. gadsimtā, kad angļu-īru rakstnieks Džonatans Svifts (1667–1745) sāka šo interesi sabiedrībā uzkurināt ar saviem zinātniskās fantastikas sacerējumiem. Pēc gadsimta stafeti pārņēma francūzis Žils Verns (1828–1905) un angļu rakstnieks Herberts Velss (1866–1946). Rezultātā Eiropas un ASV sabiedrība 19. gadsimta beigās un 20. gadsimta sākumā bija visai aizrāvusies ar iespējamo kosmisko lidojumu ideju. Tika apspriesti visdažādākie priekšlikumi (no saprātīgiem līdz pat “trakiem”) par šādu lidojumu tehniskajiem, ekonomiskajiem un sociālajiem aspektiem. Ne mazums entuziastu šķūnīšos un garāžās paši mēģināja izgatavot kosmiskos lidaparātus (0-2. att.), tiesa, tolaik vēl nesekmīgi.

Taču šo daudzo entuziastu vidū bija pavisam neliels skaits cilvēku ar pietiekamu inženiertehnisko un dabaszinātnisko izglītību, lai ieliktu zinātniskus pamatus raķešbūvei un citām mūsdienu kosmiskajām tehnoloģijām. Nepretendējot uz visaptverošu šīs zinātnes vēstures jomas apskatu, gribam atzīmēt tikai dažus izcilus zinātniekus un inženierus, kuru nopelni kosmisko tehnoloģiju pamatu veidošanā ir izturējuši laika pārbaudi. Tādi bija matemātikas un fizikas skolotājs Konstantīns Ciolkovskis (1857–1935) no Kalugas (Krievijā), kurš pirmais saprātīgi noformulēja veicamo “darbu sarakstu”, lai reāli sagatavotos pirmajiem lidojumiem kosmosā, un Klārka Universitātes (ASV) profesors Roberts Godards (1882–1945), kurš 1926. gada 26. martā Masačūsetsā veica pasaulē pirmo sekmīgo šķidrās degvielas raķetes izmēģinājuma lidojumu (0-3. att.). Kā nākamie jānosauca austroungāru



0-2. att. Roberts Kondits (ASV) gatavojas lidojumam uz Venēru (1928) [39].



0-3. att. R. Godards un pirmā šķidrās degvielas raķete pasaulē (1926).



0-4. att. Raķetes "V-2" izmēģinājums Ņūmeksikā (ASV 1946).

izcelsmes profesors Hermanis Oberts (1894–1989) un viņa skolnieks Verners fon Brauns (1912–1977), kurš Otrā pasaules kara laikā izstrādāja pirmo mūsdienīgo šķidrās degvielas raķeti "V-2" (0-4. att.).

Nevar nenosaukt arī rīdzinieku inženieri Frīdrihu Canderu (1887–1933) (0-5. att.) un viņa darba turpinātāju Sergeju Koroļovu (1907–1966), kurš ielika pamatus Krievijas kosmosa izpētes virzienam un īstenoja gan pasaulē pirmā satelīta (1957), gan pirmā kosmonauta (1961) sekmīgus orbitālos lidojumus.



0-5. att. Inženieris Frīdrihs Canders (1887–1933).

Kosmosa apguves sākuma posmā (1957–1973) dominēja plaša profila fundamentālā pētniecība (gan civilā, gan militārā). Cilvēki bija sākuši darboties jaunā, maz pazīstamā vidē, un šī vide – kosmos – bija jāizpēta un jāizprot. Bezsvara stāvoklis, nezināmi magnētiskie lauki, to radītās radiācijas joslas, meteorītu briesmas, Saules vējš un daudz citu gan interesantu, gan nereti dzīvām būtnēm bīstamu parādību izpēte bija šī perioda kosmisko aktivitāšu galvenais mērķis.

No satelītu orbītas ārpus Zemes atmosfēras bija iespējams īstenot daudz kvalitatīvākus astronomiskos novērojumus, kā arī veikt mūsu planētas Zemes paplašinātu izpēti. Pētniecība kosmosā, protams, nekad nav apstājusies. Dažas desmitgades vēlāk, 90. gados, tikai divu satelītu – *HST*² (Habla kosmiskā teleskopa, skat. 0-6. att.) un astrometriskā satelīta *HIPPARCOS*³ iegūtie dati kļuva par iemeslu revolucionārām pārmaiņām astronomijas zinātnē.

2 *HST* – Hubble Space Telescope.

3 *HIPPARCOS* – High Precision Parallax Collecting Satellite.

Taču izpratnes par pasauli padziļināšana un paplašināšana nebija vienīgais, kas interesēja cilvēkus, darbojoties kosmosā. Jau no pirmsākumiem interese bija arī par tīri praktiskām lietām, proti, ko kosmosā var darīt vieglāk, ātrāk, efektīgāk un lētāk nekā uz Zemes. Citiem vārdiem – kādu ekonomisko labumu iespējams gūt no darbošanās kosmosā. Atbildes uz šiem jautājumiem nebija iegūstamas ne ātri, ne viegli. Nācās veikt dažādus tehnoloģiskus pētījumus, nogādājot orbītā arvien vairāk inženierzinātniskās aparātūras, kurai pilotējamajos kosmiskajos aparātos nepietika vietas. Tādēļ varam runāt par nākamo periodu kosmosa apgūvē, kas sākās 1971. gadā, kad orbītā ap Zemi tika ievadīta pirmā liela izmēra orbitālā kosmiskā stacija “*Salut-1*”.

Dažādi tehnoloģiskie eksperimenti joprojām tika veikti, arī izmantojot satelītus un pilotējamās kosmiskās aparātūras, taču orbitālajās stacijās bija daudz vairāk vietas pētniecības aparātūras izvietošanai un ievērojami labāki astronautu pētnieku darba apstākļi (0-8. att.). Kosmosa apguves tehnoloģisko pētījumu periods (1973–1990) uzrādīja vairākas ekonomiski pamatotas darbības jomas kosmosā, tostarp monokristālu audzēšanu mikrogravitācijas apstākļos elektroniskās industrijas vajadzībām, telekomunikāciju un satelītnavigācijas sistēmu izveides lietderību, tālizpētes tehnoloģiju (satelītattēlu ieguve un izmantošana) attīstību un citas.

90. gados aktivitātes kosmosā arvien vairāk sāka iegūt industriālu un uz galalietotājiem vērstu orientāciju. Sākās trešais kosmisko aktivitāšu periods – industriālo tehnoloģiju periods, kas turpinās vēl joprojām.

Tas nenozīmē, ka ir apstājusies kosmosa pētniecība vai tehnoloģisko eksperimentu veikšana. Īstenībā pat ir otrādi – fundamentālā un inženierzinātniskā pētniecība tikai paplašinās, taču paralēli tam industriālās un citas saimnieciskās aktivitātes kosmosā attīstās straujāk un ir kļuvušas par dominējošām. Turklāt ir iezīmējušās trīs galvenās kosmiskās IKT (informācijas un komunikācijas tehnoloģiju) nozares, kuru nozīme no industriāli ekonomiskā viedokļa mūsdienās



0-6. att. Habla kosmiskais teleskops (*HST*) orbītā ap Zemi (*NASA*).



0-7. att. Pirmā ASV orbitālā kosmiskā stacija “*Skylab*” (*NASA* 1973).



0-8. att. *NASA* inženiere Nikola Stota orbitālajā stacijā *JSS* darbā ar elektronisko mikroshēmu ražošanai nepieciešamo monokristālu audzēšanas iekārtu.

nās ir vislielākā. Tās ir:

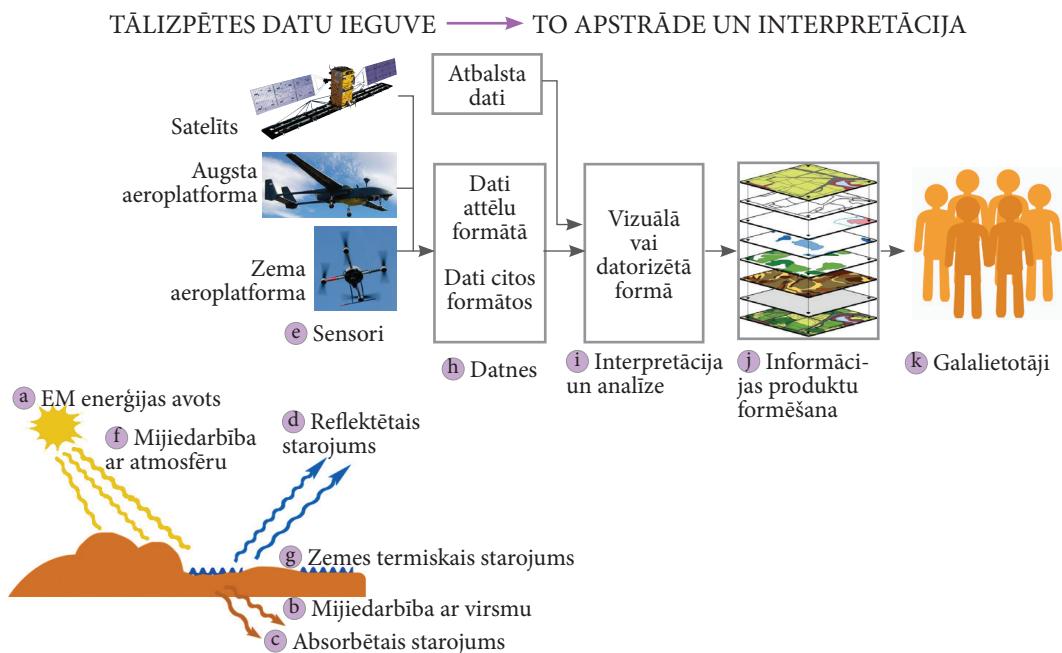
- satelīttelekomunikācijas (kopā ar televīziju un interneta servisiem);
- satelītnavigācija (*GPS*, *GLONASS*, *GALILEO* u. c.);
- tālīzpēte un tās lietojumi.

0.3. Tālīzpētes process, tā īpatnības

Plašākā nozīmē tālīzpēte ir prasme iegūt informāciju par objektiem vai parādībām, analizējot datus, kas iegūti no attāluma, t. i., bez tieša kontakta ar pētāmo objektu vai parādību⁴. Tādējādi absolūti lielākā daļa astronomisko pētījumu balstās uz tālīzpētes lietošanas rezultātiem (zvaigznes un daudzi citi astronomiski objekti mums joprojām nav pieejami izpētei tieša fiziska kontakta apstākļos), tos plaši izmanto arī planētu fizikā, ģeofizikā un daudzās citās pētniecības nozarēs.

Lai iegūtu informāciju no attāluma, ir jāizmanto kāds no fizikālajiem laukiem. Visbiežāk izmanto elektromagnētisko lauku (gaisma, mikroviļņi) vai tā komponentes – elektrisko lauku un magnētisko lauku. Taču bieži lieto arī gravitācijas lauku (gravimetriskās metodes ģeofizikā) un akustiskos (svārstību) laukus (sonogrāfija medicīnā vai seismiskās metodes ģeofizikā). Bez fizikālo lauku izmantošanas tālīzpētes metodes nav īstenojamas.

Šaurākā nozīmē ar tālīzpēti saprot Zemes vai citu planētu izpēti, izmantojot dažādus lidaparātus (galvenokārt satelītus, kosmiskās zondes vai aeroplatformas), kuru sensori reģistrē elektromagnētisko lauku (redzamo un infrasarkanā starojumu vai mikroviļņus).



0-9. att. Tālīzpētes procesa vispārējā shēma [32].

4 No šī viedokļa arī lasīšana ir uzskatāma par tālīzpētes procesu.

Retāk tiek strādāts arī ar liela viļņa garuma radioviļņiem vai ultravioleto un citu īsviļņu starojumu.

Tālīzpētes procesa vispārīgā shēma redzama 0-9. attēlā. To nosacīti var iedalīt divās lielās daļās – tālīzpētes datu ieguves posmā (0-9. att. kreisā puse) un šo datu apstrādes un interpretācijas posmā (0-9. att. labā puse). Vispirms iepazīsimies ar datu ieguves posmu, kura būtiskās komponentes ir:

- elektromagnētiskās enerģijas avots (optiskajā diapazonā visbiežāk kā enerģijas avotu izmanto Sauli (a), retāk lāzerus, mikroviļņu diapazonā – radarus);
- elektromagnētiskā (EM) starojuma mijiedarbība (b) ar planētas (Zemes) virsmu, kas galvenokārt izpaužas kā absorbcija (c) un refleksija (d) (gan spoguļrefleksijas, gan difūzās refleksijas formās);
- reflektētā starojuma reģistrācija ar sensoriem (e), kas izvietoti satelītos vai aeroplatformās.

Taču šo procesu ietekmē vairāki traucējoši faktori:

- elektromagnētiskā starojuma mijiedarbība (f) ar Zemes atmosfēru (tālīzpētē izmantotajam EM starojumam divas reizes jāšķērso atmosfēra – vispirms virzienā uz leju, tad virzienā uz augšu);
- Zemes pašas izstarotais termiskais EM starojums (g).

Zemes termisko EM starojumu, kura maksimums ir termiskajā infrasarkanajā (*TIR*⁵) EM spektra diapazonā, ir relatīvi viegli atdalīt no tālīzpētē izmantojamā reflektētā starojuma, jo *TIR* diapazonu samērā reti izmanto klasiskajās tālīzpētes tehnoloģijās. Daudz komplicētāka situācija ir, raugoties uz starojuma mijiedarbību ar Zemes atmosfēru, kas izpaužas kā absorbcija un izkliede. Šī mijiedarbība ir gan spēcīga, gan grūti prognozējama vai modelējama un var būtiski ietekmēt tālīzpētes datu precīzu interpretāciju. Tādēļ tai datu apstrādes un interpretācijas posmā pievēršama īpaša uzmanība. Tiesa, šo atmosfēras mijiedarbību ar EM starojumu var izmantot un arī izmanto pašas atmosfēras ķīmisko un fizikālo parametru noteikšanai, taču to biežāk veic, izmantojot kalibrētu lāzeru starojumu (t. s. lidarus).

Pati svarīgākā no tālīzpētes datu ieguves posma komponentēm neapšaubāmi ir EM starojuma mijiedarbība ar planētas (Zemes) virsmu, jo tieši šajā procesa fāzē notiek informācijas par planētas virsmu kodēšana reflektētajā EM starojumā. Šī mijiedarbība ir atkarīga gan no planētas virsmas fizikālo (arī ķīmisko, botānisko u. tml.) īpašību un parametru kopuma, ko dēvē par **virsmas faktūru**, gan no virsmas ģeometriskā (raupjuma, orientācijas, simetrijas vai asimetrijas u. tml.) īpašību un parametru kopuma, ko dēvē par **virsmas tekstūru**. Faktūras un tekstūras parametru noteikšana ir viens no svarīgākajiem tālīzpētes datu apstrādes uzdevumiem, jo tie ļauj spriest par pētāmās virsmas fizikālajām, ģeometriskajām u. c. raksturīgajām īpašībām.

Pakāvēsimies pie dažām EM starojuma un planētas virsmas mijiedarbības īpatnībām. Ar šīs mijiedarbības **vienveidību** sapratīsim īpašību, ka virsma ar vienām un tām pašām faktūras un tekstūras īpašībām vienmēr vienā un tādā pašā veidā mijiedarbojas ar EM starojumu. Savukārt ar mijiedarbības **unikalitāti** sapratīsim īpašību, ka virsmas ar atšķirīgām faktūras un tekstūras īpašībām vienmēr atšķirīgā veidā mijiedarbojas ar EM starojumu. Diemžēl patiesā EM starojuma mijiedarbība ar Zemes virsmu nav ne vienveidīga, ne uni-

5 *TIR – Thermal Infrared.*

kāla. Piemēram, raupja grants virsma ir tumšāka (vairāk izkļiedē EM starojumu optiskajā diapazonā) par smalku smilšu virsmu, ja tās abas ir sausas. Savukārt mitrums (ūdens klātbūtne) papildus absorbē EM starojumu, vērojot pētāmo virsmu tumšāku. Taču raupja virsma bieži ir labi drenēta un sausa, savukārt smalka mēdz ilgāk saglabāt mitrumu, rezultātā abas var izrādīties vienādi tumšas. Līdzīgus efektus izraisa arī metāla oksīdu (tipiski Marsa gadījumos) un organisku vielu klātbūtne (Zemes gadījumos) uz planētas virsmas. Tas ievērojami apgrūtina tālīzpētes attēlu viennozīmīgu interpretāciju, un, lai šādus gadījumus atšķirtu, nepieciešama papildu informācija (t. s. atbalsta dati) par pētāmo virsmas apgabalu. Atbalsta dati bieži ir pētāmajos Zemes virsmas apgabalos speciāli veikti papildu mērījumi tālīzpētes datu kalibrēšanai un kontrolei (0-10. att.), taču tie var būt arī citādi un ļoti dažādi (informācija no interneta, kartogrāfiskais materiāls, laboratorijās veiktu analīžu rezultāti, ar droniem iegūti aerofoto vai citi mērījumi utt.). Svarīgi tikai atcerēties, ka atbalsta dati var būt gan **temporāli stabili** (tādi, kas lēni mainās, piemēram, dati par ģeoloģiskajām struktūrām), gan arī **temporāli kritiski** (tādi, kas strauji mainās, piemēram, dati par ūdens piesārņojumu). Pēdējos jāspēj savākt pietiekami ātri, lai tie nebūtu zaudējuši aktualitāti.

No Zemes virsmas reflektēto EM starojumu reģistrē ar sensoriem (e), kas izvietoti satelītos vai aeroplatformās. Jāņem gan vērā, ka ne viss reflektētais starojums tiek reģistrēts, jo sensoriem, kā visām tehniskajām ierīcēm, ir ierobežota radiometriskā, spektrālā, telpiskā un temporālā izšķirtspēja. Tas nozīmē, ka sensoru reģistrētie dati nekad nav absolūti precīzi un pilnīgi. Tālīzpētes datus parasti iegūst vai nu attēlu formā, vai arī citos datu formātos, un pēc reģistrācijas tos uzkrāj (h) datu failos (0-9. att. vidējā daļa), ko tālāk izmanto iegūtās informācijas interpretācijai un analīzei. Šajā posmā (i) atbalsta datu pieejamība vai nepieejamība var izrādīties kritiski svarīga sekmīga rezultāta sasniegšanai.

Ja tālīzpētes datus izmanto tikai speciālistu vajadzībām un galvenokārt pētniecībai, tad datu interpretācija un analīze var būt pēdējais posms tālīzpētes procesā. Taču ļoti bieži ar tālīzpētes tehnoloģijām iegūtā informācija ir nepieciešama un tiek izmantota svarīgu lēmumu pieņemšanai arī nespeciālistu vidē. Lai tālīzpētes nespeciālisti (visbiežāk valsts un biznesa vides pārvaldē strādājoši darbinieki) varētu saprast un sekmīgi izmantot šādi iegūto ģeotelpisko informāciju, tā ir jātransformē un jāstrukturē īpašā veidā, ko sauc par **informācijas produktiem**. Informācijas produkti ir galvenā tālīzpētes industrijas komercializējamā prece, kas tad arī nodrošina šīs kosmiskās tehnoloģijas ekonomisko pamatu.



0-10. att. Atbalsta datu vākšana tuksnī.

0.4. Tālizpētes galvenie lietojumi

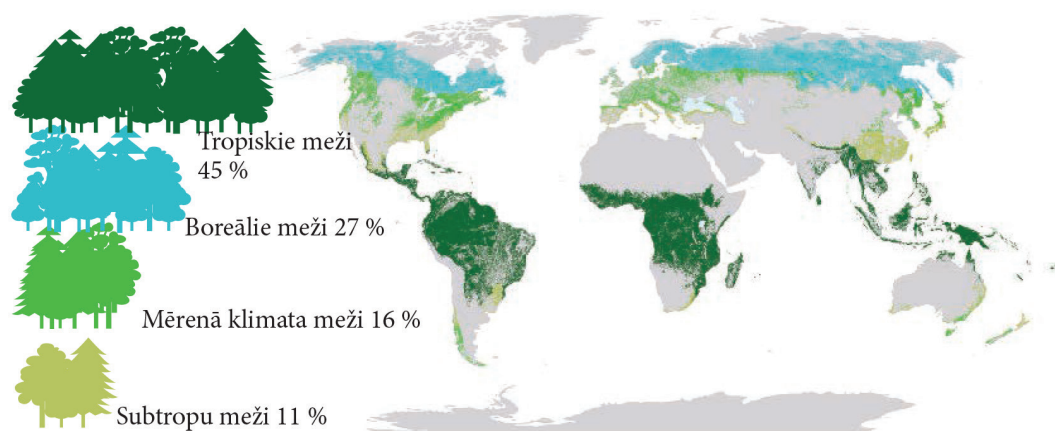
Tālizpētes lietojumu izplatību dažādās saimnieciskās dzīves jomās galvenokārt nosaka ieguvumu un izmaksu attiecība. Kaut arī tālizpētes informācijas produkti ne vienmēr ir lēti, tiem piemīt vairākas būtiskas priekšrocības:

- iegūstama ātra un precīza informācija ar lielu pārklājumu (t. i., par milzu teritorijām);
- precīzi dati par bīstamiem apgabaliem, kas nav iegūstami ar citām metodēm (dabas un industriālo katastrofu reģioni, karadarbības zonas);
- pat tad, ja informācija ir pieejama no citiem avotiem, tālizpētes dati ir ātrāki, ar lielāku pārklājumu un tādēļ bieži lētāki.

Katrā konkrētā lietojumu jomā ir arī savas specifiskas tālizpētes tehnoloģiju priekšrocības, kas nosaka šo tehnoloģiju un informācijas produktu izmantošanas apjomu un tā attīstības tendences. Tādēļ pavisam īsi iepazīsimies ar galvenajām tālizpētes metožu un produktu lietošanas jomām.

0.4.1. Lauksaimniecība un meži

Lauksaimnieciskās darbības kontrole, plānošana un pārvaldība globālā mērogā ir viena no lielākajām tālizpētes datu izmantošanas jomām pasaulē. Tas ir saistīts ar straujo Zemes iedzīvotāju skaita pieaugumu un nepieciešamību nodrošināt viņus ar pārtiku. Faktiski jau notiek cīņa ar badu, kas aptver arvien lielākus mūsu planētas reģionus. Lauksaimnieciskās darbības jomā galvenās tālizpētes lietošanas iespējas ir aramzemju stāvokļa un degradācijas tendenču (sāļu uzkrāšanās, ūdens un vēja erozija, augšņu noplicināšana u. c.) kontrole, kā arī agrotehnoloģiskie monitoringi par lauksaimniecisko kultūru attīstības fāzēm, augu slimību izplatību, ražu prognozēm u. c. saimnieciski nozīmīgas informācijas ieguve.



0-11. att. Mežu izplatība pasaulē, 2020. gada dati.

Par lauksaimniecisko darbību nosacīti var uzskatīt arī mežu apsaimniekošanas jomu, jo tajā tālīzpētes informāciju izmanto stipri līdzīgā veidā. Joma ir nozīmīga tālīzpētes datu patērētāja, jo mežu apsaimniekošana un rekultivācija arī ir kļuvusi par globālu problēmu, ņemot vērā to, cik vispār pilnvērtīgu mežu ir palicis uz mūsu planētas (0-11. att.). Turklāt šim mežu masīvu apjomam ir stabila tendence samazināties.

0.4.2. Reģionālā plānošana un pārvaldība

Reģionālā plānošana un pārvaldība (vidējais pārvaldības līmenis) arī ir kļuvusi par vienu no lielākajām tālīzpētes informācijas produktu izmantošanas jomām pasaulē. Tas nozīmē, ka vidējās pārvaldības līmenis ir visai plašs un racionālu lēmumu pieņemšanai tam nepieciešama ātra (operatīva) un precīza ģeotelpiskā informācija. Alternatīvās metodes ir nepilnīgas, kartogrāfiskais materiāls parasti ir nedaudz novecojis, jo saimniecisko aktivitāšu radītās pārmaiņas ģeotelpiskajā informācijā bieži ir straujas, savukārt ģeodēzisko un kadastrālās uzmērīšanas darbu veikšanas izmaksas ir stipri augstas. Tādēļ ātra un precīza informācija nereti iegūstama tikai ar tālīzpētes tehnoloģijām. To izmanto gan lielu infrastruktūras objektu projektēšanas un celtniecības fāzēs, gan kadastrālās informācijas precizēšanai, gan transporta plūsmu optimizācijai un daudzos citos gadījumos, tostarp, lai kontrolētu dažādu subsīdiu un pabalstu godīgu izmantošanu un minimizētu krāpniecības gadījumu skaitu.

0.4.3. Militārā joma

Militārā joma un planētu fizika vēsturiski bija pirmās, kur 20. gadsimta 60. gados sāka attīstīt un izmantot tālīzpētes tehnoloģijas, demonstrējot to iespējas un priekšrocības pārējai pasaulei. Ļoti strauja tālīzpētes metožu un instrumentu attīstība notika pagājušā gadsimta 80. gados t. s. "zvaigžņu karu" jeb Stratēģiskās aizsardzības iniciatīvas programmas (ASV) īstenošanas laikā. Arī mūsdienās militārā joma patērē ievērojamu tālīzpētes datu apjomu gan izlūkošanas, gan operāciju plānošanas vajadzībām. Militārā joma ir viena no lielākajām augstas izšķirtspējas tālīzpētes datu izmantotājām.

0.4.4. Planētu fizika

Planētu fizikas joma, kā jau minēts, bija viena no pirmajām, kur attīstīja un izmantoja tālīzpētes metodes zinātnisko mērķu sasniegšanai, jo vienkārši nebija citu alternatīvu tehnoloģiju.

Absolūti lielāko daļu informācijas par planētām ir izdevies iegūt, tikai pateicoties tālīzpētes tehnoloģijām un sensoriem, kas bija uzstādīti uz planētu izpētes kosmiskajām zondēm. Ar tālīzpētes sensoriem ir savākta apjomīga informācija par visām Saules sistēmas planētām un to pavadoņiem, tostarp par tādiem eksotiskiem debess ķermeņiem kā pundurplanēta Plūtons (0-12. att.).

0.4.5. Kartogrāfija

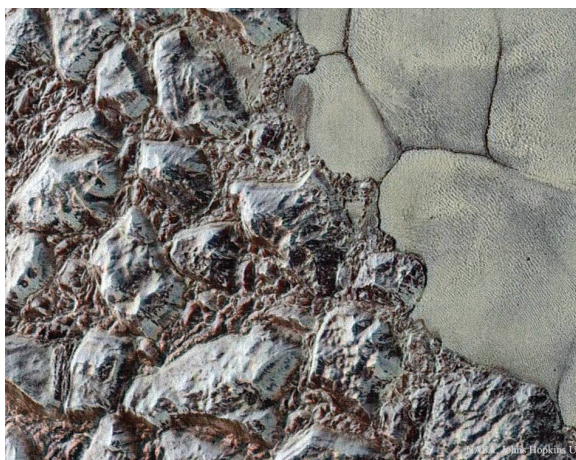
Tālizpētes metodes un tehnoloģijas pavisam loģiski un saprotami papildināja kartogrāfijas klasisko metožu arsenālu. Satelītattēli un aerofotogrāfijas tika un tiek izmantoti gan jaunu karšu veidošanai, gan novecojuša kartogrāfiskā materiāla atjaunošanai. Taču tālizpēte piedāvāja arī jaunas interesantas iespējas, tādas kā satelītkaršu veidošanu, izmantojot tālizpētes attēlus. Šādas kartes veido, uz satelītattēliem projicējot nereti trūcīgo pieejamo kartogrāfisko materiālu. Kopā ar informatīvo materiālu par svarīgiem objektiem apskatāmajā apgabalā šādi tiek formētas tematiskas satelītkartes, tostarp prospekti un kartes tūristu piesaistei. Jāņem vērā, ka par daudziem no tūrisma viedokļa interesantiem apgabaliem uz Zemes vispār nav pieejama gandrīz nekāda kartogrāfiskā informācija. Turklāt šāda situācija nav tikai Āfrikā vai grūti pieejamos Āzijas un Austrālijas apgabalos, bet arī Eiropas Savienības jurisdikcijā esošās teritorijās (0-13. att.).

0.4.6. Ģeoloģija un ģeofizika

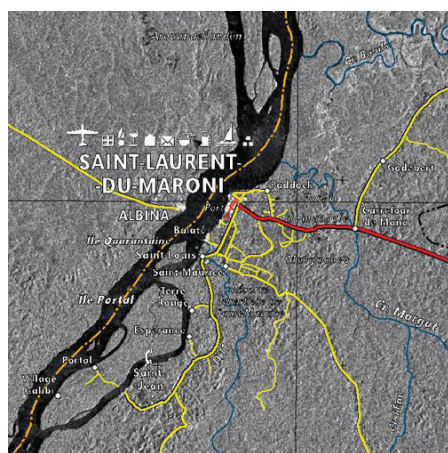
Tālizpētes aplikācijām plaša lietošanas joma ir arī ģeoloģija, ģeofizika un ar tām saistītā okeanogrāfija, kā arī meteoroloģija un klimata pārmaiņu izpēte. Īpašu vietu šajā jomā ieņem neatjaunojamo ģeoloģisko resursu monitoringi, jo cilvēku saimnieciskā darbība nereti iznīcina pat nozīmīgas ģeoloģiskās struktūras. Liela nozīme tālizpētes tehnoloģijām ir arī funamentālos ģeofizikālos pētījumos, kas saistīti ar procesiem Zemes atmosfērā, okeānos (hidrosfērā), Zemes cietajā garozā un mantijas augšējā daļā – litosfērā.

0.4.7. Ekoloģija un ekosistēmas

Daudz dažādu tālizpētes tehnoloģiju izmanto ekosistēmu pētījumos un ekoloģisko monitoringu veikšanai. Ekosistēmu pētīšanas metodes tipiski ir t. s. netiešās metodes, kas ir visai komplicētas un izmanto hibrīdas tehnoloģijas. Viens no ievērojamiem ekosistēmu



0-12. att. Plūtona virsma tuvplānā (NASA).



0-13. att. Satelītkarte pilsētai Franču Gviānā (Eiropas Savienība).

apdraudējumiem ir dažāda veida piesārņojumi (ūdens, gaisa, augsnes u. c.), kuru biežākais cēlonis ir cilvēku saimnieciskā darbība. Nopietniem piesārņojuma riskiem ir pakļautas pat tādas teritorijas, kur situācija tiek rūpīgi un regulāri kontrolēta (0-14. att.). Tālizpētes tehnoloģijas piedāvā ļoti efektīvas metodes dažādu vides piesārņojumu kontrolei, īpaši tas attiecas uz ūdenstilpju piesārņojumu ar naftas produktiem.

Taču ekosistēmas apdraud ne tikai piesārņojums, bet arī ūdens trūkums (sausums). Tālizpētes tehnoloģijas ļauj efektīvi kontrolēt saldūdens resursu stāvokli un piedāvā metodes cīņai ar sausumu. Viena no šādām metodēm ir balstīta digitālo augstuma modeļu (*DEM*⁶) savietošanā ar ģeoloģiskajām kartēm, kas ļauj identificēt eventuālas pazemes ūdenstilpnes, kuru atrašanās vietas ir svarīgi zināt, lai veiktu hidroloģiskos urbumus un iegūtu ūdeni irigācijas sistēmām tuksnešainos apvidos.

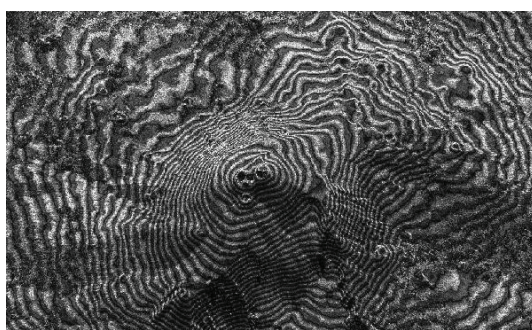
0.4.8. Dabas un industriālo katastrofu monitoringi

Dabas un industriālo katastrofu monitoringi ir ārkārtīgi plaša un ļoti svarīga tālizpētes tehnoloģiju lietošanas joma, jo ļoti bieži nav citu alternatīvu tehnoloģiju ātrai informācijas ieguvei par cietušo reģionu, bet jārikojas ir precīzi un ātri. Ir izstrādātas daudz un dažādas tālizpētes metodes tādu dabas katastrofu gadījumiem kā mežu ugunsgrēki, plūdi, lavīnas un to apdraudējums kalnu rajonos u. c. Svarīga ir arī tādu seismiski tektonisko dabas katastrofu kā zemestrīces un vulkānu izvirdumi seku novēršana. Pēc vulkānu izvirdumiem mainās kalna (vulkāniskā konusa) forma, ko ir svarīgi precizēt, lai prognozētu turpmāko izvirdumu iespējamās postošās sekas. Taču lava atdziest lēni, un ģeodēziskos darbus uz aktīviem vulkāniem bieži nav iespējams veikt. Šādos gadījumos ļoti efektīvas ir tālizpētes t. s. SAR (sintezētās apertūras radara) interferometrijas tehnoloģijas, kas ļauj operatīvi iegūt pētāmā objekta (vulkāna) augstas izšķirtspējas 3D attēlus (0-15. att.).

Industriālo katastrofu (avārijas atomelektrostacijās vai ķīmiskajās rūpnīcās, dambju pārrāvumi u. c.) monitoringus veic līdzīgā veidā, izmantojot gan dabas katastrofām piemērojamās, gan specifiskās tālizpētes metodes.



0-14. att. Naftas produktu piesārņojums Vidusjūrā, pie Francijas krasta.



0-15. att. Vulkāna Etna 3D SAR interferometrijas attēls.

6 *DEM – Digital Elevation Model.*

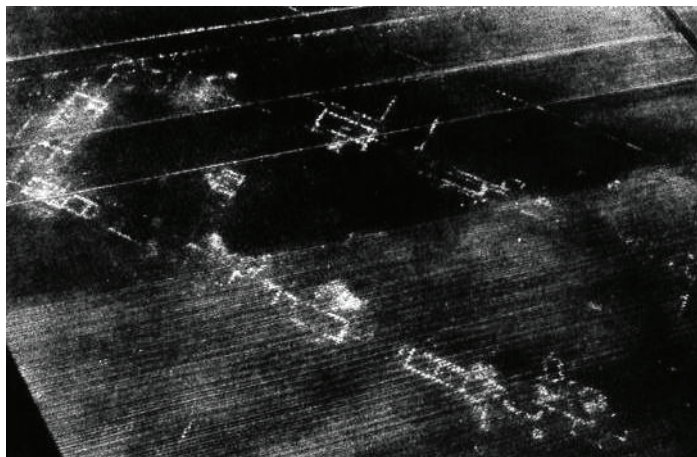
0.4.9. Eksotiskie lietojumi

Tālizpētes tehnoloģijas un informācijas produktus nereti lieto tādās saimnieciskās darbības jomās, kur to izmantošanas lietderība nepavisam nav acīmredzama. Tādas jomas ir apdrošināšanas bizness, telekomunikācijas sistēmu antenu torņu izvietojuma optimizācija, arheoloģiskie pētījumi u. c. Nedaudz pakavēsimies tikai pie pēdējās no šīm jomām. Vēsturniekiem ilgstoši bijis zināms (no rakstu avotiem), ka Romas impērijas Gallijas provincē (tagadējos Francijas ziemeļos) bija uzbūvētas romiešu muižas ar varenu ēku kompleksiem, bet arheologiem šīs vēstures liecības nebija izdevies atrast. Senie galli minētās muižas bija nopostījuši pilnībā. Taču atrisinājumu izdevās atrast nejauši, izmantojot aerofotogrāfijas virs labības laukiem pārkoņu ziedēšanas laikā. Šīs nezāles bija īpaši iecienījušas pastiprināti mineralizēto augsni virs romiešu ēku kaļķakmens pamatiem, kas atradās nelielā dziļumā zem zemes (0-16. att.).

Tādējādi nezāļu koši dzeltenie ziedi uzskatāmi iezīmēja kādreizējo būvju pamatu vietas, un veiktie arheoloģiskie izrakumi to apstiprināja. Šādi un līdzīgi visai negaidīti tālizpētes metožu interesanti lietojumi sastopami arī vairākās citās pētniecības un saimnieciskās dzīves jomās.

0.5. Tālizpētes vēsture un attīstības tendences

Kaut arī tālizpēte ir viena no kosmiskajām jeb satelīttehnoloģijām, tai tomēr ir arī sava specifiska vēsture. No antīkajiem laikiem ir zināms sengrieķu filozofa Aristoteļa traktāts "Problēmas", kurā 4. gadsimtā p. m. ē. tiek pieminēta *camera obscura*, ko var uzskatīt par pirmās tālizpētes ierīces (ļauj iegūt informāciju bez tieša kontakta ar objektu) aprakstu. Taču to tomēr nevar uzskatīt par Aristoteļa izgudrojumu, visdrīzāk viņš pārstāsta no senākiem avotiem iegūtu informāciju. Tad, līdzīgi citām kosmiskajām tehnoloģijām, nekādi īpaši sasniegumi nav zināmi līdz pat 17. gadsimtam, kad, kombinējot stikla lēcas, itāļu fiziķis un astronoms Galileo Galilejs (1564–1642) izgatavo pasaulē pirmo tālskati.



0-16. att. Nezāļu ziedēšana labības laukos Francijas ziemeļos [32].

Vēl pēc diviem gadsimtiem, ap 1839. gadu, Luijs Dagērs (1787–1851) izgudro fotogrāfēšanu, bet 1858. gadā franču fotogrāfs Gaspārs Felikss Turnašons ar pseidonīmu Nadars (1820–1910) paceļas ar fotoaparātu gaisa balonā (0-17. att.) un iegūst pirmos Parīzes aero-fotoattēlus. Šie pirmie "īstie" tālzipētes attēli diemžēl nav saglabājušies, taču 1858. gadu tomēr var uzskatīt par modernās tālzipētes dzimšanas gadu. Dažus gadus vēlāk cits franču fotogrāfs Artūrs Batuts (1846–1918) sekmīgi veic aerofotografēšanu ar gaisa pūķiem. Savu fotografēšanas pieredzi viņš apkopo grāmatā [40], kas iznāk 1890. gadā un ko var uzskatīt par pasaulē pirmo aerofotogrāfijai un tālzipētei veltīto monogrāfiju.

Paralēli šiem notikumiem 19. gadsimtā norisinās vēl citi tālzipētei būtiski pētījumi un atklājumi. 1800. gadā vācu un britu astronoms Viljams Heršels (1738–1822) atklāj infrasarkanā starojumu, bet gadu vēlāk, 1801. gadā, vācu ķīmiķis un fiziķis Johans Vilhelms Riters (1776–1810) – ultravioletā starojumu. Veidojas padziļināta izpratne par elektromagnētisko lauku, kas 1865. gadā vainagojas ar skotu matemātiķa Džeimsa Maksvela (1831–1879) ģeniālajiem vienādojumiem (1.1.). No šiem vienādojumiem varēja secināt, ka eksistē tāda elektromagnētisma izpausmes forma kā elektromagnētiskie viļņi jeb starojums, ko 1887. gadā pārliecinoši reģistrēja vācu fiziķis Heinrihs Hercs (1857–1894).

Tādējādi jau 19. gadsimta beigās bija izveidoti modernās tālzipētes teorētiskie pamati, bet 20. gadsimts faktiski sākās ar Pirmo pasaules karu, kas lielā mērā nobremzēja attīstību Eiropā un pasaulē. Aerofotogrāfijas tika iegūtas un izmantotas (galvenokārt izlūkošanai), attīstoties aviācijai, kas samērā veiksmīgi norisinājās starpkaru periodā. Otrais pasaules karš (1939–1945) tomēr stimulēja tālzipētes attīstību, jo tai bija liela nozīme militārajā izlūkošanā. Šajā periodā tika radītas pirmās infrasarkanās nakts redzamības iekārtas bumbvedējiem, sekmīgi izmēģināti pirmie radari⁷, kā arī veikti apjomīgi pētījumi par televīzijas sistēmu izmantošanas iespējām aeroizlūkošanā. Arī vēlāk 20. gadsimta otrajā pusē daudzas aktivitātes un pētījumi tālzipētē bija joprojām noslepenoti to militārās nozīmības



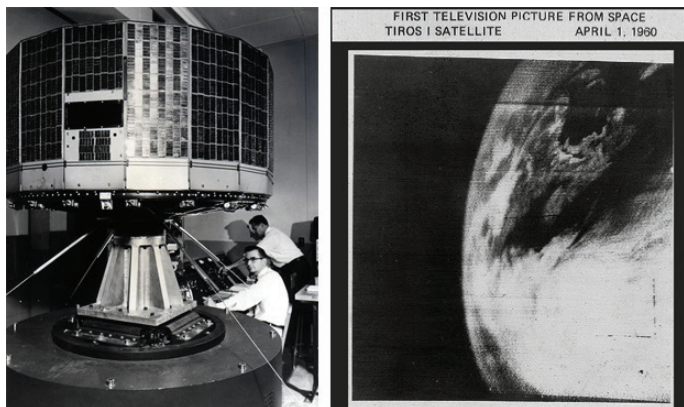
0-17. att. G. F. Turnašona autoportrets un viņa izmantotie gaisa baloni.

7 Vārds cēlies no abreviatūras RADAR – *Radio Detecting And Ranging*.

dēļ. Tālizpētē ļoti svarīgās sintezētās apertūras radaru tehnoloģijas tika attīstītas militārās pētniecības vidē 20. gadsimta 50. gados kompānijā *Texas Instruments*, bet pirmās atklātās publikācijas parādījās tikai ap 1960. gadu.

Tajā pašā 1960. gadā orbitā ap Zemi tika ievadīts pirmais militārais tālizpētes satelīts “*TIROS-1*” (0-18. att.), kura pārraidītie satelītattēli bija visai zemas kvalitātes, ja to vērtējam no mūsdienu viedokļa. Kopš tā laika ir pagājušas daudzas desmitgades, un tālizpētes satelītattēlu kvalitāte ir kļuvusi nesalīdzināmi labāka, bet paši tālizpētes satelīti ar laiku kļuva arvien lielāki un komplicētāki. Tos aprīkoja ar daudz un dažādām iekārtām ģeotelpiskās informācijas ieguvei, līdz 2002. gadā tika palaists *ESA*⁸ (Eiropas Kosmosa aģentūras) tālizpētes satelīts “*ENVISAT*”, kura masa ir 8211 kg, kas ir krietna autobusa lielumā.

Taču šādu milzu satelītu apkalpošana un izmantošana radīja lielas problēmas. Daļa satelīta iekārtu pēc kāda laika pārstāja funkcionēt un traucēja citu tā sistēmu normālu darbu. Tādēļ 21. gadsimta sākumā tika izstrādāts jauns koncepts šādu satelītu izveidei un ekspluatācijai. Tika nolemts izveidot minisatelītu konstelāciju, kurā katrs satelīts ir aprī-



0-18. att. Satelīts “*TIROS-1*” un tā iegūtais tālizpētes attēls.



0-19. att. Viens no “*Sentinel*” konstelācijas tālizpētes satelītiem.

8 *ESA – European Space Agency.*

kots tikai ar vienu vai dažiem tālīzpētes sensoriem, bet tie visi kopā nodrošina tādu pašu funkcionalitāti kā savulaik “ENVISAT”. Ja kāds no satelītiem sabojājas, to ir samērā viegli nomainīt, palaižot jaunu minisatelītu un tādējādi atjaunojot pilnu satelītu konstelācijas funkcionalitāti. Šāda pieeja ESA tiek īstenota, formējot satelītu “Sentinel” (0-19. att.) konstelāciju, pirmais no kuriem tika ievadīts orbītā 2014. gada 3. aprīlī.

0.6. Nobeiguma piezīmes

Nobeigumā ir lietderīgi atzīmēt vēl pāris svarīgu lietu. Pirmkārt, tālīzpētē sāk ienākt tādas jaunas aeroplatformas kā bezpilota lidaparāti droni. Par šiem lidaparātiem vēl runāsim arī turpmākajā izklāstā, bet ir skaidrs, ka to izmantošana tikai pieaugs, liekot izstrādāt jaunas, droniem piemērotas tālīzpētes tehnoloģijas. Dronu izmantošanai ir raksturīgi mazi pārklājumi, augsta telpiskā izšķirtspēja, zemas lietošanas izmaksas, bet daudz sliktāki stabilitātes rādītāji nekā satelītiem. Tās nav nepārvaramas problēmas, bet gan jauni izaicinājumi tālīzpētes tehnoloģiju attīstībai.

Otrkārt, ir jāņem vērā, ka tālīzpētes tehnoloģijas un metodes veido divas lielas grupas ar relatīvi atšķirīgām īpašībām: **optiskās** jeb MSS (multispektrālo skeneru) **tehnoloģijas**, kas strādā ar EM starojuma spektra redzamo gaismu un daļu infrasarkanā diapazona, un **mikroviļņu tehnoloģijas**, kas izmanto radarus un EM starojuma spektra mikroviļņu diapazonu. Šis dalījums ir izveidojies atbilstoši Zemes atmosfēras t. s. EM starojuma caurlaidības “logiem” ar zemu absorbcijas līmeni tajos. Taču, tā kā starojuma viļņa garumu atšķirība šajos “logos” ir ļoti liela, visai atšķirīgi ir izmantotie sensori un līdz ar to arī daudzas lietojamās tālīzpētes tehnoloģijas un metodes.

1. daļa

Tālizpētes fizikālie pamati

1.1. Elektromagnētiskais lauks (2. lekcija)

1.1.1. Kopsavilkums

Tālizpēte ir informācijas ieguve no attāluma, bez tieša kontakta ar pētāmo objektu. Lai to varētu īstenot, ir jāizmanto kāds no fizikālajiem laukiem (elektromagnētiskais lauks, gravitācijas lauks vai akustiskais lauks). Bieži izmanto tieši elektromagnētisko lauku, ar kuru tādēļ iepazīsimies detalizētāk. Apskatīsim Maksvela vienādojumus un vienu no to atrisinājumiem – elektromagnētisko viļņus. Iepazīsim polarizāciju un enerģijas pārnēsi ar elektromagnētiskā viļņa starpniecību, kā arī interferences un difrakcijas parādības.

1.1.2. Maksvela vienādojumi

No fizikas [1, 2] un elektrodinamikas [5] ir zināms, ka elektromagnētisko lauku tā vispārējā formā apraksta Maksvela vienādojumi (to integrālajā formā):

$$\begin{aligned}\oint_L \vec{E} d\vec{l} &= - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \\ \oiint_{S'} \vec{B} d\vec{S} &= 0 \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} &= \iint_S \vec{j} d\vec{S} + \iint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} \\ \oiint_{S'} \vec{D} d\vec{S} &= \iiint_V \rho dV\end{aligned}\tag{1.1.}$$

kur $\vec{E}$ – elektriskā lauka intensitāte, $\vec{D}$ – elektriskā lauka indukcija, $\vec{H}$ – magnētiskā lauka intensitāte, $\vec{B}$ – magnētiskā lauka indukcija, $\vec{j}$ – strāvas blīvuma vektors, ρ – elektrisko lādiņu blīvums, bet integrēšana notiek pa noslēgtu kontūru L , kura ierobežotais laukums ir S un noslēgtu virsmu S' , kas aptver tilpumu V . Elektrisko un magnētisko lauku raksturojošie vektori izotropas vides (aprobežosimies ar šo speciālgadījumu⁹⁾) gadījumā ir savstarpēji saistīti formā:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H} \\ \vec{j} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{1.2.}$$

⁹ Anizotropas vides gadījumā formulu (1.2.) vietā jāizmanto sakarības $\vec{D} = \vec{E} + \vec{P}$ un $\vec{B} = \vec{H} + \vec{M}$, kur $\vec{P}$ – vides elektriskās polarizācijas vektors, $\vec{M}$ – vides magnetizācijas vektors.

kur σ – vides īpatnējā vadītspēja, ϵ – vides relatīvā dielektriskā caurlaidība, μ – vides relatīvā magnētiskā caurlaidība, reizinājumu $\epsilon\epsilon_0$ sauc par vides absolūto dielektrisko caurlaidību, bet $\mu\mu_0$ – par vides absolūto magnētisko caurlaidību, savukārt $\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ [F/m] (faradi uz metru) – elektriskā konstante, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] (henriji uz metru) – magnētiskā konstante.

Izmantojot lauka teorijas [6, 8] jēdzienus un apzīmējumus, Maksvela vienādojumu sistēmu (1.1.) var pārveidot t. s. **diferenciālajā formā**:

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho\end{aligned}\tag{1.3.}$$

kurai izotropas vides gadījumā tāpat ir spēkā sakarības (1.2.).

1.1.3. Elektromagnētiskais vilnis

Izmantojot vienādojumus (1.3.), nav grūti parādīt [5], ka elektriskā un magnētiskā lauka intensitātes $\vec{E}$ un $\vec{H}$ apmierina viļņu vienādojumus formā [6]:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}\tag{1.4.}$$

kur $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 2,99792458 \cdot 10^8$ [m/s] – elektrodinamiskā konstante, bet

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\tag{1.5.}$$

t. s. Laplasa operators [8]. Tātad laikā mainīgs elektromagnētiskais lauks izplatās telpā kā elektromagnētiskais vilnis ar fāzes ātrumu

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}\tag{1.6.}$$

Vakuumā $\epsilon = \mu = 1$ un $v = c$, tādējādi elektrodinamiskā konstante ir vienāda ar šī elektromagnētiskā viļņa izplatīšanās ātrumu vakuumā, kas skaitliski sakrīt ar eksperimentāli noteikto gaismas izplatīšanās ātrumu vakuumā. Šī sakritība vedināja Maksvelu secināt, ka gaisma ir viena no elektromagnētisko viļņu izpausmes formām.

No Maksvela vienādojumiem (1.3.) var arī secināt, ka elektriskā lauka intensitāte $\vec{E}$ un magnētiskā lauka intensitāte $\vec{H}$ elektromagnētiskajā vilnī vienmēr ir savstarpēji perpendikulāri vektori. Turklāt šie vektori atrodas plaknē, kas ir perpendikulāra viļņa izplatīšanās virzienam, t. i., tā izplatīšanās ātruma (jeb fāzes ātruma) vektoram $\vec{v}$. Tātad elektromagnētiskais vilnis ir šķērsvilnis, kuru raksturojošos vektorus $\vec{E}$, $\vec{H}$ un $\vec{v}$ saista sakarība

$$\vec{v} = \frac{v}{EH} [\vec{E} \times \vec{H}] \quad (1.7.)$$

Plakana elektromagnētiskā viļņa, kas izplatās x ass virzienā, gadījumā savstarpēji perpendikulāro vektoru $\vec{E}$ un $\vec{H}$ komponentu vērtības ir atkarīgas tikai no laika t un koordinātas x vērtībām:

$$\begin{aligned} E_x &= H_x = 0 \\ E_y &= E_y(t, x) \\ E_z &= E_z(t, x) \\ H_y &= H_y(t, x) \\ H_z &= H_z(t, x) \end{aligned} \quad (1.8.)$$

No Maksvela vienādojumiem izriet arī tas, ka šīs komponentes ir savstarpēji saistītas

$$\begin{aligned} H_y &= -\sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_z \\ H_z &= \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_y \end{aligned} \quad (1.9.)$$

un, ņemot vērā, ka

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{H_y^2 + H_z^2} \\ E &= \sqrt{E_y^2 + E_z^2} \end{aligned}$$

nonākam pie

$$\sqrt{\mu\mu_0} H = \sqrt{\epsilon\epsilon_0} E \quad (1.10.)$$

Tātad savstarpēji saistītie un perpendikulārie vektori $\vec{E}$ un $\vec{H}$ svārstās vienā fāzē, t. i., tie vienlaikus kļūst vienādi ar nulli un vienlaikus sasniedz savas maksimālās vērtības.

1.1.4. Polarizācija

Plakanu monohromātisku elektromagnētisko vilni (vai precīzāk – tā elektrisko komponenti), kas izplatās x ass virzienā, var raksturot ar harmoniskiem viļņu vienādojumiem formā [2]

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y0} \sin(\omega t - kx + \alpha_1) \\ E_z &= E_{z0} \sin(\omega t - kx + \alpha_2) \end{aligned} \quad (1.11.)$$

kur $\omega = 2\pi f$ – viļņa cikliskā frekvence (šeit f – frekvence), $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$ – t. s. viļņa skaitlis. Elektromagnētiskā viļņa magnētiskās komponentes svārstības savukārt nosaka formulas (1.9.) kopā ar (1.11.).

Vispārējā gadījumā saskaņā ar formulām (1.11.) vektora $\vec{E}$ galapunkts jebkurā elektromagnētiskā lauka punktā pārvietojas pa elipsi¹⁰, kuras plakne ir perpendikulāra x asij (t. i.,

¹⁰ Atbilstoši perpendikulāru svārstību saskaitīšanas likumiem [9].

vektoram $\vec{v}$). Šīs elipses vienādojumu var iegūt no vienādojumiem (1.11.), izslēdzot lielumu $\omega t - kx$

$$\frac{E_y^2}{E_{y0}^2} + \frac{E_z^2}{E_{z0}^2} - 2 \frac{E_y E_z}{E_{y0} E_{z0}} \cos(\alpha_2 - \alpha_1) = \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (1.12.)$$

Vektora $\vec{H}$ galapunkts arī apraksta elipsi tajā pašā plaknē, saglabājot perpendikularitāti ar vektoru $\vec{E}$. Šādu elektromagnētisko vilni sauc par **eliptiski polarizētu**.

Ja amplitūdas E_{y0} un E_{z0} ir vienādas ($E_{y0} = E_{z0}$), bet fāžu starpība

$$\alpha_2 - \alpha_1 = (2m+1) \frac{\pi}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

tad minētās elipses pārvēršas par riņķa līnijām un atbilstošo elektromagnētisko vilni sauc par **cirkulāri polarizētu**. Savukārt, ja

$$\alpha_2 - \alpha_1 = m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

tad minētās elipses deģenerējas par diviem savstarpēji perpendikulāriem taisņu nogriežņiem un atbilstošo elektromagnētisko vilni sauc par **lineāri polarizētu**. Lineārās polarizācijas gadījumā varam izvēlēties izmantojamās koordinātu sistēmas y ass virzienu tā, lai vektora $\vec{E}$ svārstības notiktu (xy) plaknē, t. i.,

$$\begin{aligned} E_y &= E, & E_z &= 0 \\ H_y &= 0, & H_z &= H = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E \end{aligned}$$

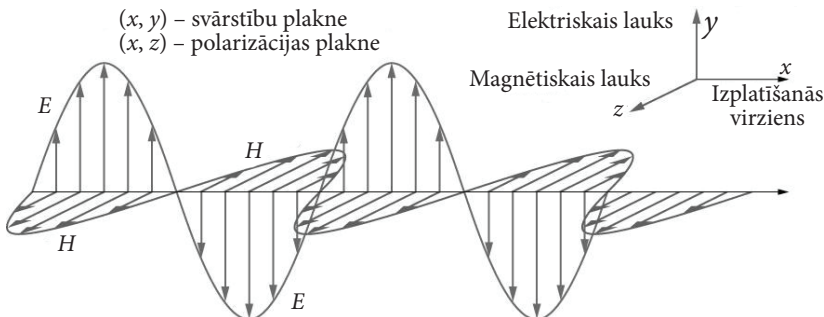
Tādējādi lineāri polarizētu plakanu monohromātisku elektromagnētisko vilni šādā gadījumā var aprakstīt ar harmoniskiem viļņu vienādojumiem:

$$\begin{aligned} E &= E_y = E_0 \sin(\omega t - kx + \alpha) \\ H &= H_z = H_0 \sin(\omega t - kx + \alpha) \end{aligned} \quad (1.13.)$$

kur α – svārstību sākuma fāze pie $x=0$, $E_0 = |\vec{E}|_{\max}$, bet

$$H_0 = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_0$$

Plakni, kurā notiek elektriskās intensitātes vektora $\vec{E}$ svārstības, sauc par svārstību plakni, bet tai perpendikulāro plakni, kurā notiek magnētiskās intensitātes vektora $\vec{H}$ svārstības,



1-1. att. Lineāri polarizēts elektromagnētiskais vilnis.

nereti dēvē par šī elektromagnētiskā viļņa polarizācijas plakni. Protams, ka šādu plakņu definēšana iespējama tikai lineāri polarizēta elektromagnētiskā viļņa gadījumā (1-1. att.).

1.1.5. Pointinga vektors

Elektromagnētiskais vilnis pārnes enerģiju, kuras plūsmas blīvumu un pārneses virziena raksturo **Pointinga vektors**

$$\vec{W} = w\vec{u} \quad (1.14.)$$

kur w – elektromagnētiskā viļņa enerģijas telpiskais blīvums, $\vec{u}$ – enerģijas pārneses ātruma jeb t. s. grupas ātruma vektors. No fizikas [9] zināms, ka elektriskā lauka enerģijas telpisko blīvumu izsaka formula

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$$

un magnētiskā lauka enerģijas telpisko blīvumu izsaka līdzīga formula

$$w_m = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2$$

tādējādi

$$w = w_e + w_m = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2 + \mu \mu_0 H^2}{2} \quad (1.15.)$$

Savukārt, ņemot vērā (1.10.) un (1.6.), iegūstam

$$w = \epsilon \epsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0} EH = \frac{1}{v} EH \quad (1.16.)$$

Monohromatiskam vilnim grupas ātrums $\vec{u}$ ir vienāds ar tā fāzes ātrumu $\vec{v}$, un, ievērojot vienādojumu (1.7.), visbeidzot iegūstam

$$\vec{W} = \frac{EH}{v} \vec{v} = [\vec{E} \times \vec{H}] \quad (1.17.)$$

Elektromagnētiskajā vilnī lauks harmoniski svārstās, tāpēc reālo (laikā vidējoto) enerģijas plūsmas blīvumu, ko pārnes lauks, noteiks Pointinga vektora moduļa vidējā vērtība

$$W_0 = \langle |\vec{W}| \rangle = \langle EH \rangle = E_0 H_0 \langle \sin^2 \dots \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0$$

jo $\sin^2$ funkcijas vidējā vērtība ir 1/2. Ievērojot vienādojumu (1.10.), pēdējo izteiksmi varam pārveidot šādi

$$W_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0}} E_0^2 \quad (1.18.)$$

Tādējādi no enerģētiskā viedokļa elektromagnētisko vilni var raksturot tikai ar vienu no tā laukiem (komponentēm), turklāt tam parasti izvēlas elektrisko lauku, jo no medicīniskās optikas zināms, ka tieši elektriskā, nevis magnētiskā komponente ir atbildīga par redzes fizioloģiskajiem efektiem¹¹. Turklāt enerģijas blīvums plakanā elektromagnētiskā vilnī, kā izriet no formulas (1.18.), ir proporcionāls viļņa elektriskās intensitātes vektora amplitūdas kvadrātam.

¹¹ Šis apgalvojums ir pareizs arī attiecībā uz pusvadītāju sensoriem, ko izmanto tālzipētes sistēmās.

Lielumu

$$Z = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.19.)$$

sauc par **vides impedanci**, un tas ļauj vienādojumu (1.18.) uzrakstīt formā

$$W_0 = \frac{E_0^2}{2Z} \quad (1.20.)$$

Savukārt lielumu

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \, \Omega \quad (1.21.)$$

dēvē par **vakuuma impedanci**, un tā mērvienība ir omi. Vakuuma impedances fizikālā jēga ir tā, ka, lai izstarotu elektromagnētisko viļņus no kādas antenas, tai ir jāpievada enerģija, kas no izstarojošās sistēmas zūd. Pēc analogijas ar termiskajiem zudumiem aktīvajās pretestībās arī šajā gadījumā enerģijas zudumus ir pieņemts raksturot ar aktīvajai pretestībai līdzīgiem jēdzieniem – vides un vakuuma impedanci.

Plakans elektromagnētiskais vilnis, izplatoties vidē, saglabā savu tilpumu un tādējādi arī savu enerģijas blīvumu. Atšķirīgi tas ir ar citu populāru elektromagnētiskā viļņa formu – **sfērisku vilni**. Šāds vilnis, izplatoties vidē un attālinoties no sava avota, aizpilda arvien lielāku tilpumu, tādēļ enerģijas blīvums tajā samazinās apgriezti proporcionāli attāluma kvadrātam no avota (pieņemot, ka šī viļņa kopīgā pārnestā enerģija saglabājas nemainīga). Enerģijas blīvums elektromagnētiskajā vilnī, kā jau tika atzīmēts, ir proporcionāls elektriskās intensitātes vektora amplitūdas kvadrātam, tāpēc varam secināt, ka sfēriskā vilnī elektriskās (un arī magnētiskās) intensitātes vektora amplitūda samazinās apgriezti proporcionāli attālumam no viļņa avota.

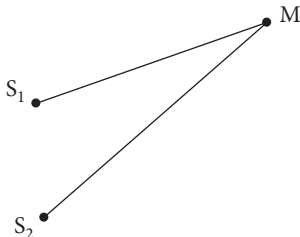
1.1.6. Interference

Interference ir parādība, kas raksturīga ne tikai elektromagnētiskajiem viļņiem, bet arī citiem viļņu procesiem, piemēram, akustiskajiem viļņiem vai viļņiem uz šķidrums virsmas. Lai to izprastu, apskatām izotropu un homogēnu vidi (1-2. att.) un divus monohromātisku viļņu avotus S_1 un S_2 tajā.

Pieņemsim, ka katrs no šiem avotiem izstaro sfērisku vilni, ko apraksta vienādojumi:

$$s_1 = \frac{A_1}{r_1} \sin(\omega_1 t - k_1 r_1 + \alpha_1) = \frac{A_1}{r_1} \sin \Phi_1$$

$$s_2 = \frac{A_2}{r_2} \sin(\omega_2 t - k_2 r_2 + \alpha_2) = \frac{A_2}{r_2} \sin \Phi_2$$



1-2. att. Sfērisku viļņu avoti S_1 un S_2 izotropā un homogēnā vidē.

Punktā M notiks rezultējošas svārstības, kuras atbilstoši viļņu superpozīcijas principam [9] noteiks formula

$$s = s_1 + s_2 = A \sin \Phi \quad (1.22.)$$

jo divu harmonisku svārstību summa arī ir harmoniska svārstība. Lai aprēķinātu šīs svārstības parametrus A un Φ , var izmantot gan trigonometriskus pārveidojumus izteiksmē (1.22.), gan arī t. s. vektoru diagrammas (1-3. att.). To izmantojot, iegūstam:

$$A^2 = \left(\frac{A_1}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{r_2} \right)^2 + 2 \frac{A_1}{r_1} \frac{A_2}{r_2} \cos(\Phi_2 - \Phi_1) \quad (1.23.)$$

$$\tan \Phi = \frac{\frac{A_1}{r_1} \sin \Phi_1 + \frac{A_2}{r_2} \sin \Phi_2}{\frac{A_1}{r_1} \cos \Phi_1 + \frac{A_2}{r_2} \cos \Phi_2} \quad (1.24.)$$

Uzskatot, ka abi viļņu avoti ir **koherenti**, t. i., $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, un, ņemot vērā, ka izotropā un homogēnā vidē $v_1 = v_2 = v$, no kurienes $k_1 = k_2 = k = \omega/v$, varam aprēķināt

$$\Phi_2 - \Phi_1 = -k(r_2 - r_1) + (\alpha_2 - \alpha_1)$$

un saskaņā ar vienādojumu (1.23.)

$$A^2 = \left(\frac{A_1}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{r_2} \right)^2 + 2 \frac{A_1}{r_1} \frac{A_2}{r_2} \cos[k(r_2 - r_1) - (\alpha_2 - \alpha_1)] \quad (1.25.)$$

Lielumi $(\alpha_2 - \alpha_1) = \text{const}$ un $k = \text{const}$, tāpēc rezultējošās svārstības amplitūda A nav atkarīga no laika, bet tikai un vienīgi no punkta M atrašanās vietas, t. i., attālumiem r_1 un r_2 . Tajos telpas punktos, kuros

$$\cos[k(r_2 - r_1) - (\alpha_2 - \alpha_1)] = 1 \quad (1.26.)$$

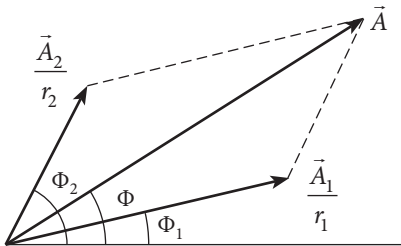
rezultējošo svārstību amplitūda būs maksimāla

$$A = \frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2}$$

bet tajos telpas punktos, kuros

$$\cos[k(r_2 - r_1) - (\alpha_2 - \alpha_1)] = -1 \quad (1.27.)$$

attiecīgi minimāla



1-3. att. Vektoru diagramma.

$$A = \left| \frac{A_1}{r_1} - \frac{A_2}{r_2} \right|$$

Nav grūti pārliciecināties, ka nosacījumu (1.26.) var viegli pārveidot formā

$$r_2 - r_1 = m\lambda + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\pi} \lambda \quad (1.28.)$$

savukārt nosacījumu (1.27.) formā

$$r_2 - r_1 = (2m - 1) \frac{\lambda}{2} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\pi} \lambda \quad (1.29.)$$

kur $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, kā arī ņemts vērā, ka viļņu skaitlis $k = 2/\lambda$. Esam ieguvuši rezultātu, kas raksturo parādību, ko visvieglāk novērot viļņiem uz ūdens virsmas (1-4. att.) un ko sauc par **viļņu interferenci**. Analizējot šo arī elektromagnētiskajiem viļņiem piemītošo parādību, ir jāatzīmē kāda tās būtiska īpašība. Diviem (vai vairākiem) viļņiem pārklājoties un mijiedarbojoties, notiek specifiska enerģijas strukturēšanās telpā. Tajos telpas apgabalos (izteiksme (1.28.)), kur rezultējošā amplitūda A sasniedz savas maksimālās vērtības, enerģijas blīvums ir lielāks nekā abu viļņu pārnestās enerģijas summa, jo

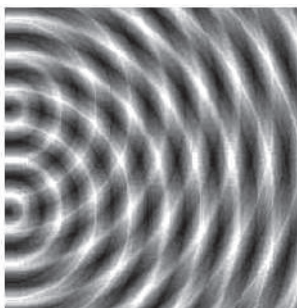
$$A^2 = \left(\frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2} \right)^2 > \left(\frac{A_1}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{r_2} \right)^2$$

Savukārt tajos telpas apgabalos (izteiksme (1.29.)), kur amplitūda A sasniedz savas minimālās vērtības, enerģijas blīvums ir mazāks nekā abu viļņu pārnestās enerģijas summa, jo

$$A^2 = \left(\frac{A_1}{r_1} - \frac{A_2}{r_2} \right)^2 < \left(\frac{A_1}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{r_2} \right)^2$$

1.1.7. Difrakcija

Bez interferences parādības viļņu procesiem (tostarp arī elektromagnētiskajam vilnim) piemīt vēl kāda būtiska īpašība, kas izpaužas kā viļņa liekšanās ap šķēršļiem. Šo viļņu īpašību sauc par **difrakciju**. Aplūkosim monohromatisku elektromagnētisko vilni, kas krīt uz šķērslī E (1-5. att.), kurā ir šaura sprauga BC ar platumu $d \ll l$, kur l – šīs spraugas garums. Ja difrakcijas nebūtu, plakana vilnis izietu taisni cauri spraugai BC un ar lēcu L tiktu fokusēts punktā F_0 uz ekrāna F. Taču eksperimenti rāda, ka elektromagnētiskais vilnis, izgājis cauri spraugai, uzvedas tā, it kā spraugā BC atrastos daudz punktveida svārstību avo-



1-4. att. Divu koherentu viļņu avotu interferences aina.

tu, kuru starojums aiz šķēršļa izplatās visos virzienos un savstarpēji interferē¹². Kādā citā ekrāna F punktā F_ψ lēca L savāc gaismu (elektromagnētisko starojumu), kas ir noliekusies no taisnā virziena (spraugas optiskās ass OF_0 virziena) par leņķi ψ . Optiskā ceļa starpība $\delta = CD$ spraugas malējiem stariem CN un BM ir

$$\delta = d \sin \psi$$

Var pierādīt (skat. [2, 3]), ka, ja

$$d \sin \psi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (1.30.)$$

tad punktā F_ψ staru interferences rezultātā būs novērojams difrakcijas minimums (pilnīga tumsa).

Savukārt gadījumos, kad

$$d \sin \psi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (1.31.)$$

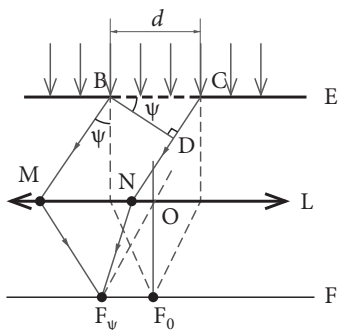
punktā F_ψ staru interferences rezultātā būs novērojams **difrakcijas maksimums**. Veselo skaitli m sauc par atbilstošā difrakcijas minimuma vai maksimuma kārtu. Savukārt virzienā $\psi = 0$ ir novērojams pats intensīvākais t. s. nulltās kārtas difrakcijas maksimums. Aina, kas novērojama uz ekrāna F, redzama 1-6. att. kā spragai perpendikulārs šķēlums, kas ietver tās optisko asi OF_0 . Tātad punktveida attēla F_0 vietā uz ekrāna redzams gaišs plankums (nulltās kārtas difrakcijas maksimums) ar leņķisko pusplatumu

$$\sin \psi_0 = \frac{\lambda}{d}$$

kas atbilst pirmās kārtas difrakcijas minimumam. Tam abās pusēs ir izvietojušās gaišas joslas (ar rimstošu intensitāti), kas atbilst augstāku kārtu difrakcijas maksimumiem.

Ja garas un šauras spraugas vietā šķērslī E izmanto apaļu caurumu, kas reprezentē optisko sistēmu ar objektīva diametru d (skat. 1-5. att.), tad uz ekrāna ir novērojama kvalitatīvi līdzīga difrakcijas aina, kas parādīta 1-7. att. Šajā gadījumā pirmās kārtas difrakcijas minimuma leņķiskais pusplatums, kas nosaka centrālā gaišā plankuma rādiusu, ir vienāds ar

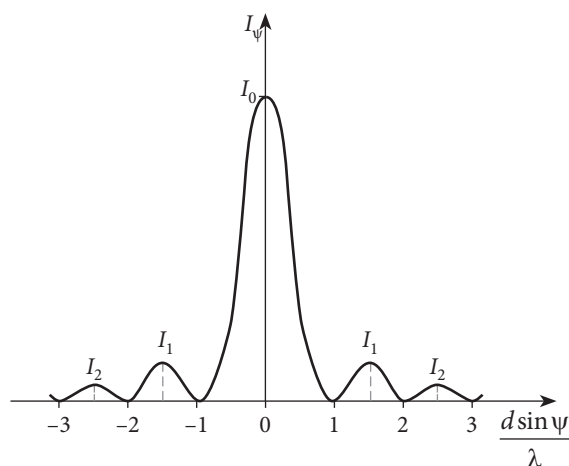
$$\sin \psi_0 = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (1.32.)$$



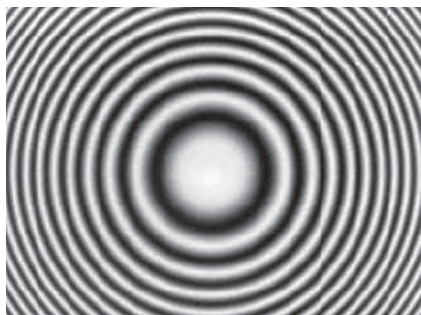
1-5. att. Plakana viļņa difrakcijas skaidrojums.

¹² Šī eksperimentāli novērotā viļņu īpašība atbilst t. s. Heigensa principam.

No tālzpētes viedokļa difrakcija ir ļoti svarīga, jo tā ierobežo maksimālo izšķirtspēju, kādu iespējams sasniegt optiskā diapazona un mikroviļņu attēlos. Augstāku ģeometrisku (t. i., leņķisko) izšķirtspēju, nekā nosaka formula (1.32.), ir iespējams sasniegt tikai ļoti īpašos gadījumos, par kuriem runāsim turpmāk. Taču jāatzīmē, ka optiskajā diapazonā difrakcijas izšķirtspēja ir daudz augstāka, jo tiek izmantots elektromagnētiskais vilnis ar $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ kopā ar optiskajām sistēmām, kuru diametrs $d \sim 10 \text{ cm}$. Tādējādi no formulas (1.32.) izriet, ka optiskajā diapazonā $\psi_0 \sim 2''$. Savukārt mikroviļņu diapazonā, kur $\lambda \sim 1 \text{ cm}$, bet radara antenas izmēri ir ar lieluma kārtu $d \sim 10 \text{ m}$, lietojot formulu (1.32.), iegūstam aptuveni 1000 reižu sliktāku rezultātu $\psi_0 \sim 30'$.



1-6. att. Spraugai perpendikulārs difrakcijas ainas šķelums.



1-7. att. Difrakcijas aina no apaļa cauruma.

1.2. Saules starojums (3. lekcija)

1.2.1. Kopsavilkums

Tālīzpētes sistēmas ir atkarīgas no trim būtiskām procesa komponentēm: enerģijas avota, starojuma mijiedarbības ar planētas (Zemes) virsmu un starojuma mijiedarbības ar planētas (Zemes) atmosfēru. Multispektrālo sistēmu, t. i., optiskā *VIR*¹³ (redzamās un infrasarkanās gaismas) diapazona, lietošanas gadījumā, kā enerģijas avots tiek izmantota Saule. Lai vispusīgi raksturotu Saules elektromagnētisko starojumu, iepazīsimies ar radio-metrijas pamatjēdzieniem, Saules termiskā starojuma galvenajām likumsakarībām, kā arī Saules elektromagnētiskā starojuma svarīgākajiem raksturlielumiem.

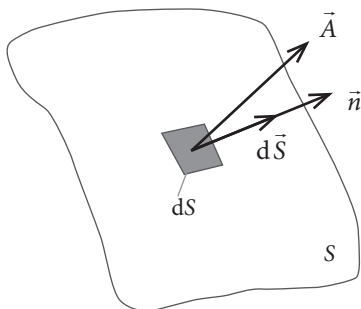
1.2.2. Enerģijas plūsma

Vektoru lauka plūsmas jēdziens ir definēts matemātikas nozarē, ko sauc par lauka teoriju [6]. Par vektoru lauka $\vec{A}$ plūsmu sauc skalāru lielumu

$$\Phi_A = \iint_S \vec{A} d\vec{S} \quad (1.33.)$$

kur integrēšana notiek pa virsmu S (skat. 1-8. att.), bet $d\vec{S}$ vektors ir vērsts diferenciālā laukumīņa dS normāles $\vec{n}$ virzienā (tā modulis dS ir vienāds ar minētā diferenciālā laukumīņa laukumu). Plūsma ir ļoti svarīgs jēdziens, lai izprastu elektromagnētiskās parādības. Maksvela vienādojumos (1.1.) vairāk nekā puse no ietilpstošajiem integrāļiem apraksta dažādas vektoru lauku plūsmas. Piemēram, ceturtais Maksvela vienādojums ir matemātiskā forma no elektrostatikas labi zināmajai **Gausa teorēmai**, kas apgalvo, ka elektriskā lauka intensitātes plūsma caur noslēgtu virsmu ir vienāda ar tajā ieslēgto elektrisko lādiņu summu. Otrais Maksvela vienādojums savukārt vispārina faktu, ka neeksistē magnētiskie lādiņi (magnētiskais monopols), tādēļ magnētiskā lauka intensitātes plūsma caur jebkuru noslēgtu virsmu ir vienāda ar nulli, jo magnētiskās intensitātes (spēka) līnijas vienmēr ir noslēgtas¹⁴.

Taču enerģija ir skalārs lielums, un tai minētā definīcija nav piemērojama. Tādēļ elektromagnētiskā viļņa pārnestās enerģijas plūsmu Φ definē, izmantojot Pointinga vek-



1-8. att. Plūsmas jēdziena skaidrojums.

¹³ *VIR* – *Visual and Infrared*.

¹⁴ Pirmais un trešais Maksvela vienādojums (1.1.) ietver arī cirkulācijas tipa integrāļus.

toru (1.14.), proti,

$$\Phi = \iint_S \vec{W} d\vec{S} = \iint_S w \vec{u} d\vec{S} \quad (1.34.)$$

kur w – elektromagnētiskā viļņa enerģijas telpiskais blīvums, $\vec{u}$ – enerģijas pārnešanas ātruma jeb t. s. grupas ātruma vektors. Speciālgadījumā, kad $w = const$, $\vec{u} = const$, bet S ir plakne, kuras normāle veido leņķi α ar grupas ātruma vektoru $\vec{u}$, iegūstam

$$\Phi = wuS \cos \alpha \quad \left[\frac{J}{m^3} \cdot \frac{m}{s} \cdot m^2 \right] = \left[\frac{J}{s} \right] = [W]$$

un ir viegli saskatāms, ka enerģijas plūsmai ir jaudas dimensionalitāte (t. i., to mēra vatos). Taču no fizikas viedokļa enerģijas plūsma un jauda nav identiski jēdzieni, lai arī to mērvienības sakrīt.

Saules elektromagnētiskais starojums nav monohromatisks, tam ir komplicēts nepārtraukts spektrs¹⁵. Turklāt dažādas šī spektra harmonikas pārne atšķirīgu enerģijas plūsmas daļu. Tādēļ šāda starojuma raksturošanai ir lietderīgi ieviest enerģijas plūsmas **spektrālā blīvuma** jēdzienu (funkciju $\varphi(\lambda)$) saskaņā ar definīciju

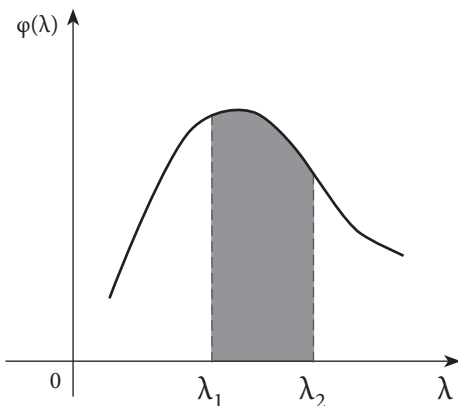
$$\varphi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (1.35.)$$

no kurienes (skat. 1-9. att.)

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda \quad (1.36.)$$

un pilno enerģijas plūsmu spektrālajā joslā $[\lambda_1, \lambda_2]$ reprezentē iezīmētais laukums zem enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas grafika.

Monohromatiska starojuma gadījumā, kā tas izriet no Furjē transformācijas pamatīpašībām, enerģijas spektrālā blīvuma funkcija pārvēršas par t. s. delta funkciju.



1-9. att. Enerģijas plūsmas spektrālā blīvuma funkcija.

¹⁵ Furjē transformācijas nozīmē.

1.2.3. Starojuma intensitāte

Par **starojuma intensitāti** I sauc enerģijas plūsmu $d\Phi$ telpiskajā leņķī $d\Omega$ (skat. 1-10. att.) jeb

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.37)$$

To var radīt gan punktveida starotājs C , gan arī galīgu izmēru avots. Ja starotājs nav punktveida, tad atšķir avota virsmas elementa dS starojuma intensitāti no tā integrālās starojuma intensitātes. Izotropa starojuma gadījumā

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \left[\frac{W}{\text{srad}} \right]$$

kur Φ – pilnā enerģijas plūsma, ko izstaro avots C visos virzienos, bet izteiksmes saucējs satur 4π [srad], kas atbilst maksimālajam telpiskajam leņķim trīsdimensiju telpā.

Ja starojums no avota C ir anizotrops, tad starojuma intensitāte $I(\alpha, \beta)$ ir atkarīga no virziena, ko parasti raksturo ar sfēriskajām leņķiskajām koordinātām α (azimutu) un β (parasti zenītdistanci) [10] izvēlētajā koordinātu sistēmā. Šādā gadījumā integrālo enerģijas plūsmu telpiskajā leņķī Ω var aprēķināt, izmantojot formulu

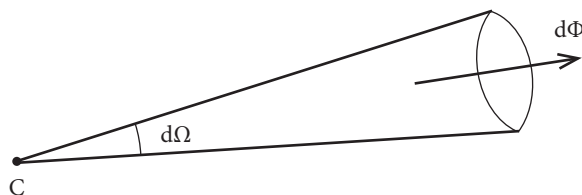
$$\Phi_{\Omega} = \int_{\Omega} I(\alpha, \beta) d\Omega = \int_{\alpha} \int_{\beta} I(\alpha, \beta) \sin\beta d\beta d\alpha \quad (1.38.)$$

Šeit normējošais reizinātājs $\sin\beta$ ir ieviests tādēļ, ka, tuvojoties zenītam (koordinātu sistēmas z asij), attālums starp vertikālajiem riņķiem [10] samazinās proporcionāli $\sin\beta$ funkcijai.

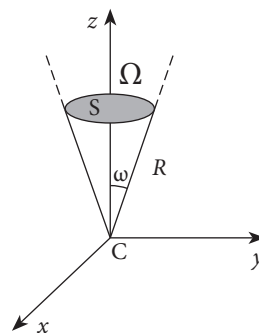
Lai to labāk izprastu, noskaidrosim, kādu telpisko leņķi Ω veido konuss ar leņķi pie virsotnes 2ω (skat. 1-11. att.). Saskaņā ar definīciju telpiskais leņķis Ω ir vienāds ar konusa izšķeltā laukuma S attiecību pret sfēras rādiusa kvadrātu, t. i.,

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (1.39.)$$

Lai aprēķinātu laukumu S , ko no sfēras ar rādiusu R izšķēļ konuss ar virsotnes leņķi 2ω , apskatām 1-12. att., kur attēlots šī laukuma diferenciālais elements dS .



1-10. att. Starojuma intensitātes definīcija.



1-11. att. Konuss, kas veido telpisko leņķi Ω .

Saskaņā ar zīmējumu

$$dS = R^2 \sin \beta d\beta d\alpha$$

Lai aprēķinātu S , jāveic integrēšana, kurā koordināta α mainās intervālā $[0, 2\pi]$, koordināta β – intervālā $[0, \omega]$:

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^{\omega} R^2 \sin \beta d\beta d\alpha = 2\pi R^2 \int_0^{\omega} \sin \beta d\beta = 2\pi R^2 (-\cos \beta) \Big|_0^{\omega} = 2\pi R^2 (1 - \cos \omega) = 4\pi R^2 \sin^2 \frac{\omega}{2}$$

Tātad atbilstošais telpiskais leņķis ir

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = 4\pi \sin^2 \frac{\omega}{2} \quad (1.40.)$$

Varam secināt, ka izotropa starotāja gadījumā, kad $I(\alpha, \beta) = I_0$, enerģijas plūsma telpiskajā leņķī Ω , ko veido iepriekš apskatītais konuss ar virsotnes leņķi 2ω , būs

$$\Phi_{\Omega} = I_0 \int_{\Omega} d\Omega = I_0 \Omega = 4\pi I_0 \sin^2 \frac{\omega}{2} \quad (1.41.)$$

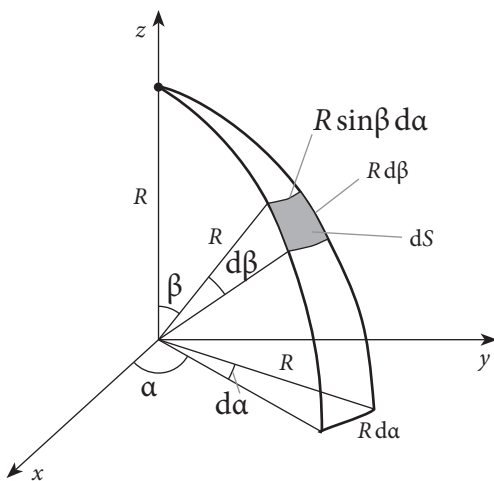
1.2.4. Apstarojums un spīdība

Turpinājumā iepazīsimies ar diviem citiem radiometriskajiem starojuma raksturlielumiem – apstarojumu un spīdību¹⁶. Ja uz kāda diferenciāli maza laukumiņa dS krīt starojums, ko raksturo enerģijas plūsma $d\Phi$, tad par šī laukumiņa **apstarojumu** sauc lielumu

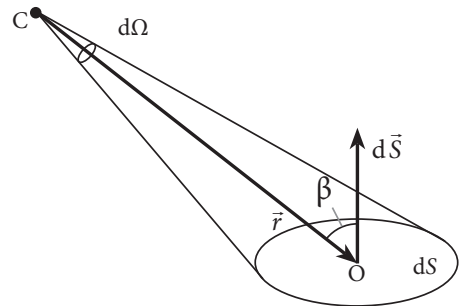
$$A = \frac{d\Phi}{dS} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.42.)$$

Punktveida starojuma avota C izsauktais apstarojums (skat. 1-13. att.) laukumiņam dS būs

$$A = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \beta}{r^2} \quad (1.43.)$$



1-12. att. Sfēras virsmas laukuma diferenciālis.



1-13. att. Apstarojuma skaidrojums.

¹⁶ Angliski šos starojumu raksturojošos lielumus sauc attiecīgi par *irradiance* un *emittance*.

jo $d\Phi = Id\Omega$, bet

$$d\Omega = \frac{dS \cos \beta}{r^2}$$

Spīdību definē tāda pati formula, kāda definē apstarojumu, proti, (skat. 1-14. att.)

$$R = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.44.)$$

Tikai šajā gadījumā $d\Phi$ ir enerģijas plūsma, ko laukumiņš dS izstaro visos virzienos pustelpas virzienā, t. i., telpiskajā leņķī 2π . Loģiski, ka arī spīdības mērvienība ir $[W/m^2]$.

Spīdība piemīt gan starojoša, gan apstarota objekta virsmas elementiem. Apstarota laukumiņa dS gadījumā

$$R = k_\lambda A \quad (1.45.)$$

kur A – apstarojums, $k_\lambda = k(\lambda)$, to sauc par atstarošanas koeficientu. Piemēram, sniegam (redzamās gaismas diapazonā) $k_\lambda \cong 0,9$, oglei $k_\lambda \cong 0,02$.

1.2.5. Spožums

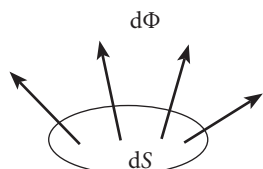
Spožuma¹⁷ jēdziens ir komplicētāks nekā iepriekš aplūkotie starojumu raksturojošie jēdzieni. Lai to izprastu, apskatām (skat. 1-15. att.) diferenciālu laukumiņu dS , no kura virzienā $\vec{n}$ izplatās starojums (enerģijas plūsma) $d\Phi$ telpiskajā leņķī $d\Omega$.

Šī enerģijas plūsma acīmredzot ir proporcionāla gan telpiskajam leņķim $d\Omega$, gan arī laukumiņa dS “redzamajam” izmēram $dS \cos \beta$, tādējādi

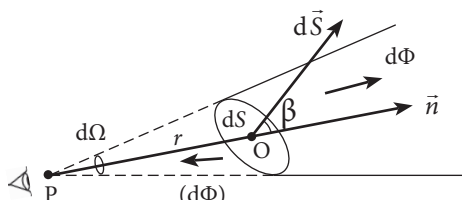
$$d^2\Phi = B \cos \beta dS d\Omega \quad (1.46.)$$

kur B – proporcionalitātes koeficients, ko sauc par spožumu, bet $d\Phi$ ir aizstāts ar $d^2\Phi$, jo izteiksmes (1.46.) labajā pusē ir divi diferenciāli mazi lielumi dS un $d\Omega$. Ideālā gadījumā spožums B nav atkarīgs no leņķa β (kā tas ir karsta negluda starojoša ķermeņa gadījumā), bet daudzos reālos gadījumos atkarība no leņķa β tomēr ir novērojama. Tas pats ir sakāms arī par apstarotu virsmu spožumu. Ja apstarotā virsma ideāli (t. i., izotropi) izkļiedē gaismu, kā tas ir t. s. **Lamberta izkļiedes** [11] gadījumā, tad šādas virsmas spožums B nav atkarīgs no leņķa β , taču citos gadījumos šāda atkarība tomēr pastāv. Piemēram, gludām atstarojošām virsmām spožums B būs izteikti lielāks spoguļrefleksijas virzienā.

Kā piemēru apskatīsim ideālu starotāju, kuram $B = \text{const}$, un integrēsim (ņemot vērā 1-12. att.) tā izstaroto enerģijas plūsmu pa pustelpu



1-14. att. Spīdības skaidrojums.



1-15. att. Spožuma skaidrojums.

¹⁷ Angļu val. – *radiance*.

$$d\Phi = B dS \int_0^{2\pi} \cos\beta d\Omega = B dS \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\pi/2} \cos\beta \sin\beta d\beta = 2\pi B dS \int_0^{\pi/2} \cos\beta \sin\beta d\beta = \pi B dS \quad (1.47.)$$

jo $d\Omega = \sin\beta d\beta d\alpha$, savukārt

$$\int_0^{\pi/2} \cos\beta \sin\beta d\beta = \frac{1}{2}$$

Tādējādi ideāla (izotropa) starotāja gadījumā apskatāmā laukumiņa spīdība ir vienāda ar

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \pi B$$

jeb

$$B = \frac{1}{\pi} R \quad (1.48.)$$

Pēdējās formulas saista izotropa starotāja spīdību ar tā spožumu. Ja virsma staro, izkļiedot uz to krītošo enerģijas plūsmu, tad izotropas Lamberta izkļiedes gadījumā

$$B = \frac{k_\lambda}{\pi} A \quad (1.49.)$$

jo atbilstoši formulai (1.45.) tās spīdība ir proporcionāla apstarojumam $R = k_\lambda A$.

Visbeidzot, no formulām (1.46.) un (1.37.) izriet, ka spožumu B var izteikt formā

$$B = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S \cos\beta \partial \Omega} = \frac{dI}{dS \cos\beta} \left[\frac{W}{m^2 \text{srad}} \right] \quad (1.50.)$$

t. i., spožums B skaitliski ir vienāds ar starojuma intensitāti I , ko aplūkojamā virsma staro no laukuma vienības normālā (virsmas perpendikulārā) virzienā (kad $\beta = 0$).

1-15. att. redzamo konstrukciju iespējams interpretēt arī “pretējā” virzienā, t. i., runāt par starojošā elementa dS spožumu kā proporcionalitātes koeficientu enerģijas plūsmai ($d\Phi$), kura telpiskajā leņķī $d\Omega$ nonāk starojuma reģistratorā P no virziena $-\vec{n}$. Šādā gadījumā telpiskais leņķis $d\Omega$ būs lielāks, jo mazāks attālums r , t. i., jo tuvāk punkts P atradīsies starojošajam elementam dS .

1.2.6. Saules starojuma spektrālais blīvums

Termodinamiskā līdzsvara gadījumā jebkuru ķermeni var raksturot ar tā temperatūru T . Turklāt visi ķermeņi, kuru temperatūra ir lielāka par t. s. absolūto nulli ($T > -273,15^\circ \text{C}$), staro elektromagnētisko starojumu, kura spīdību saskaņā ar izteiksmēm (1.35.), (1.36.) nosaka formula

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d}{dS} \int_0^\infty \varphi(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \frac{d\varphi_\lambda}{dS} d\lambda = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda \quad (1.51.)$$

kur lielumu

$$r_\lambda = \frac{d\varphi_\lambda}{dS} \quad (1.52.)$$

sauc par šī ķermeņa **emisijas spēju** (šeit $\varphi_\lambda = \varphi(\lambda)$ – enerģijas plūsmas spektrālais blīvums). Tātad emisijas spēja raksturo starojošā ķermeņa enerģijas plūsmas spektrālo blīvumu no tā laukuma vienības.

Tālāk iedomājamies ķermeni, uz kuru spektrālajā joslā $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ krīt enerģijas plūsma $d\Phi_\lambda = \varphi_\lambda d\lambda$. Ja daļu $d\Phi'_\lambda$ no šīs enerģijas plūsmas minētais ķermenis absorbē, tad lielumu

$$a_\lambda = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda} \quad (1.53.)$$

sauc par šī ķermeņa **absorbcijas spēju**.

19. gadsimta beigās vācu fiziķis Gustavs Kirhofs (1824–1887) analizēja tolaik zināmo faktu, ka, ja noslēgtā apvalkā ar stabilu temperatūru T ievieto dažādus ķermeņus A_1, A_2, A_3 utt. (skat. 1-16. att.), tad pēc kāda laika tie visi iegūst temperatūru T neatkarīgi no tā, kas un kādi ir šie ķermeņi. Kirhofs secināja, ka tas iespējams tikai un vienīgi tad, ja visiem šiem ķermeņiem, kas savstarpēji un ar apvalku apmainās ar termisko elektromagnētisko starojumu, emisijas un absorbcijas spēju attiecība ir viena un tā pati neatkarīgi no šo ķermeņu citām fizikālajām īpašībām, t. i.,

$$\frac{r_\lambda^{(1)}}{a_\lambda^{(1)}} = \frac{r_\lambda^{(2)}}{a_\lambda^{(2)}} = \dots = \frac{r_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T) \quad (1.54.)$$

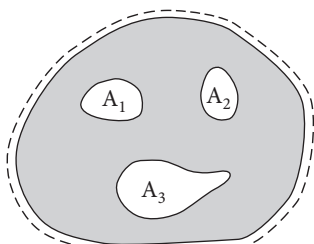
kur funkcija $f(\lambda, T)$ ir atkarīga tikai no starojuma viļņa garuma λ un temperatūras T . Šo pētījumu rezultātā tika formulēts Kirhofa likums: **Emisijas un absorbcijas spēju attiecība r_λ/a_λ nav atkarīga no ķermeņu dabas, tā visiem ķermeņiem ir viena un tā pati λ un T funkcija.**

Par **absolūti melniem** ķermeņiem sauc tādus ķermeņus, kuru absorbcijas spēja $a_\lambda = 1$, tātad

$$r_\lambda^{amk} = f(\lambda, T)$$

jeb funkcija $f(\lambda, T)$ nav nekas cits kā absolūti melna ķermeņa emisijas spējas atkarība no λ un T . Varam secināt, ka visiem absolūti melniem ķermeņiem neatkarīgi no to fizikālajām īpašībām emitējamā starojuma spektrālais blīvums temperatūrā T ir viens un tas pats jeb visu absolūti melnu ķermeņu spīdība atkarībā no temperatūras mainās vienādi.

Funkcijas $f(\lambda, T)$ analītisko veidu fiziķiem neizdevās noteikt, izmantojot klasiskās fizikas priekšstatus par vielas uzbūvi un starojuma būtību. To 20. gadsimta sākumā paveica vācu fiziķis Makss Planks (1858–1947) ar tolaik jaunās kvantu fizikas priekšstatiem. Īstenībā centieni izskaidrot ķermeņu termiskā starojuma īpatnības un empīrisko Kirhofa likumu arī bija viens no kvantu fizikas rašanās cēloņiem. M. Planks parādīja, ka



Apvalks ar T

1-16. att. Kirhofa likuma skaidrojums.

$$f(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (1.55.)$$

kur c – elektrodinamiskā konstante (gaismas ātrums vakuumā), k – Bolcmaņa konstante, h – Planka konstante. Planka funkcijas $f(\lambda, T)$ ilustratīvi grafiki redzami 1-17. att.

Temperatūra $T = 6000$ K aptuveni atbilst Saules virsmas temperatūrai, bet $T = 300$ K aptuveni atbilst Zemes virsmas vidējai temperatūrai. Saule ir pelēks (absorbācijas spējas nozīmē, skat. 1.2.7. sadaļu) ķermenis ar $a_\lambda \approx 0,99$, tādējādi tās emisijas spēju (enerģijas plūsmas spektrālo blīvumu no laukuma vienības) ar augstu precizitāti apraksta Planka formula (1.55.).

1.2.7. Termiskā starojuma galvenās likumsakarības

Izmantojot Planka formulu (1.55.), aprēķināsim absolūti melna ķermeņa integrālo spīdību

$$R^{amk} = \int_0^\infty r_\lambda^{amk} d\lambda = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda = 2\pi hc^2 \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5} d\lambda}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

Lai integrētu šo integrāli, ieviesīsim konstantes $c_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = hc/k$ un veiksīm substitūciju $x = c_2/\lambda T$ jeb

$$\lambda = \frac{c_2}{Tx}, \quad d\lambda = -\frac{c_2}{Tx^2} dx$$

kas ļauj pārveidot Planka funkciju formā

$$f_p(x) = \frac{c_1 T^5}{c_2^5} \cdot \frac{x^5}{e^x - 1}$$

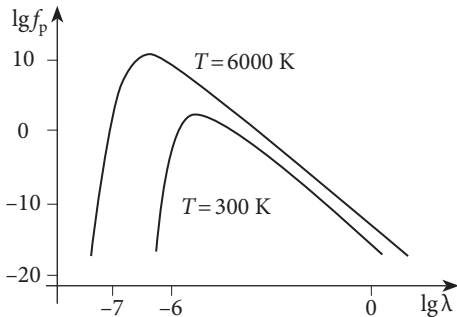
kurā tā atkarīga tikai no viena argumenta x . Tādējādi

$$R^{amk} = \frac{c_1 T^4}{c_2^4} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \sigma T^4 \quad (1.56.)$$

kur

$$\sigma = \frac{c_1}{c_2^4} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = 5,6696 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right] \quad (1.57.)$$

Sakarību (1.56.), kas apgalvo, ka absolūti melna ķermeņa integrālā spīdība pieaug pro-



1-17. att. Planka funkcijas grafiki.

porcionāli tā absolūtās (Kelvina) temperatūras ceturtajai pakāpei, sauc par Stefana-Bolcmaņa [9] likumu, bet konstanti (1.57.) – par Stefana-Bolcmaņa konstanti. Šo likumu uzskata par vienu no starojuma termodinamikas pamatlikumiem.

Tālāk aprēķināsim funkcijas $f_p(x)$ maksimumu, to atvasinot un pielīdzinot atvasinājumu nullei

$$\frac{df_p}{dx} = \frac{5x^4(e^x - 1) - x^5 e^x}{(e^x - 1)^2} = 0$$

no kurienes

$$5(e^x - 1) - x e^x = 0$$

Šī vienādojuma atrisinājums ir $x_{\max} = 4,9650$, tādējādi

$$\lambda_{\max} = \frac{c_2}{T x_{\max}} = \frac{c_3}{T} \quad (1.58.)$$

kur konstante $c_3 = c_2/x_{\max}$. Sakarību (1.58.) sauc par **Vīna (nobīdes) likumu**, saskaņā ar kuru viļņa garums $\lambda_{\max}$, pie kura novērojams absolūti melna ķermeņa emisijas spējas maksimums, ir apgriezti proporcionāls tā absolūtajai (Kelvina) temperatūrai. Arī šo likumu uzskata par vienu no starojuma termodinamikas pamatlikumiem.

Absolūti melna ķermeņa absorbcijas spēja $a_{\lambda}^{amk} = 1$, tāpēc no Kirhofa likuma (1.54.) izriet, ka

$$r_{\lambda}^{amk} = \frac{r_{\lambda}}{a_{\lambda}} \quad (1.59.)$$

jeb visu “nemelnu” ķermeņu (kuriem $a_{\lambda} < 1$) emisijas spēja $r_{\lambda} = a_{\lambda} r_{\lambda}^{amk}$ vienmēr ir mazāka par absolūti melna ķermeņa emisijas spēju r_{λ}^{amk} tajā pašā temperatūrā T . Ja reāla ķermeņa absorbcijas spēja $a_{\lambda} = const < 1$ nav atkarīga no viļņa garuma λ , tad tādu ķermeni sauc par pelēku.

1.2.8. Saules un tās starojuma raksturlielumi

Sauli var raksturot kā aptuveni sfērisku (ar rādiusu $r = 6,96 \cdot 10^8$ m), pelēku ($a_{\lambda} \cong 0,99$) ķermeni ar temperatūru $T_{\odot} = 5900$ K, kas atrodas attālumā $d = 1,5 \cdot 10^{11}$ m no Zemes. Izmantojot Stefana-Bolcmaņa likumu un sakarību (1.59.), varam aprēķināt Saules integrālo spīdību

$$R_{\odot} = a_{\lambda} \sigma T_{\odot}^4 = 6,35 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Pilnā enerģijas plūsma (saukta arī par starjaudu), ko Saule izstaro apkārtējā telpā

$$\Phi_{\odot} = 4\pi r^2 R_{\odot} = 3,87 \cdot 10^{26} [\text{W}]$$

Apstarojums Zemes orbītas rādiusa attālumā no Saules ir vienāds ar (šo lielumu sauc par solārkonstanti)

$$A_{\odot} = \frac{\Phi_{\odot}}{4\pi d^2} = R_{\odot} \frac{r^2}{d^2} = 1,37 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$$

Varam novērtēt arī Saules spožumu $B_{\odot}$ telpiskajā leņķī

$$\Delta\Omega_{\odot} = \frac{\pi r^2}{d^2}$$

kādā tā ir redzama no Zemes

$$B_{\odot} = \frac{1}{\pi} R_{\odot} = \frac{a_{\lambda} \sigma T_{\odot}^4}{\pi} = 2,02 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{srad}} \right]$$

1-18. att. ar raustītu līniju parādīta absolūti melna ķermeņa ar temperatūru $T_{\odot} = 5900 \text{ K}$ emisijas spējai (Planka formulai) atbilstoša apstarojuma spektrālā blīvuma likne Zemes orbītas rādiusa attālumā no šī ķermeņa. Augšējā nepārtrauktā līnija attēlo minēto likni reālai Saulei, kāda tā ir, pirms starojums šķērsojis Zemes atmosfēru. Apakšējā nepārtrauktā līnija attēlo Saules apstarojuma spektrālo blīvumu uz Zemes virsmas, kad starojums jau šķērsojis Zemes atmosfēru. Šajā grafikā redzamas daudzas absorbcijas līnijas un joslas, kas radušās Saules starojuma mijiedarbības rezultātā ar Zemes atmosfēru (par to būs runa turpmāk).

Nobeigumā ir lietderīgi vēl minēt, ka Saules starojums ārpus Zemes atmosfēras tikpat kā nav polarizēts, bet, tam mijiedarbojoties ar atmosfēru, notiek starojuma daļēja polarizācija. Polarizācijas veida un pakāpes raksturošanai [3] inženierzinātnēs (arī tālīzpētē) nereti lieto t. s. **Stoksa vektoru**, ko veido četras komponentes (izmantoti apzīmējumi no formulām (1.11.))

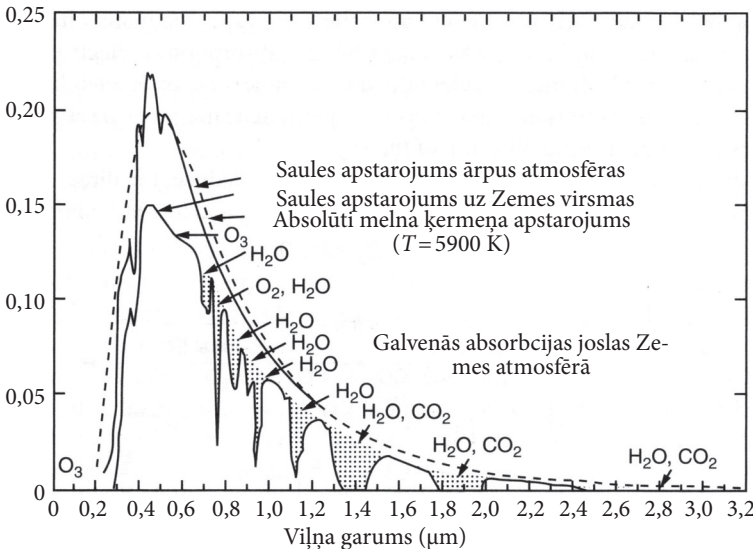
$$s_0 = \langle E_y^2 \rangle + \langle E_z^2 \rangle$$

$$s_1 = \langle E_y^2 \rangle - \langle E_z^2 \rangle$$

$$s_2 = \langle 2E_y E_z \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \rangle$$

$$s_3 = \langle 2E_y E_z \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \rangle$$

bet ar “<>”, līdzīgi kā agrāk, apzīmēta vidējošana pēc laika.



1-18. att. Saules starojuma spektrālais blīvums (relatīvās vienībās) [12].

Jā Stoksa vektoru

$$\underline{s} = \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{Bmatrix} \quad (1.60.)$$

normalizē tā, lai $s_0 = 1$, tad nav grūti pārliccināties, ka dažādām šī vektora vērtībām atbilst dažādi polarizēta gaisma (elektromagnētiskais starojums). Piemēram,¹⁸:

- nepolarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, 0, 0, 0\}^T$;
- z plaknē lineāri polarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, 1, 0, 0\}^T$;
- y plaknē lineāri polarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, -1, 0, 0\}^T$;
- 45° plaknē lineāri polarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, 0, 1, 0\}^T$;
- pulksteņa rādītāja kustības virzienā cirkulāri polarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, 0, 0, 1\}^T$;
- pretēji pulksteņa rādītāja kustības virzienam cirkulāri polarizētai gaismai $\underline{s} = \{1, 0, 0, -1\}^T$;
- kādam no eliptiskās polarizācijas veidiem $\underline{s} = \{1, 0,6, 0, 0,8\}^T$ un tamlīdzīgi.

Jā zināms Stoksa vektors, tad gaismas (elektromagnētiskā viļņa) raksturošanai izmanto arī lielumu

$$p = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}{s_0^2}} \quad (1.61.)$$

ko sauc par **polarizācijas pakāpi**.

¹⁸ Ar T šeit apzīmēta vektora transponēšanas operācija.

1.3. Starojuma mijiedarbība ar virsmu (4. lekcija)

1.3.1. Kopsavilkums

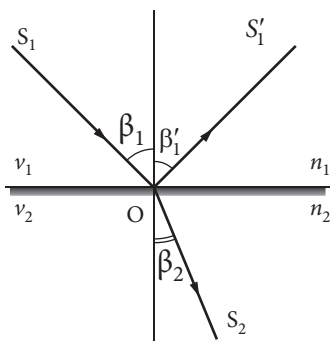
Starojuma mijiedarbība ar planētas (Zemes) virsmu ir svarīgākā tālzpētes procesa komponente, jo tās rezultātā elektromagnētiskajā signālā tiek iekodēta informācija par pētāmo virsmu. Šo mijiedarbību būtiski ietekmē virsmas faktūra (tās fizikālo parametru kopums) un virsmas tekstūra (tās ģeometriskā parametru kopums). No fizikālajiem parametriem svarīgākais ir t. s. vides laušanas koeficients (kas vairumā tālzpētes gadījumu atkarīgs tikai no dielektriskās konstantes), jo tas lielā mērā nosaka gan virsmas absorbcijas īpašības un krāsu, gan refleksijas un polarizācijas izmaiņu parametrus. Tāpēc vides laušanas koeficientam un tā lietošanas aspektiem pievērsīsim lielu uzmanību. Nobeigumā iepazīsim arī Doplera efektu.

1.3.2. Refleksija, refrakcija un dispersija

Lai izprastu, kā elektromagnētiskā starojuma mijiedarbību ar planētas (Zemes) virsmu ietekmē šīs virsmas faktūra (t. i., fizikālo īpašību un parametru kopums), vēl neņemot vērā tekstūras (t. i., ģeometriskā īpašību no parametru kopuma) ietekmi, pieņemsim, ka starojums mijiedarbojas ar gludu¹⁹ virsmu.

Līdz šim pētījām elektromagnētisko viļņus, t. i., izmantojām t. s. viļņu formālistu elektromagnētisko parādību analīzi. Taču no fizikas (ģeometriskās optikas) zināms, ka optisko parādību analīzei lieto arī t. s. staru formālistu. Par **staru** sauc ģeometrisku konstrukciju (līniju), kas visos tās punktos ir perpendikulāra (elektromagnētiskā) viļņa t. s. viļņa fronteī. Lietderīgi atzīmēt, ka enerģijas pārnese elektromagnētiskajā viļņā notiek staru virzienā, tādēļ var uzskatīt, ka šo virzienu nosaka Pointinga vektors (1.14.).

Atceramies no fizikas (viļņu teorijas vai ģeometriskās optikas) [1, 9], ka, vilnim šķērsojot virsmu, kuras dažādās pusēs ir atšķirīgi šī viļņa izplatīšanās ātrumi (attiecīgi v_1 un v_2), notiek šī viļņa atstarošana (refleksija) un laušana (refrakcija). Šīs parādības, izmantojot staru formālistu, apraksta Dekarta-Snellusa²⁰ likums (skat. 1-19. att.)



1-19. att. Dekarta-Snellusa likuma skaidrojums.

¹⁹ Gluduma jēdziens tiks precizēts nākamajā lekcijā. Šeit to lietojam intuitīvā nozīmē.

²⁰ Renē Dekarts – franču fiziķis, matemātiķis un filozofs (1596–1650), Vilebrords Snells van Roien (arī Snellius) – flāmu astronoms (1580–1626).

$$\frac{\sin \beta_1}{v_1} = \frac{\sin \beta_2}{v_2}, \quad (\beta'_1 = \beta_1) \quad (1.62.)$$

kas nosaka, ka, staram S_1 krītot uz robežvirsmu leņķī β_1 , veidojas atstarotais stars S'_1 leņķī $\beta'_1 = \beta_1$ un laužtais stars S_2 leņķī β_2 , ko nosaka formula (1.62.). Ja apskatām elektromagnētiskos viļņus, tad vides ar atšķirīgiem šo viļņu izplatīšanās ātrumiem v_j bieži raksturo ar to (absolūtajiem) laušanas koeficientiem n_j (saukti arī par optisko blīvumu)

$$n_j = \frac{c}{v_j} \quad (1.63.)$$

kas ļauj (1.62.) pārveidot formā

$$n_1 \sin \beta_1 = n_2 \sin \beta_2 \quad (1.64.)$$

bet attiecību $n_{21} = n_2/n_1$ sauc par relatīvo laušanas koeficientu. Tādējādi laušanas koeficienti viennozīmīgi nosaka divas svarīgas starojuma mijiedarbības ar virsmu parādības – **refleksiju** un **refrakciju**.

Elektromagnētiskajam viļnim no formulām (1.6.) un (1.63.) izriet, ka

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (1.65.)$$

kur ϵ – relatīvā dielektriskā caurlaidība, μ – relatīvā magnētiskā caurlaidība, jeb laušanas koeficientu n nosaka vides elektriskās un magnētiskās īpašības. Tālpētes gadījumos visbiežāk planētas (Zemes) virsmu veido dielektriski materiāli²¹, kuriem $\mu \approx 1$, un formulu (1.65.) iespējams vienkāršot

$$n \cong \sqrt{\epsilon} \quad (1.66.)$$

Vēl jāņem vērā, ka relatīvā dielektriskā caurlaidība ϵ un laušanas koeficients n ir atšķirīgi dažāda viļņa garuma λ elektromagnētiskajam starojumam, t. i., $n = n(\lambda) = n_\lambda$. Šo parādību sauc par **dispersiju**, un lielākā vai mazākā mērā tā izpaužas jebkurā vidē, izņemot vakuumu (kurā tās nav). Disperģējošās vidēs atšķiras viļņu fāzes ātrums

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (1.67.)$$

no grupas (jeb enerģijas un informācijas pārnese) ātruma

$$u = \frac{d\omega}{dk} \quad (1.68.)$$

šeit $\omega = 2\pi f = vk$ – cikliskā frekvence (f – frekvence), savukārt $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$ – viļņa skaitlis. Turklāt iespējami abi gadījumi – gan $v > u$, gan $v < u$. Ja vide nav disperģējoša (tās dispersija ir niecīga), tad fāzes ātrums $v = c/n \neq v(\omega)$ un šajā gadījumā

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk}(vk) = v$$

t. i., fāzes un grupas ātrumi ir vienādi. Tālpētē ar dispersiju ir būtiski jāreķinās, strādājot ar mikroviļņu tehnoloģijām, jo mikroviļņiem piemīt ļoti izteikta dispersija Zemes jonosfērā [13].

²¹ Tikai ferromagnētiskiem virsmas materiāliem relatīvā magnētiskā caurlaidība būtiski atšķiras no $\mu = 1$, bet tādi gadījumi tālpētes praksē ir reti sastopami.

Kā jau iepriekš atzīmēts, dispersija lielākā vai mazākā mērā piemīt visām vidēm, ar kurām uz Zemes virsmas (vai tās tuvumā) nākas saskarties elektromagnētiskajam starojumam. Katru no šīm vidēm raksturo nevis konstants laušanas koeficients n , bet gan funkcija $n_\lambda = n(\lambda)$ vai $n_\omega = n(\omega)$. Šīs funkcijas ir ļoti informatīvas un spēj identificēt dažādus materiālus (ģeoloģiskās struktūras), ar kuriem mijiedarbojies elektromagnētiskais starojums. Tās plaši izmanto, veidojot tālzipētes datu interpretācijas strukturālos modeļus.

1.3.3. Absorbīcija un krāsa

Veidojot dažādu vielu fizikālos modeļus, to dielektrisko caurlaidību, ϵ nereti ir lietderīgi traktēt kā kompleksu skaitli

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.69.)$$

Šādā gadījumā arī laušanas koeficients n ir komplekss skaitlis

$$n = n' - in'' \quad (1.70.)$$

jo saskaņā ar formulu (1.66.) $n^2 = \epsilon$, no kurienes

$$n^2 = n'^2 - 2in'n'' - n''^2 = \epsilon' - i\epsilon''$$

un

$$\epsilon' = n'^2 - n''^2, \quad \epsilon'' = 2n'n'' \quad (1.71.)$$

Kompleksa laušanas koeficienta gadījumā arī viļņu skaitlis ir komplekss lielums

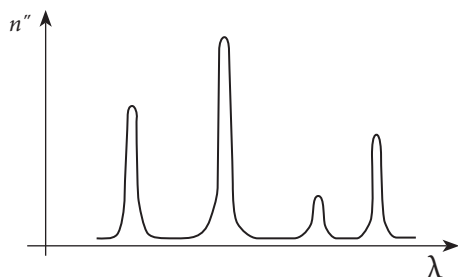
$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} = \frac{\omega n}{c} = \frac{\omega}{c} (n' - in'') = k' - ik'' \quad (1.72.)$$

kur

$$k' = \frac{\omega n'}{c}, \quad k'' = \frac{\omega n''}{c} \quad (1.73.)$$

Tālāk apskatām elektromagnētiskā viļņa elektriskās komponentes formulu (1.13.) un pārveidojam to t. s. kompleksajā formā

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - kx + \alpha)] \quad (1.74.)$$



1-20. att. Absorbīciju raksturojošā koeficienta atkarība no starojuma viļņa garuma.

Ievietojot kompleksā viļņu skaitļa vērtību (1.72.) viļņa vienādojumā (1.74.), iegūstam

$$\begin{aligned} E &= E_0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{\omega}{c} (n' - i n'') x + \alpha \right] \right\} = E_0 \exp \left[i \left(\omega t - \frac{\omega n'}{c} x + \alpha \right) - \frac{\omega n''}{c} x \right] = \\ &= E_0 \exp \left(- \frac{\omega n''}{c} x \right) \exp \left[i \left(\omega t - \frac{\omega n'}{c} x \right) + \alpha \right] = E_0 \exp(-k'' x) \exp[i(\omega t - k' x) + \alpha] = \\ &= E'_0 \exp[i(\omega t - k' x) + \alpha] \end{aligned} \quad (1.75.)$$

t. i., rimstošas svārstības ar eksponenciāli dilstošu amplitūdu

$$E'_0 = E_0 \exp(-k'' x) \quad (1.76.)$$

Pointinga vektora moduļa vidējā vērtība (1.18.) ir proporcionāla elektriskās intensitātes amplitūdas kvadrātam $W'_0 \sim (E'_0)^2$, tāpēc viļņa (1.75.) pārnestās enerģijas plūsmas vidējais blīvums samazinās kā

$$W'_0 = W_0 \exp(-2k'' x) \quad (1.77.)$$

kur W_0 – sākotnējā enerģijas plūsmas blīvuma vērtība. Tas nozīmē, ka elektromagnētiskā lauka pārnestā enerģija, ko raksturo Pointinga vektora moduļa vidējā vērtība, eksponenciāli samazinās, laukam iespiežoties vidē. Citiem vārdiem notiek absorbcija – elektromagnētiskā viļņa enerģijas transformācija citos enerģijas veidos (siltuma enerģijā, atomu un molekulu ierosmes enerģijā u. c.), pašam vilnim enerģiju zaudējot. Šo procesu atbilstoši (1.77.) nosaka viļņu skaitļa imaginārā daļa $k'' = \omega n''/c$, kas ir proporcionāla n'' , t. i., laušanas koeficienta imaginārajai daļai. Tādējādi laušanas koeficients n ir tas, kas nosaka ne tikai refleksiju un refrakciju, bet no kura pilnā mērā ir atkarīga arī absorbcija.

No tālīzpētes viedokļa absorbcija ir parādība, kas lielā mērā nosaka pētāmās virsmas un tās objektu krāsu, jo no sākotnējā apstarojuma spektra absorbcijas rezultātā tiek izņemti atsevišķi fragmenti. Laušanas koeficienta imaginārā daļa n'' ir ļoti atkarīga no krītošā elektromagnētiskā starojuma frekvences vai viļņa garuma λ (skat. 1-20. att.), jo absorbcija ir saistīta ar rezonanses procesiem absorbējošajā vidē. Tās ir gan atomu, gan molekulu, gan arī kristālisko režģu rezonanses frekvences, kuru tuvumā parādās izteiktas absorbcijas līnijas vai joslas.

1.3.4. Frenela formulas

Dekarta-Snelliusa likums (1.64.) apraksta refleksijas un refrakcijas ģeometrisko ainu, bet neietver informāciju par to, kā sadalās enerģijas plūsmas atstarotajā un lauztajā starā, kā arī neraksturo polarizācijas izmaiņas minētajos staros. Atbildes uz šiem jautājumiem iespējams iegūt, analizējot formulas, kuru izvedumu pirmais publicēja franču fiziķis Augusts Žans Frenels (1788–1827) un kuras nosauktas viņa vārdā. A. Frenels pētīja polarizētas gaismas refleksiju un refrakciju, kuras atstarošanās un lūšanas ģeometriskās likumsakarības atbilst jau pieminētajam Dekarta-Snelliusa likumam. Taču A. Frenelu interesēja, kā mainās lauztā un atstarotā stara elektriskās komponentes amplitūda. 1-21. att. redzama refleksija un refrakcija lineāri polarizētiem stariem (elektromagnētiskajiem viļņiem) divos speciālajos gadījumos: (a) kad krītošā stara elektriskās intensitātes vektors svārstās perpendikulāri zīmējuma plaknei (t. s. polarizācija krišanas plaknē) un (b) kad krītošā stara intensitātes

vektors svārstās zīmējuma plaknē (t. s. polarizācija perpendikulāri krišanas plaknei).

A. Frenels pierādīja, ka, ja refleksija un refrakcija notiek no gludas dielektriskas virsmas, tad atstaroto un laužo staru elektriskās intensitātes vektoru amplitūdas (attiecīgi E'_{s1} , E'_{p1} un E_{s2} , E_{p2}) ir atkarīgas ne tikai no krītošo staru amplitūdām E_{s1} un E_{s2} , bet arī krišanas β_1 un lūšanas β_2 leņķiem, vai saskaņā ar Dekarta-Snelliusa likumu – no laušanas koeficientiem n_1 un n_2 . Matemātiskās formulas, kas raksturo šīs sakarības, sauc par Frenela formulām (vai Frenela likumu)

$$\frac{E'_{s1}}{E_{s1}} = \frac{-\sin(\beta_1 - \beta_2)}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \quad (1.78.)$$

$$\frac{E_{s2}}{E_{s1}} = \frac{2 \sin \beta_2 \cos \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \quad (1.79.)$$

$$\frac{E'_{p1}}{E_{p1}} = \frac{\tan(\beta_1 - \beta_2)}{\tan(\beta_1 + \beta_2)} \quad (1.80.)$$

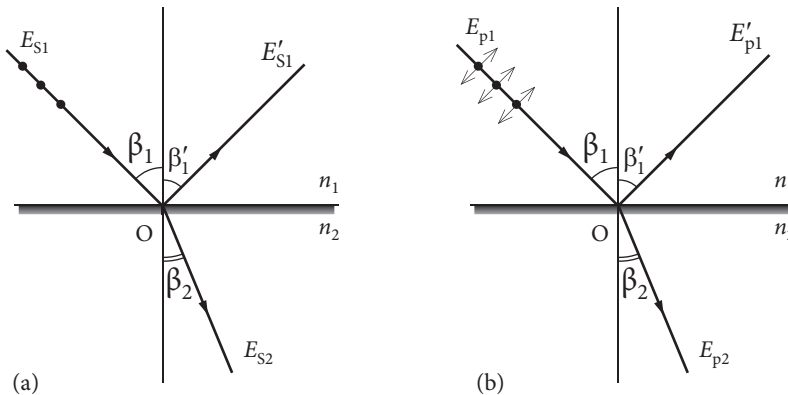
$$\frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{2 \sin \beta_2 \cos \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2) \cos(\beta_1 - \beta_2)} \quad (1.81.)$$

kurās leņķus β_1 un β_2 saista sakarība (1.64.), bet gan laužtais, gan atstarotais stars ir lineāri polarizēti līdzīgi krītošajam staram. Ja Frenela formulas attēlo grafiski kā krišanas leņķa β_1 funkcijas, tad iegūst 1-22. att. redzamo ainu, kurā ciparu indeksi norāda atbilstošo Frenela formulu.

No trešās Frenela formulas (1.80.) izriet, ka, ja

$$\tan(\beta_1 + \beta_2) = \infty$$

t. i., $\beta_1 + \beta_2 = \pi/2$ (jeb laužtais un atstarotais stars ir savstarpēji perpendikulāri), tad $E'_{p1} = 0$. Skotu fiziķis Deivids Brūsters (1781–1868) vērsa uzmanību uz to, ka, ja faktiskais krītošais stars ietver abas komponentes E_{s1} un E_{p1} , t. i., nav polarizēts, tad atstarotais stars ietvers tikai E'_{s1} komponenti, t. i., būs lineāri polarizēts krišanas plaknē. Tas notiks pie vienas noteiktas $\beta_1 = \beta_B$ vērtības, kurai



1-21. att. Lineāri polarizētu staru refleksija un refrakcija.

$$n_1 \sin \beta_B = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta_B \right)$$

jeb

$$\tan \beta_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1.82.)$$

Leņķi β_B , ko nosaka (1.82.), sauc par Brūstera leņķi²². Negatīvās vērtības 1-22. att. grafikos atbilst elektriskās intensitātes svārstību fāzes izmaiņām (radiānos) par lielumu π .

Turpinājumā novērtēsim enerģijas plūsmas sadalījumu atstarotajā un lauztajā starā. Enerģijas plūsma Φ ir proporcionāla starojuma elektriskās intensitātes amplitūdas kvadrātam E^2 , starojuma izplatīšanās grupas ātrumam u_1 šajā vidē un izvēlētajam plūsmas šķēsgriezuma laukumam S . Atstarotajam vilnim u_1 un S ir tādi paši kā krītošajam vilnim, tādēļ atbilstošos refleksijas koeficientus var aprēķināt šādi:

$$k_{s1} = \frac{\Phi'_{s1}}{\Phi_{s1}} = \left(\frac{E'_{s1}}{E_{s1}} \right)^2 = \frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2)} \quad (1.83.)$$

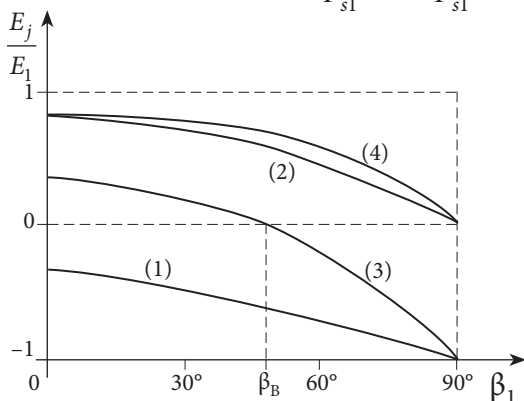
$$k_{p1} = \frac{\Phi'_{p1}}{\Phi_{p1}} = \left(\frac{E'_{p1}}{E_{p1}} \right)^2 = \frac{\tan^2(\beta_1 - \beta_2)}{\tan^2(\beta_1 + \beta_2)} \quad (1.84.)$$

Šīs formulas ietver nenoteiktību gadījumos, kad $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 0$, taču tā ir viegli novēršama šādā veidā:

$$\frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2)} \cong \frac{\tan^2(\beta_1 - \beta_2)}{\tan^2(\beta_1 + \beta_2)} \cong \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{(\beta_1 + \beta_2)^2} = \frac{\left(\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1 \right)^2}{\left(\frac{\beta_1}{\beta_2} + 1 \right)^2} \cong \frac{(n_{21} - 1)^2}{(n_{21} + 1)^2}$$

Lauztajam vilnim, lai noteiktu atbilstošos refrakcijas koeficientus r_{s2} un r_{p2} , šādi rīkoties nevar, jo otrajā vidē ir cits viļņu izplatīšanās grupas ātrums u_2 . Taču no enerģijas nezūdamības likuma izriet, ka

$$r_{s2} = \frac{\Phi_{s2}}{\Phi_{s1}} = \frac{\Phi_{s1} - \Phi'_{s1}}{\Phi_{s1}} = 1 - \frac{\Phi'_{s1}}{\Phi_{s1}} = 1 - k_{s1} \quad (1.85.)$$



1-22. att. Frenela formulu grafiki.

22 Nejaukt ar citu Brūstera leņķi, kas raksturo pilnīgās iekšējās atstarošanās nosacījumu.

$$r_{p2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{p1}} = \frac{\Phi_{p1} - \Phi'_{p1}}{\Phi_{p1}} = 1 - \frac{\Phi'_{p1}}{\Phi_{p1}} = 1 - k_{p1} \quad (1.86.)$$

Refleksijas un refrakcijas koeficientu atkarība no elektromagnētiskā starojuma viļņa garuma λ izpaužas caur lūšanas leņķa β_2 atkarību (1.64.) no relatīvā laušanas koeficienta $n_{21}(\lambda)$, kas savukārt dispersijas dēļ ir atkarīgs no λ .

Tādējādi refleksijas koeficienti k_{s1} un k_{p1} , kas nosaka enerģijas plūsmu atstarotajā viļnī, dielektriskas atstarojošas virsmas gadījumā ir šādas krišanas (apstarošanas) leņķa β_1 funkcijas (1-23. att.), kur β_B – Brūstera leņķis, k_{s1} atbilst lineāri polarizētam starojumam krišanas plaknē, savukārt k_{p1} – lineāri polarizētam starojumam perpendikulāri krišanas plaknei. Nepolarizēta starojuma gadījumā var uzskatīt, ka puse enerģijas plūsmas ir ar vienu, savukārt puse ar otra veida polarizāciju, un ieviest rezultējošo refleksijas koeficientu formā

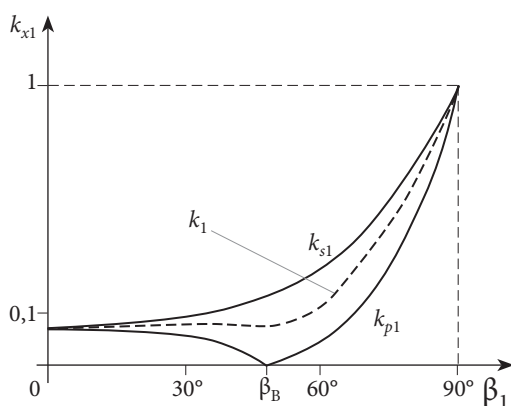
$$k_1 = \frac{\Phi'_1}{\Phi_1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2)} + \frac{\tan^2(\beta_1 - \beta_2)}{\tan^2(\beta_1 + \beta_2)} \right] \quad (1.87.)$$

kā redzams 1-23. att.

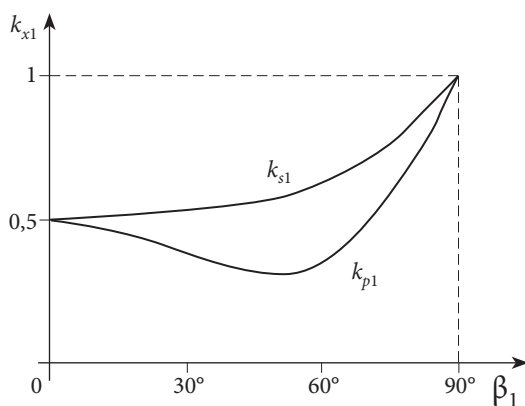
Ja refleksija notiek no gludas metāliskas virsmas, tad aina nedaudz atšķiras (1-24. att.).

Rūpīgāka analīze rāda, ka šajā gadījumā lauztā stara praktiski nav un refleksija ir liela arī vertikāliem stariem, t. i., pie $\beta_1 = 0$. Refleksijas koeficients k_{p1} nekur nav vienāds ar nulli, bet Brūstera leņķa tuvumā tam novērojams minimums. Turklāt “s” un “p” staros veidojas fāžu nobīde, tādēļ lineāri polarizēts starojums (gaisma), atstarojoties no metāliskas virsmas, kļūst eliptiski polarizēts.

Apkopojot sacīto, varam secināt, ka, elektromagnētiskajam starojumam mijiedarbojoties ar virsmu, tās faktūras efektu dēļ notiek: (a) specifiskas reflektētā starojuma²³ enerģijas plūsmas izmaiņas; (b) absorbcijas²⁴ dēļ mainās reflektētā starojuma spektrālais sastāvs (krāsa) un (c) mainās polarizācijas parametri. Visi šie ar tālīzpētes tehnoloģijām novērojami efekti, kuru fizikālais pamats ir dispersijas, refleksijas, refrakcijas un polarizācijas pa-



1-23. att. Refleksijas koeficientu atkarība no apstarošanas leņķa.



1-24. att. Refleksijas koeficientu grafiki metāliskas virsmas gadījumā.

²³ Gludas virsmas gadījumā tā būs spoguļrefleksija.

²⁴ Daudzos reālos gadījumos arī lauztais starojums tiek daļēji vai pilnīgi absorbēts.

rādības, ir atkarīgi no viena fizikālā parametra – vides laušanas koeficienta n_λ (vai saskaņā ar (1.66.) – vides dielektriskās caurlaidības ε_λ).

1.3.5. Laušanas koeficienti dažādām vidēm

Ņemot vērā vides laušanas koeficienta n_λ lielo nozīmi, analizējot elektromagnētiskā starojuma mijiedarbības efektus ar planētas (Zemes) virsmu un atmosfēru, iepazīsimies ar tā matemātiskajiem modeļiem dažādās vidēs. Detalizēti ar šo jautājumu var iepazīties dažādos fizikasursos [1, 2], šeit aplūkosim tikai galvenos rezultātus.

Gāzēm tuvināti [3]

$$\varepsilon_\lambda \cong 1 + \frac{Np_\lambda}{\varepsilon_0} \quad (1.88.)$$

kur N – gāzes molekulu skaits tilpuma vienībā, p_λ – koeficients, kas raksturo gāzes molekulu elektrisko polarizējamību. Šajā gadījumā ε_λ ir reāls un pozitīvs, tāpēc vairumam viļņu garuma λ vērtību absorbcija nav novērojama un gāze ir caurspīdīga. Izņēmumi ir rezonanses frekvences (skat. 1-20. att.), kuru apkārtņē parādās izteiktas absorbcijas līnijas un joslas. Saskaņā ar (1.66.) un ievērojot, ka

$$\frac{Np_\lambda}{\varepsilon_0} \ll 1$$

kā arī veicot izvīrījumu Teilora rindā, varam iegūt tuvinātu formulu

$$n_\lambda \cong \sqrt{\varepsilon_\lambda} \cong \sqrt{1 + \frac{Np_\lambda}{\varepsilon_0}} \cong 1 + \frac{Np_\lambda}{2\varepsilon_0} \quad (1.89.)$$

Laušanas koeficienta n_λ atkarība no elektromagnētiskā starojuma viļņa garuma λ šeit izpaužas caur polarizējamības koeficienta p_λ atkarību no λ . Koeficienta p_λ vērtības gan optiskajā, gan mikroviļņu diapazonā ir visai atšķirīgas no līdzīgām elektrisko polarizējamību raksturojošu lielumu vērtībām elektrostatisajā laukā. Taču attiecībai p_λ/ε_0 piemīt tilpuma dimensionalitāte, un tā vairumā gadījumu (bet ne pie visām frekvencēm) ir tuva gāzes molekulas reālajam tilpumam. Šīs attiecības izmaiņas un atkarību no elektromagnētiskā starojuma frekvences tuvināti raksturo 1-1. tabulā apkopotās vērtības.

Dielektrisku materiālu (cietu vai šķidru) molekulas parasti jau ir polāras, un tām piemīt rezonanses īpašības, ko pieņemts raksturot ar specifisku laika konstanti τ , ko sauc par relaksācijas laiku. Dielektrisku materiālu relatīvā dielektriskā caurlaidība ir komplekss lielums (1.69.), tā reālo un imagināro daļu apraksta formulas

1-1. tab. Polarizējamības koeficienta p_λ/ε_0 vērtības dažādām gāzēm.

Gāze	Redzamā gaisma	Mikroviļņi (1 MHz)	Reizinātājs
Gaiss	21,7	21,4	$\cdot 10^{-30} \text{ m}^3$
Ogļskābā gāze	33,6	36,8	$\cdot 10^{-30} \text{ m}^3$
Ūdeņradis	9,8	10,1	$\cdot 10^{-30} \text{ m}^3$
Skābeklis	20,2	19,8	$\cdot 10^{-30} \text{ m}^3$
Ūdens tvaiks	18,9	368	$\cdot 10^{-30} \text{ m}^3$

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_p}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.90.)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \tau \varepsilon_p}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.91.)$$

Šeit ε_{∞} ir dielektriskās caurlaidības vērtība pie t. s. bezgalīgi lielās frekvences, proti, ja $f \gg 1/\tau$, kur τ – jau pieminētais relaksācijas laiks, lielumu ε_p sauc par dielektriskās konstantes polarizēto komponenti.

Ūdens (H_2O) kompleksās dielektriskās caurlaidības komponentu atkarība no krītošā elektromagnētiskā starojuma frekvences mikroviļņu diapazonā parādīta 1-25. att.

Redzams, ka relatīvās dielektriskās caurlaidības komponentes un no tām atkarīgais kompleksais ūdens laušanas koeficients n_{λ} , kā arī no tā atkarīgās refleksijas, refrakcijas, absorbcijas, dispersijas un polarizācijas parādības ir atkarīgas gan no krītošā elektromagnētiskā starojuma frekvences, gan dažādu piemaisījumu klātbūtnes.

Metālu un plazmas (par kādu var uzskatīt arī jonosfēru) elektriskās īpašības lielā mērā nosaka brīvo (vadāmības) elektronu klātbūtne tajos. Arī šajā gadījumā relatīvā dielektriskā caurlaidība ir komplekss lielums (1.69.), tā reālo un imagināro daļu apraksta tuvinātas formulas

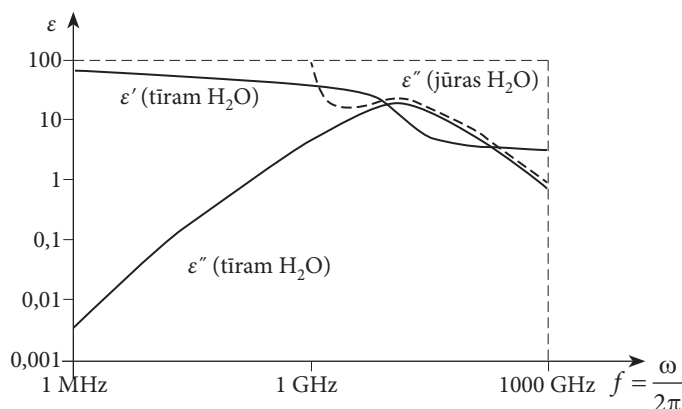
$$\varepsilon' = 1 - \frac{\sigma \tau}{\varepsilon_0 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (1.92.)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (1.93.)$$

kur σ – vides īpatnējā vadītspēja,

$$\tau = \frac{m_e \sigma}{N_e q_e^2}$$

savukārt m_e un q_e – elektrona masa un lādiņš, N_e – vadāmības elektronu skaits tilpuma vienībā. Vienādojumus (1.92.) un (1.93.) var vienkāršot divos robežgadījumos – ja $\omega \gg 1/\tau$ (optiskais diapazons) un ja $\omega \ll 1/\tau$ (mikroviļņu diapazons), jo tipiskos gadījumos $\tau \cong (10^{-14} - 10^{-15})$ sec.



1-25. att. Ūdens dielektriskās caurlaidības komponentes [3].

Zemajām frekvencēm (mikroviļņu diapazonā), kad $\omega\tau \ll 1$,

$$\varepsilon' \cong 1 - \frac{\sigma\tau}{\varepsilon_0}, \quad \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}$$

Tācu, ņemot vērā τ mazo vērtību $\varepsilon' \ll \varepsilon''$ un tuvināti

$$\varepsilon_\lambda \cong -i\varepsilon'' \cong -\frac{i\sigma}{\varepsilon_0\omega}$$

no kurienes, ievērojot (1.71.), vides laušanas koeficienta reālā n' un imaginārā n'' daļa

$$n' = n'' = \sqrt{\frac{\sigma}{2\varepsilon_0\omega}} \quad (1.94.)$$

Tātad šajā gadījumā būs novērojama absorbcija, un varam novērtēt arī t. s. absorbcijas dziļumu x_ω , kādā, iespiežoties vidē, elektromagnētiskā viļņa enerģijas plūsmas blīvums samazinās $e \approx 2,718$ reizes. No (1.73.) un (1.77.) izriet, ka, lai tas notiktu, ir jābūt spēkā nosacījumam

$$2k''x_\omega = 2\frac{\omega n''}{c}x_\omega = 1$$

Ievietojot šeit n'' vērtību no (1.94.) un izsakot x_ω , iegūstam

$$x_\omega = c\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{2\omega\sigma}}$$

Ievietojot pēdējā izteiksmē parametru skaitliskās vērtības tēraudam pie $f=5$ GHz ($\omega=3,14 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $\sigma=10^6 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$), varam aprēķināt, ka absorbcijas dziļums $x_\omega=3 \text{ } \mu\text{m}$. Tas nozīmē, ka radiofrekvenču viļņi un mikroviļņi metālos tiek stipri absorbēti, un šo efektu izmanto elektronisko shēmu un sistēmu ekranēšanai.

Augstajām frekvencēm (optiskajā diapazonā), kad $\omega\tau \gg 1$, no (1.92.) un (1.93.) izriet

$$\begin{aligned} \varepsilon' &\cong 1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega^2\tau} = 1 - \frac{N_e q_e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} \\ \varepsilon'' &\cong \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega^3\tau^2} \cong 0 \end{aligned} \quad (1.95.)$$

un varam secināt, ka pie pietiekami augstām frekvencēm (sākot ar rentgena un gamma starojumu) metāli kļūst caurspīdīgi, jo absorbcija tajos izzūd.

Kā jau minēts, metāliem atbilstošās formulas var izmantot arī plazmas (piemēram, jonosfēras) gadījumos. No sakarībām (1.95.) izriet, ka optiskajā diapazonā plazmas dielektrisko caurlaidību nosaka galvenokārt komponente ε' . Atceroties (1.66.), varam secināt, ka plazmai

$$n_\lambda \cong \sqrt{\varepsilon'} = \sqrt{1 - \frac{N_e q_e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (1.96.)$$

kur ieviests lielums ω_p

$$\omega_p^2 = \frac{N_e q_e^2}{\varepsilon_0 m_e} \quad (1.97.)$$

ko sauc par **plazmas frekvenci**. No formulas (1.96.) tiešā veidā izriet, ka, ja $\omega > \omega_p$, tad plaz-

ma ir caurspīdīga, jo tās laušanas koeficients n_λ ir reāls, bet, ja $\omega < \omega_p$, tad plazma kļūst ne-caurspīdīga, jo tās laušanas koeficients n_λ ir kļūvis imaginārs. Tādējādi plazmas absorbcija strauji parādās, elektromagnētiskā starojuma frekvencei kļūstot mazākai par konkrētās vides plazmas frekvenci, kas jonosfēras gadījumā ir atkarīga no grūti prognozējamā un strauji mainīgā elektronu blīvuma N_e (t. i., brīvo elektronu skaita jonosfēras tilpuma vienībā).

1.3.6. Doplera efekts

Elektromagnētiskā starojuma mijiedarbība ar planētas (Zemes) virsmu izpaužas vēl vienā tālīzpētei svarīgā veidā (mikroviļņu tehnoloģiju izmantošanas gadījumos) (skat. 1-26. att.).

Apskatām satelītu S, kas kustas telpā ar ātrumu $\vec{v}_S$ un sūta radara signālu ar frekvenci f_0 Zemes punkta A virzienā, kas arī nav nekustīgs, bet pārvietojas attiecībā pret izvēlēto atskaites sistēmu ar ātrumu $\vec{v}_A$. Satelīta S un punkta A relatīvais ātrums ir vienāds ar

$$\vec{V} = \vec{v}_A - \vec{v}_S$$

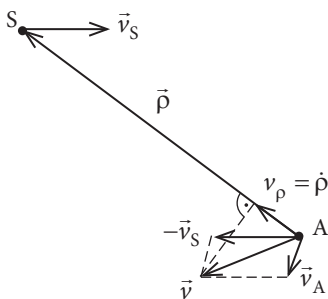
tā radiālā komponente (projekcija uz satelīta topocentriskā radiusvektora $\vec{\rho}$) ir $V_\rho = \dot{\rho}$. Šādā gadījumā no fizikas [1, 2] zināms, ka punktā A pienāks elektromagnētiskais vilnis ar frekvenci

$$f_A \cong f_0 \left(1 + \frac{\dot{\rho}}{c} \right)$$

kas atstarosies un nonāks atpakaļ satelītā ar vēlreiz izmainītu frekvenci (šeit c – gaismas ātrums)

$$f_S \cong f_A \left(1 + \frac{\dot{\rho}}{c} \right) = f_0 \left(1 + \frac{\dot{\rho}}{c} \right)^2 \cong f_0 \left(1 + \frac{2\dot{\rho}}{c} \right) \quad (1.98.)$$

Parādību, ka gadījumos, kad satelīta S un ar tā radaru novērotā Zemes punkta A relatīvais radiālais ātrums nav vienāds ar nulli, atstarotā elektromagnētiskā viļņa frekvence mainās atbilstoši formulai (1.98.), sauc par **Doplera efektu**, un to izmanto sintezētās apertūras radaros (SAR tehnoloģijas).



1-26. att. Satelīta S relatīvā kustība attiecībā pret novērojamo punktu A.

1.4. Difūzā refleksija (5. lekcija)

1.4.1. Kopsavilkums

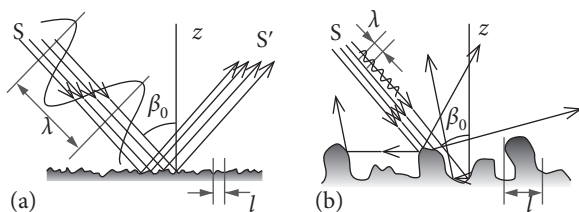
Starojuma mijiedarbību ar planētas (Zemes) virsmu būtiski ietekmē arī virsmas tekstūra (tās ģeometriskā īpašība un parametru kopums). Tādēļ ir lietderīgi formalizēt tādus jēdzienus kā virsmas gludums un raupjums, kā arī izprast to ietekmi uz refleksijas īpašībām un tās parametriem. Lai to paveiktu, analizēsim bidirekcionālo refleksijas sadalījuma funkciju un no tās atvasinātos direkcionālā albedo un difūzā albedo jēdzienus. Noslēgumā apskatīsim dažas difūzās izkliedes modelēšanas pamatidejas, ņemot vērā šīs problēmas plašumu un komplicētību, kā arī iepazīsimies ar radara vienādojumiem.

1.4.2. Releja raupjuma kritēriji

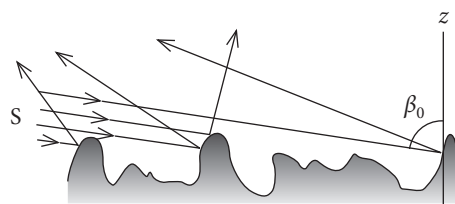
Līdz šim analizējām elektromagnētiskā starojuma mijiedarbību ar gludu virsmu, kad tā izpaudās kā spoguļrefleksija, un tās īpašības noteica virsmas faktūra – šo virsmu veidojošo materiālu fizikālās īpašības (relatīvā dielektriskā caurlaidība ϵ_χ un vides laušanas koeficients n_χ). Taču ne mazākā mērā starojuma mijiedarbību ar virsmu nosaka arī tās tekstūra, proti, virsmas ģeometriskās īpašības un to parametri.

No fizikas labi zināms, ka spoguļrefleksija izpaužas tad, ja krītošā starojuma viļņa garums λ ir daudz lielāks par reflektējošās virsmas tipisku neregularitāti l (sauksim to par tekstūras “graudu”), t. i., ja $\lambda \gg l$ (skat. 1-27. (a) att.).

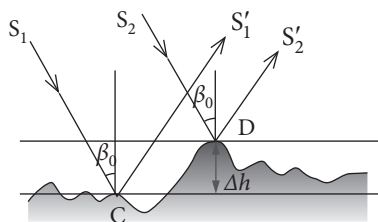
Pretējā gadījumā, kad $\lambda \ll l$, refleksijas kvalitatīvā aina būtiski mainās (1-27. (b) att.). Lai arī katrs individuālais stars veic spoguļatstarošanu (reizēm pat vairākkārtēju) no dažādi orientētiem virsmas punktiem, rezultējošais starojums tiek izkliedēts ļoti dažādos virzie-



1-27. att. Refleksija no gludas (a) un raupjas (b) virsmas.



1-28. att. Slīpu staru refleksija no raupjas virsmas.



1-29. att. Divu staru refleksija no raupjas virsmas.

nos. Šo refleksijas veidu sauc par difūzo refleksiju jeb difūzo izkliedi²⁵. Īstenībā situācija ir vēl komplicētāka, jo difūzā izkliede ir atkarīga arī no starojuma krišanas leņķa β_0 , kā tas redzams 1-28. att.

Slīpiem stariem ir mijiedarbība tikai ar tekstūras virsējo slāni (dziļākajos slāņos tie praktiski neiespīd), tādēļ šādiem stariem virsma “šķiet” gludāka un difūzās izkļiedes aina būtiski mainās pat pie tām pašām λ un l vērtībām. Lai to izprastu labāk un formalizētu, apskatām divu staru S_1 un S_2 refleksiju no raupjas virsmas (skat. 1-29. att.)

Noietā ceļa ģeometrisko starpību stariem S_1 un S_2 , kas atstarojas no raupjas virsmas punktos C un D, kuru augstuma starpība ir Δh , var aprēķināt²⁶ kā

$$\Delta r = 2\Delta h \cos \beta_0$$

Pareizinot šo Δr ar kritošā elektromagnētiskā starojuma viļņa skaitli $k = 2\pi/\lambda$, iegūstam atstaroto staru fāžu nobīdi S'_1 un S'_2

$$\Delta \alpha = \frac{4\pi \Delta h \cos \beta_0}{\lambda} \quad (1.99.)$$

Sakarību (1.99.) izmanto, lai kvalitatīvi raksturotu virsmas gluduma (raupjuma) pakāpi, proti, ja $\Delta \alpha < \pi/2$, t. i.,

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \beta_0} \quad (1.100.)$$

tad virsma tiek saukta par **gludu**, bet, ja $\Delta \alpha < 4\pi/25$, t. i.,

$$\Delta h < \frac{\lambda}{25 \cos \beta_0} \quad (1.101.)$$

virsma tiek saukta par **efektīvi gludu**. Nosacījumus (1.100.) un (1.101.) sauc par **Releja raupjuma kritērijiem**. Tie ir pusempīriski kritēriji, kas tuvināti raksturo ar elektromagnētisko starojumu mijiedarbojošās virsmas gluduma (raupjuma) pakāpi, balstoties uz tekstūras “grauda” vertikālo komponenti Δh . Ļoti slīpiem stariem, kuriem $\cos \beta_0 \rightarrow 0$, pat samērā raupja virsma (tekstūras grauda nozīmē) var izrādīt spoguļrefleksijas īpašības, kā tas ir gadījumos ar reflektējošām (it kā slapjuma) mirāžām uz autoceļiem²⁷.

Tomēr difūzās refleksijas izpausmes patiesībā ir vēl daudzveidīgākas, jo planētas (Zemes) virsmas tekstūra (ar dažiem izņēmumiem) nav regulāra, t. i., tai piemīt nevis viens tipisks tekstūras “grauds”, bet daudzi un dažādi. Šādu dažādu “graudu” klātesamību var raksturot, izmantojot Furjē analīzi vai arī fraktālo formālismu, jo reālā planētas virsma samērā labi ir reprezentējama ar matemātiskajām struktūrām, ko sauc par stohastiskajiem fraktāļiem.

1.4.3. Bidirekcionālā refleksijas sadalījuma funkcija

Difūzās refleksijas gadījumā atstarotās enerģijas plūsmas sadalījumu pustelpā raksturo ar bidirekcionālās refleksijas sadalījuma funkciju²⁸. Lai to definētu, apskatām 1-30. att.,

²⁵ Angļu val. – *scattering*.

²⁶ Šis rezultāts nav acīmredzams, bet to nav grūti pierādīt.

²⁷ Šo mirāžu skaidrojums ir komplicētāks, bet, nenoliedzami, sakarība (1.99.) tajā ir nozīmīga.

²⁸ Angļu val. – *Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)*.

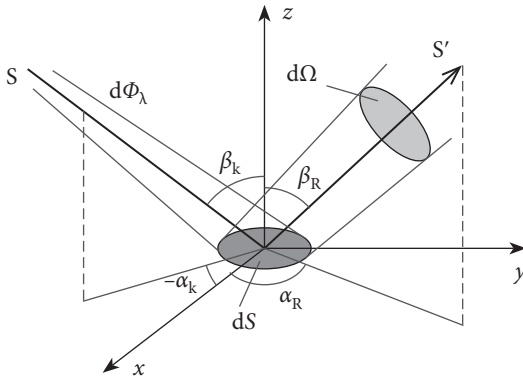
kurā no virziena S (ar sfēriskajām koordinātām α_K, β_K) krīt enerģijas plūsma $d\Phi_\lambda$ uz diferenciālu laukumiņu dS , kas atrodas koordinātu sistēmas (x, y, z) sākuma punktā.

Tādējādi šī laukumiņa apstarojums (1.43.) ir vienāds ar $A_\lambda(\alpha_K, \beta_K) = d\Phi_\lambda/dS$. Difūzās izkliedes gadījumā reflektētais starojums izplatīsies visos iespējamajos augšējās puslodes virzienos, tostarp virzienā S' (ar sfēriskajām koordinātām α_R, β_R). Ja ar $B_\lambda(\alpha_R, \beta_R)$ apzīmējam laukumiņa dS spožumu (1.50.) virzienā S' un telpiskajā leņķī $d\Omega$, tad par bidirekcionālās refleksijas sadalījuma funkciju sauc minēto četru leņķisko argumentu funkciju

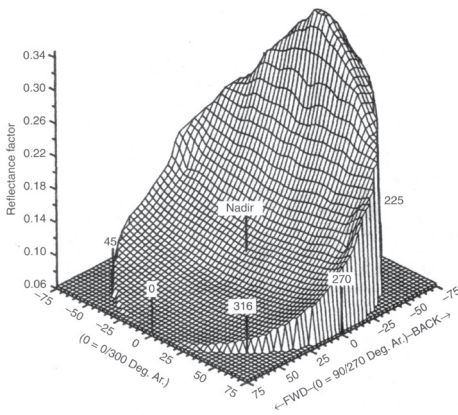
$$\rho_\lambda(\alpha_K, \beta_K, \alpha_R, \beta_R) = \frac{B_\lambda(\alpha_R, \beta_R)}{A_\lambda(\alpha_K, \beta_K)} \quad (1.102.)$$

ar dimensionalitāti [srad^{-1}]. Šī funkcija vispārējā veidā raksturo elektromagnētiskā starojuma enerģijas plūsmas pārnesei no virziena $S(\alpha_K, \beta_K)$ uz virzienu $S'(\alpha_R, \beta_R)$. Tomēr jāņem vērā, ka Zemes virsmas gadījumā laukumiņa dS apstarojumu noteiks ne tikai tiešā enerģijas plūsma no Saules, bet arī izkliedētā enerģijas plūsma no debess fona. Taču arī izkliedētā enerģijas plūsma ir atkarīga no Saules stāvokļa pie debesīm, t. i., virziena S ar koordinātām (α_K, β_K) , un tādējādi funkcijas (1.102.) definīcija nav jāprecizē.

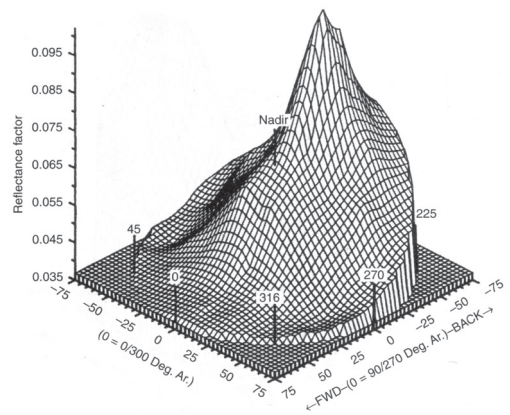
Optiskajā diapazonā bidirekcionālās refleksijas sadalījuma funkcija ($BRDF$) ir visai komplicēta (skat. 1-31. att. un 1-32. att.), un to iespējams noteikt tikai eksperimentāli. Taču tā ietver ļoti daudz tālīzpētei noderīgas informācijas.



1-30. att. Starojuma pārnesei virzieni un raksturojums.



1-31. att. $BRDF$ funkcija uzartam laukam ($\lambda = 662 \text{ nm}$, $\beta_K = 65^\circ$) [14].



1-31. att. $BRDF$ funkcija ozolu birzī (λ = 662 nm, β_K = 31°) [14].

1.4.4. Direkcionālais un difūzais albedo

Laukumiņa dS pilnais refleksijas koeficients saskaņā ar (1.45.) ir izsakāms formā (skat. arī (1.47.))

$$k_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K) = \frac{R_{\lambda}}{A_{\lambda}} = \frac{1}{A_{\lambda}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} B_{\lambda}(\alpha_R, \beta_R) \cos \beta_R \sin \beta_R d\beta_R d\alpha_R \quad (1.103.)$$

kas atkarīga tikai no virziena S , t. i., krišanas leņķiem (α_K, β_K) , bet, ņemot vērā to, ka no (1.102.) izriet

$$A_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K) = \frac{B_{\lambda}(\alpha_R, \beta_R)}{\varrho(\alpha_K, \beta_K, \alpha_R, \beta_R)} \neq f(\alpha_R, \beta_R)$$

tad reizinātāju $1/A_{\lambda}$ var ienest (1.103.) zem integrāļa zīmes un tādējādi

$$k_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varrho_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K, \alpha_R, \beta_R) \cos \beta_R \sin \beta_R d\beta_R d\alpha_R \quad (1.104.)$$

Pilno refleksijas koeficientu formā (1.104.) sauc arī par direkcionālo albedo. Savukārt par difūzo albedo sauc direkcionālā albedo $k_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K)$ vidējo vērtību augšējā puslīdī, proti,

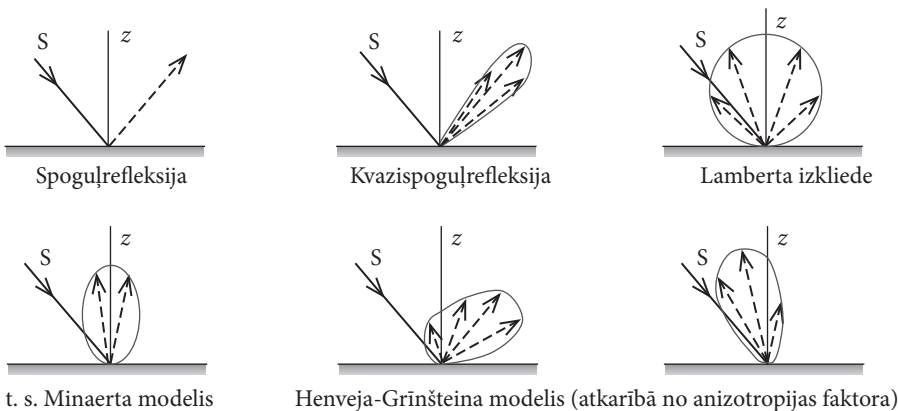
$$\bar{k}_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} k_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K) \cos \beta_K \sin \beta_K d\beta_K d\alpha_K \quad (1.105.)$$

un tas, līdzīgi direkcionālajam albedo, ir bezdimensionāls lielums. Normēšanas koeficientu $1/\pi$ izteiksmē (1.105.) piemēro tādēļ, ka, ja $k_{\lambda} = \text{const}$ un to var iznest pirms integrāļu zīmēm, tad nav grūti pārlicināties, ka

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \beta_K \sin \beta_K d\beta_K d\alpha_K = \pi$$

Tādējādi varam secināt, ka difūzo refleksiju vispilnīgāk raksturo bidirekcionālās refleksijas sadalījuma funkcija $\rho_{\lambda}(\alpha_K, \beta_K, \alpha_R, \beta_R)$, ko vienreiz integrējot pa augšējo puslīdī (pēc argumentiem α_R un β_R), iegūst direkcionālo albedo, savukārt divreiz integrējot pa augšējo puslīdī (pēc visiem argumentiem), iegūst difūzo albedo.

Ja diferenciālā laukumiņa dS vietā tiek apskatīta kāda galīga izmēru virsma, tad difūzā



1-33. att. Izklīdes diagrammas dažādiem modeļiem.

albedo vidējo vērtību šai virsmai sauc par tās albedo. Planētu fizikā nereti lieto arī jēdzienu planētas albedo, kas ir planētas virsmas albedo vidējā vērtība, kura vidējota pa Saules spektra diapazonu, t. i., pa dažādām starojuma viļņa garumu λ vērtībām.

1.4.5. BRDF funkcijas modelēšana

Precīza bidirekcionālās refleksijas sadalījuma funkcijas (*BRDF*) modelēšana optiskajam diapazonam ir ārkārtīgi komplicēta (un mūsdienās praktiski neiespējama). Tādēļ nereti lieto vienkāršotus modeļus, kas tomēr ir visai noderīgi tālīzpētes datu interpretācijai.

Spoguļrefleksijas gadījumos, kādi iespējami, Saules starojumam atstarojoties no ūdens, ledāju vai sālsezeru virsmām, kā arī nedaudzdos citos gadījumos, *BRDF* funkciju var modelēt ar delta funkcijām [8], jo

$$\rho_{\lambda} \sim \delta(\beta_K - \beta_R) \delta(\alpha_K - \alpha_R + \pi)$$

Lamberta izkliedes gadījumos savukārt *BRDF* funkcija ir proporcionāla difūzajam albedo un laukumiņa redzamajam lielumam, t. i.,

$$\rho_{\lambda} \sim \bar{k}_{\lambda} \cos \beta_R$$

Lai arī šie ir ļoti tuvināti modeļi, to lietošanas areāls nav nemaz tik mazs. Tomēr ir izveidoti arī komplicētāki modeļi, piemēram, [15] Henveja-Grīnšteina modelis, kam

$$\rho_{\lambda} \sim \frac{1 - \Theta^2}{(1 + 2\Theta \cos g + \Theta^2)^{3/2}}$$

kur $\Theta \in (0, 1]$ – anizotropijas faktors, bet izkliedes fāzes leņķi g nosaka sakarība

$$\cos g = \cos \beta_K \cos \beta_R + \sin \beta_K \sin \beta_R \cos(\alpha_K - \alpha_R)$$

Kopsavilkums par dažādu difūzās izkliedes modeļu kvalitatīvajām īpašībām redzams 1-33. att.

1.4.6. Mikroviļņu izkliedes modelēšana

Mikroviļņu izmantošanas gadījumā virsmas tekstūras ietekme uz difūzās izkliedes parametriem principā ir modelējama, jo mikroviļņu garums ir samērojams ar vairumu tekstūras “graudu” tipiskiem izmēriem. Turklāt radaru izstaroto mikroviļņu frekvence (viļņu garums) ir maināma, tādējādi iespējams piemēroties dažādiem virsmas “graudu” izmēriem, ņemot vērā to, ka pie nosacījuma $\lambda \sim l$ novērojamas izkliedes (refleksijas) parametru būtiskas izmaiņas. Taču šī modelēšana nav vienkārša, un ir izstrādāti vairāki tuvināti fizikāli modeļi, piemēram, Kirhofa modelis [3], kurā virsmu reprezentē haotiski orientētu elementu kopa, Braga (jeb mazo perturbāciju) modelis, kurā lieto tekstūras Furjē transformāciju u. c. Par vienu no pilnīgākajiem uzskata t. s. integrālvienādojumu modeli (arī tuvinātu), kas izceļas gan ar savu precizitāti, gan matemātisko komplicētību. Šie modeļi ļauj sasaistīt ar tālīzpētes metodēm novērojamos difūzās izkliedes parametrus ar pētāmās virsmas tekstūras parametriem, kas var sniegt būtisku informāciju par šīs virsmas struktūru un sastāvu.

Ņemot vērā gan problēmas svarīgumu, gan tās matemātisko komplicētību, iepazīsimies tikai ar dažām fizikālās modelēšanas pamatidejām, ko izmanto mazo perturbāciju modeli. Šajā nolūkā reprezentēsim tekstūru (planētas virsmu) kā divu argumentu funkciju²⁹ $z = z(x, y)$, tās šķēlums $z(x)$ ar (x, z) plakni redzams 1-34. att.

No kreisās puses leņķī β_0 kritošais starojums tiek izkliedēts virzienā, ko raksturo leņķis β_1 . Stari AO un OB reprezentē t. s. atbalsta staru, attiecībā pret kuru rēķināsim reālo staru CP un PD fāžu nobīdi. No ģeometriskiem apsvērumiem

$$CP = a + x \sin \beta_0 - z(x) \cos \beta_0$$

$$PD = b - x \sin \beta_1 - z(x) \cos \beta_1$$

kur x – punkta P koordināta. Tātad reālā (izkliedētā) stara fāžu nobīde attiecībā pret atbalsta staru ir

$$\phi(x) = [s_\beta x - c_\beta z(x)]k \quad (1.106.)$$

kur $k = 2\pi/\lambda$ – viļņa skaitlis, savukārt

$$s_\beta = \sin \beta_0 - \sin \beta_1 \quad (1.107.)$$

$$c_\beta = \cos \beta_0 + \cos \beta_1 \quad (1.108.)$$

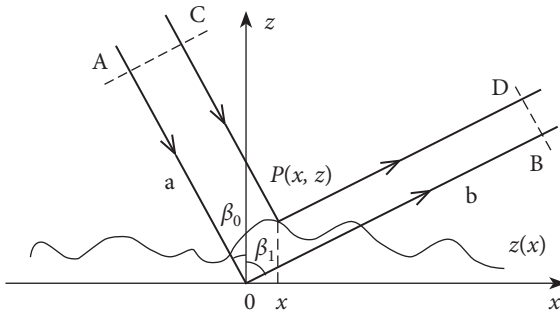
Novērtēsim, kāda ir reālā stara interferences rezultātā pievienotā elektriskās intensitātes $E(x)$ vērtība attiecībā pret atbalsta staru (izmantojot komplekso formālismu)

$$E(x) = E_0 \cos \phi(x) = E_0 e^{-i\phi(x)}$$

Pilno elektriskās intensitātes amplitūdu, kas interferences rezultātā tiek izkliedēta virzienā β_1 , var aprēķināt, summējot (integrējot) visu šajā virzienā izkliedēto staru pienesumu

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) dx = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\phi(x)} dx = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iks_\beta x} e^{ikc_\beta z(x)} dx \quad (1.109.)$$

Integrālis formulā (1.109.) nav nekas cits kā funkcijas $\exp(ikc_\beta z(x))$ Furjē transformācija [8], un šo funkciju varam izvirzīt Teilora rindā



1-34. att. Divu reflektētu staru interferences skaidrojums.

²⁹ Kā ģeogrāfisku virsmu attēlojošu funkciju to var uzskatīt par stohastisku funkciju, un tās autokorelācijas attālumu L fizikālos difūzās izkļiedes modeļos lieto līdz šim intuitīvi izmantotā tekstūras “grauda” izmēra l vietā.

$$e^{ikc_\beta z(x)} \cong 1 + ikc_\beta z(x) - \frac{(kc_\beta z(x))^2}{2} + \dots \quad (1.110.)$$

Apvienojot (1.109.) un (1.110.), iegūstam tuvinātu sakarību

$$E = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left[1 + ikc_\beta z(x) - \frac{(kc_\beta z(x))^2}{2} \right] e^{-iks_\beta x} dx \quad (1.111.)$$

un varam analizēt, ko reprezentē katrs no šīs formulas locekļiem.

Pirmais saskaitāmais formulā (1.111.)

$$E' \cong E_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iks_\beta x} dx = 2\pi E_0 \delta(s_\beta) \quad (1.112.)$$

ir Furjē transformācija no konstantes, kas, kā zināms [8], ir delta funkcija ar maksimumu pie $s_\beta = 0$. Saskaņā ar (1.107.)

$$s_\beta = \sin\beta_0 - \sin\beta_1 = 0$$

jeb

$$\sin\beta_0 = \sin\beta_1$$

tāpēc $\beta_0 = \beta_1$, kas nozīmē, ka izteiksmes (1.111.) pirmais loceklis (1.112.) reprezentē spoguļrefleksiju virzienā β_1 .

Izteiksmes (1.111.) otro locekli

$$E'' = E_0 ikc_\beta \int_{-\infty}^{\infty} z(x) e^{-iks_\beta x} dx$$

varam pārveidot, izsakot tekstūras profila funkciju $z(x)$ caur tās Furjē attēlu $f(l)$ formā

$$z(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(l) e^{ilx} dl$$

un nonākot pie

$$E'' = E_0 ikc_\beta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(l) e^{i(l - ks_\beta)x} dl dx$$

Mainot integrēšanas kārtību

$$E'' = E_0 ikc_\beta \int_{-\infty}^{\infty} f(l) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(ks_\beta - l)x} dx dl$$

Iekšējais integrālis atkal reprezentē Furjē transformāciju no konstantes, tātad ir proporcionāls delta funkcijai

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(ks_\beta - l)x} dx = 2\pi \delta(ks_\beta - l)$$

tādējādi³⁰

$$E'' = 2\pi E_0 ikc_\beta \int_{-\infty}^{\infty} f(l) \delta(ks_\beta - l) dl = 2\pi E_0 ikc_\beta f(ks_\beta) \quad (1.114.)$$

Tātad no virziena β_0 uz virzienu β_1 (ko nosaka parametrs $s_\beta = \sin\beta_0 - \sin\beta_1$) izkļiedētais

³⁰ Tas, ka E'' vērtība ir imagināra, nozīmē, ka to veido sinusa harmonika.

starojums ir proporcionāls tekstūras profila funkcijas $z(x)$ spektrālajai (Furjē) komponentei ar frekvenci ("grauda" izmēru) $l = ks_\beta$.

Ja gribam turpināt precizēt šāda veida izkliedes modeļus, līdzīgā veidā jāanalizē arī tālāki izvirzījuma (1.111.) locekļi, bet tas vairs nav vienkārši. Ja aprobežojamies ar apskatīto divu pirmo izvirzījuma locekļu modeli, tad noteiksim tā izmantošanas nosacījumu, kas izriet no (1.111.)

$$kc_\beta \Delta h < 1$$

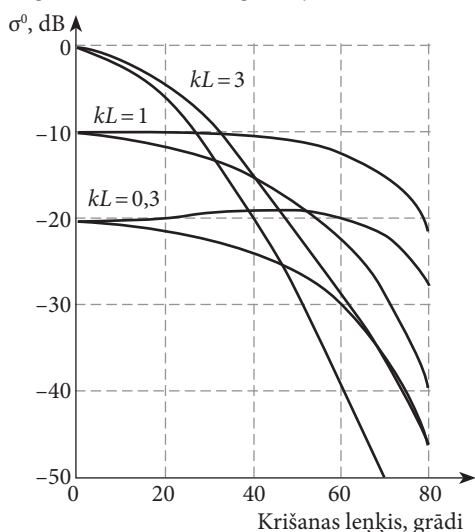
ko var pārveidot formā

$$\Delta h < \frac{\lambda}{2\pi c_\beta} = \frac{\lambda}{2\pi(\cos\beta_0 + \cos\beta_1)} \quad (1.114.)$$

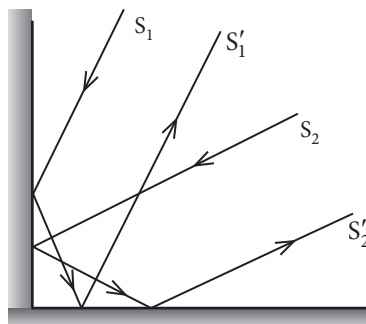
Nosacījumu (1.114.) sauc par Braga raupjuma kritēriju, un tas aptuveni atbilst iepriekš apskatītajam Releja raupjuma kritērijam (1.100.) gludai virsmai. Atbilstošo difūzās izkliedes modeli sauc par **Braga izkliedi**, un to sekmīgi izmanto mikroviļņu izkliedes modelēšanai no ūdens virsmas, piemēram, lai noteiktu ūdenskrātuvju piesārņotību ar naftas produktiem. Šajā nolūkā, izmantojot Braga izkliedes formulas, tiek teorētiski aprēķinātas atpakaļizkliedes koeficienta σ^0 (skat. 1.4.7. sadaļu) vērtības dažādiem izmantotās polarizācijas veidiem (skat. 1-34. att.), kā krišanas leņķa β_0 un parametra kL (k – viļņa skaitlis, bet L – jau pieminētais funkcijas $z(x)$ autokorelācijas attālums, kas reprezentē tekstūras "grauda" izmērus) funkcijas. Eksperimentāli izmērot (izmantojot tālīzpētes tehnoloģijas) atpakaļizkliedes koeficienta σ^0 atkarību no starojuma krišanas leņķa β_0 un polarizācijas veida, varam noteikt, kurš no 1-35. att. grafikiem vislabāk atbilst iegūto mērījumu datiem.

Tas ļauj atrast pareizo parametra kL vērtību un tādējādi aprēķināt tekstūras "grauda" izmērus raksturojošo autokorelācijas attālumu L .

Veicot radarmērījumus urbanizētās vidēs, kur ir sastopamas mikroviļņiem gludu virsmu veidotas taisnu leņķu konstrukcijas (ēku sienas, ielu segums un tamlīdzīgi), jārēķinās arī ar iespēju iegūt ļoti spēcīgus atstarojumus (t. s. retrorefleksijas) (skat. 1-36. att.), kas var negatīvi ietekmēt reģistrējošo iekārtu funkcionalitāti.



1-35. att. Braga izkliedes modeļa izmantošanas piemērs [3].



1-36. att. Retrorefleksiju piemēri urbanizētās vidēs.

1.4.7. Radara vienādojumi

Mikroviļņu tehnoloģiju (radaru) izmantošanas gadījumā enerģijas plūsmas pārneši no elektromagnētiskā starojuma krišanas virziena (α_K, β_K) uz kādu citu (difūzi izkliedētu) virzienu (α_R, β_R) ir pieņemts raksturot nevis ar *BRDF* funkcijām, bet ar bistatiskā un monostatiskā radara vienādojumu palīdzību. Tādēļ iepazīsimies arī ar šiem vienādojumiem situācijā, kas redzama 1-37. att.

Raidošā antena (T_K), kas atrodas attālumā r_K ar enerģijas plūsmu $\Delta\Phi_K$ telpiskajā leņķī $\Delta\Omega_K$ apstaro laukumiņu ΔS_K uz Zemes virsmas. Difūzi izkliedētais mikroviļņu starojums (enerģijas plūsma) $\Delta\Phi_R$ telpiskajā leņķī $\Delta\Omega_R$ sasniedz uztverošo antenu T_R ar efektīvo šķērsgriezuma laukumu ΔS_R , kas atrodas attālumā r_R no apstarotā laukumiņa ΔS_K . Saskaņā ar (1.43.) laukumiņa ΔS_K apstarojumu var izteikt formā

$$A_K = \frac{\Delta I_K \cos \beta_K}{r_K^2} \quad (1.115.)$$

kur ΔI_K – krītošā starojuma intensitāte, β_K – starojuma krišanas leņķis (zenītdistance). Savukārt saskaņā ar (1.50.) varam izteikt laukumiņa ΔS_K spožumu uztverošās antenas T_R virzienā

$$B_R = \frac{\Delta I_R}{\Delta S_K \cos \beta_R} \quad (1.116.)$$

kur ΔI_R – reflektētā starojuma intensitāte, β_R – reflektētā starojuma izkļiedes virziena zenītdistance.

Ievietojot (1.115.) un (1.116.) formulā (1.102.), atrodam, ka atbilstošā *BRDF* funkcijas vērtība ir izsakāma šādi:

$$\rho_\lambda(\alpha_K, \beta_K, \alpha_R, \beta_R) = \frac{B_R}{A_K} = \frac{\Delta I_R r_K^2}{\Delta S_K \cos \beta_R \Delta I_K \cos \beta_K} \quad (1.117.)$$

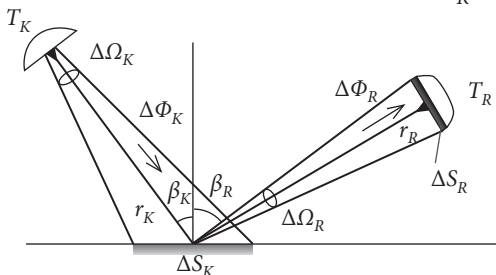
kur saskaņā ar (1.37.),

$$\Delta I_K = \frac{\Delta\Phi_K}{\Delta\Omega_K} = \frac{\Delta\Phi_K r_K^2}{\Delta S_K \cos \beta_K}$$

$$\Delta I_R = \frac{\Delta\Phi_R}{\Delta\Omega_R} = \frac{\Delta\Phi_R r_R^2}{\Delta S_R}$$

Ievietojot šīs vērtības izteiksmē (1.117.), iegūstam

$$\rho_\lambda = \frac{\Delta\Phi_R r_R^2}{\Delta S_R \cos \beta_R \Delta\Phi_K}$$



1-37. att. Mikroviļņu starojuma izkļiede.

no kurienes varam izteikt antenas T_R virzienā izkļiedētā starojuma enerģijas plūsmas $\Delta\Phi_R$ atkarību no krītošā starojuma enerģijas plūsmas $\Delta\Phi_K$

$$\Delta\Phi_R = 4\pi\rho_\lambda \cos\beta_R \frac{\Delta S_R}{4\pi r_R^2} \Delta\Phi_K \quad (1.118.)$$

Krītošā starojuma enerģijas plūsma $\Delta\Phi_K$ savukārt ir atkarīga no raidošās antenas pilnās izstarotās enerģijas plūsmas visos virzienos (raidītāja jaudas) Φ_K veidā

$$\Delta\Phi_K = G_K \Phi_K \frac{\Delta S_K \cos\beta_K}{4\pi r_K^2}$$

kur G_K – izstarojošās antenas pastiprinājuma koeficients. Ievietojot šo izteiksmi formulā (1.118.) un ieviešot lielumu

$$\gamma = 4\pi\rho_\lambda \cos\beta_R \quad (1.119.)$$

ko sauc par mikroviļņu bistatisko izkļiedes koeficientu, nonākam pie bistatiskā radara vienādojuma formā

$$\Delta\Phi_R = \gamma \Phi_K \frac{G_K \Delta S_K \Delta S_R}{(4\pi)^2 r_R^2 r_K^2} \cos\beta_K \quad (1.120.)$$

Radaru izmantošanas gadījumos kā raidītāju un uztvērēju parasti izmanto vienu un to pašu iekārtu (antenu), tāpēc $\alpha_R = \alpha_K$, $\beta_R = \beta_K$, $r_R = r_K$, $G_R = G_K$, un šādā gadījumā atbilstošā *BRDF* funkcija ir atkarīga tikai no diviem argumentiem

$$\rho_\lambda^\circ(\alpha_K, \beta_K) = \varrho_\lambda(\alpha_R = \alpha_K, \beta_R = \beta_K)$$

Ieviešot t. s. atpakaļizkļiedes koeficientu σ° atbilstoši formulai

$$\sigma^\circ = \gamma^\circ \cos\beta_K = 4\pi\rho_\lambda^\circ \cos^2\beta_K \quad (1.121.)$$

no (1.120.) varam viegli iegūt monostatisko radara vienādojumu

$$\Delta\Phi_R = \sigma^\circ \Phi_K \frac{G_K \Delta S_K \Delta S_R}{(4\pi)^2 r_K^4} \quad (1.122.)$$

No antenu teorijas ir zināms, ka antenas efektīvais šķērssgriezums ΔS_R ir saistīts ar tās pastiprinājuma koeficientu G_K un parametru η , ko sauc par antenas efektivitātes koeficientu formā

$$\Delta S_R = \frac{\lambda^2 G_K}{4\pi\eta}$$

tāpēc, ievietojot to formulā (1.122.) un atmetot indeksus, iegūstam monostatiskā radara vienādojumu tā vispārzināmā formā

$$\Delta\Phi = \sigma^\circ \Phi \frac{\lambda^2 G^2 \Delta S}{(4\pi)^3 \eta r^4} \quad (1.123.)$$

Pēdējo sakarību izmanto, lai pēc difūzi izkļiedēto mikroviļņu enerģijas plūsmas $\Delta\Phi$ mērījumiem noteiktu atpakaļizkļiedes koeficienta σ° vērtības, jo visus pārējos lielumus formulā (1.123.) var uzskatīt par zināmiem. Īstenībā iespējams noteikt pat veselus četrus atpakaļizkļiedes koeficientus σ_{VV}° , σ_{HH}° , σ_{HV}° un σ_{VH}° , ja strādā ar vertikāli (V) un horizontāli (H) lineāri polarizētiem mikroviļņiem. Šādi noteiktos atpakaļizkļiedes koeficientus savukārt

izmanto, veidojot tālīzpētes datu interpretācijas strukturālos modeļus, t. i., lai noteiktu planētas (Zemes) pētāmās virsmas faktūru un tekstūru raksturojošos parametrus.

Bez monostatiskā izkliedes koeficienta γ^o un atpakaļizkliedes koeficienta σ^o lieto vēl vienu t. s. “beta” atpakaļizkliedes koeficientu

$$\beta^o = \frac{\sigma^o}{\sin \beta_K} = \frac{\gamma^o}{\tan \beta_K} \quad (1.124.)$$

ko nereti (nosacīti) dēvē arī par radara spožumu.

1.5. Starojuma mijiedarbība ar vidi (6. lekcija)

1.5.1. Kopsavilkums

Elektromagnētiskā starojuma mijiedarbību ar daļēji caurspīdīgām ģeogrāfiskām vidēm (atmosfēru, okeāniem, ledājiem u. c.) modelē, izmantojot starojuma pārnesei vienādojumus. Ar tiem veido gan izkliedētā starojuma, gan absorbcijas fizikālos modeļus, kas ļauj interpretēt ar tālzipētes tehnoloģijām iegūtos mērījumu datus. Iepazīsimies ar vairākiem šādiem modeļiem, tostarp ar absorbcijas vertikālajiem profiliem, ko apraksta Bēra un Čepmena likumi.

1.5.2. Starojuma pārnesei vienādojumi

Lai no fizikas viedokļa raksturotu starojuma mijiedarbību ar planētas (Zemes) atmosfēru vai citu daļēji caurspīdīgu vidi (okeānu, ledājiem, sniega slāni u. c.), apskatīsim vienkāršotu viendimensionālu modeli, kurā starojums (enerģijas plūsma) izplatās z ass virzienā [3]. Elektromagnētiskajam viļnim izplatoties vidē, daļa starojuma tiek absorbēta, un tā enerģijas plūsma Φ saskaņā ar (1.77.) samazinās eksponenciāli

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\gamma_a z) \quad (1.125.)$$

kur $\gamma_a = 2k''$ – absorbcijas koeficients. Atvasinot (1.125.), iegūstam

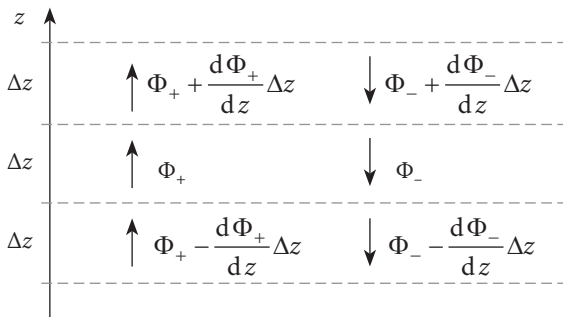
$$\frac{d\Phi}{dz} = -\gamma_a \Phi$$

jeb

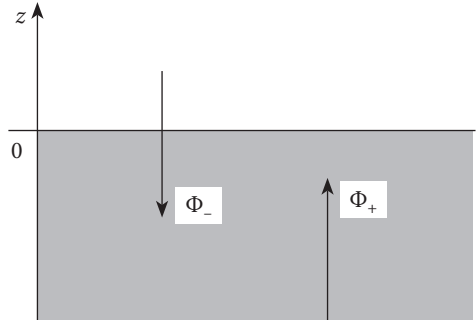
$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -\gamma_a dz \quad (1.126.)$$

Turklāt pieņemsim, ka vide ir nehomogēna, kur katrā diferenciālajā slānī notiek gan starojuma absorbcija, gan atpakaļizkliede (refleksija), un šajā vidē (kā tas arī notiek reālās situācijās) izplatās divas enerģijas plūsmas: viena Φ_- – virzienā no augšas uz leju un otra Φ_+ – virzienā no lejas uz augšu (skat. 1-38. att.).

Starojumam izejot caur vides slāni, kura biezums Δz , tā enerģijas plūsma Φ absorbcijas dēļ (1.126.) samazināsies par relatīvo lielumu (daļu) $\gamma_a \Delta z$, taču atpakaļizkļiedes dēļ tā samazināsies vēl arī par daļu $\gamma_s \Delta z$, kur γ_s – izkļiedes koeficients. Šie spriedumi ļauj uzrakstīt



1-38. att. Viendimensionāls matemātiskais modelis.



1-39. att. Mijiedarbības shēma ar okeānu vai ledājiem.

sakarību augšupejošajai enerģijas plūsmai

$$\Phi_+ = \left(\Phi_+ - \frac{d\Phi_+}{dz} \Delta z \right) [1 - (\gamma_a + \gamma_s) \Delta z] + \Phi_- \gamma_s \Delta z \quad (1.127.)$$

kur pirmais reizinātājs iekavās raksturo enerģijas plūsmu iepriekšējā līmenī, izteiksme $(\gamma_a + \gamma_s) \Delta z$ – tās zaudēto daļu absorbcijas un izkliedes dēļ, savukārt pēdējais saskaitāmais – atpakaļizkliedes rezultātā klātpienākušo starojuma daļu no lejupejošās enerģijas plūsmas. Atverot izteiksmē (1.127.) iekavas un atmetot locekļus, kas proporcionāli $(\Delta z)^2$, iegūstam

$$\frac{d\Phi_+}{dz} = -(\gamma_a + \gamma_s) \Phi_+ + \gamma_s \Phi_- \quad (1.128.)$$

un līdzīgi arī lejupejošajam starojumam

$$\frac{d\Phi_-}{dz} = (\gamma_a + \gamma_s) \Phi_- - \gamma_s \Phi_+ \quad (1.129.)$$

kur $\gamma_a + \gamma_s = \gamma_e$ sauc par rimšanas (jeb ekstinkcijas) koeficientu. Vienādojumi (1.128.) un (1.129.) tuvināti (viendimensionālā gadījumā) apraksta starojuma izplatīšanos vidē ar absorbciju un izkliedi, tādēļ tos sauc par starojuma pārnese vienādojumiem.

1.5.3. Starojuma pārnese okeānos un ledājos

Kā starojuma pārnese vienādojumu izmantošanas piemēru [3] apskatīsim to atrisinājumu, kas apmierina robežnosacījumus (skat. 1-39. att.)

$$\Phi_-(0) = 1, \quad z \leq 0$$

$$\Phi_+(-\infty) = \Phi_-(-\infty) = 0 \quad (1.130.)$$

Šie nosacījumi atbilst elektromagnētiskā starojuma mijiedarbības apstākļiem ar okeānu vai ledājiem (arī sniegu). Vienādojumu sistēmas (1.128.), (1.129.) atrisinājumu meklējam formā (ņemot vērā no (1.125.) izrietošo procesa asimptotiku)

$$\Phi_+ = c_1 e^{\mu z} \quad \Phi_- = c_2 e^{\mu z} \quad (1.131.)$$

ko atvasinot

$$\frac{d\Phi_+}{dz} = c_1 \mu e^{\mu z}, \quad \frac{d\Phi_-}{dz} = c_2 \mu e^{\mu z} \quad (1.132.)$$

Ievietojot pēdējās izteiksmes starojuma pārnese vienādojumos (1.128.), (1.129.), iegūstam

$$\begin{aligned} c_1 \mu &= -(\gamma_a + \gamma_s) c_1 + \gamma_s c_2 \\ c_2 \mu &= (\gamma_a + \gamma_s) c_2 - \gamma_s c_1 \end{aligned} \quad (1.133.)$$

t. i., algebrisku divu vienādojumu sistēmu ar trim nezināmajiem (c_1 , c_2 , μ). Lai to atrisinātu, pieņemsim, ka $c_2 = 1$. Tad no (1.133.) izriet

$$c_1 \mu = -(\gamma_a + \gamma_s) c_1 + \gamma_s$$

$$c_1 \mu = (\gamma_a + \gamma_s) c_1 - \gamma_s c_1^2$$

jeb

$$2c_1\mu = \gamma_s(1 - c_1^2)$$

$$\mu = \gamma_a + \gamma_s - \gamma_s c_1 \quad (1.134.)$$

No pēdējām divām sakarībām (1.134.) izslēdzot nezināmo μ , nonākam pie kvadrātvienādojuma

$$\gamma_s c_1^2 - 2(\gamma_a + \gamma_s)c_1 + \gamma_s = 0$$

ar atrisinājumu

$$c_1 = \frac{\gamma_a + \gamma_s \pm \sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s}}{\gamma_s}$$

savukārt no (1.134.) izriet

$$\mu = \mp \sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s}$$

Saskaņā ar (1.130.) $z \leq 0$, tāpēc pareiza ir “apakšējā” zīme un tādējādi

$$\mu = -\sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s} \quad (1.135.)$$

$$c_1 = \frac{\gamma_a + \gamma_s - \mu}{\gamma_s} \quad (1.136.)$$

Ievietojot šīs μ un c_1 vērtības (kā arī $c_2 = 1$) asimptotiskajā modelī (1.131.), iegūstam

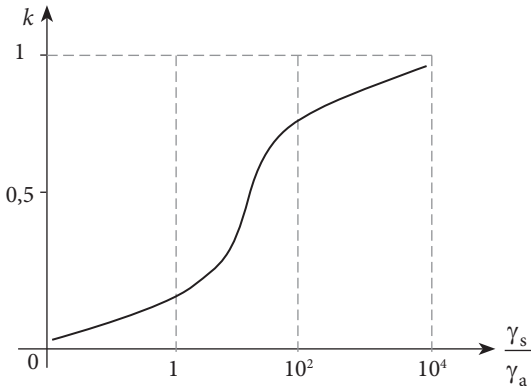
$$\begin{aligned} \Phi_-(z) &= \exp(\mu z), \quad z \leq 0 \\ \Phi_+(z) &= \frac{\gamma_a + \gamma_s - \mu}{\gamma_s} \exp(\mu z) \end{aligned} \quad (1.137.)$$

Integrālo refleksijas koeficientu šajā gadījumā varam atrast kā

$$k = \frac{\Phi_+(0)}{\Phi_-(0)} = \frac{\gamma_a + \gamma_s - \mu}{\gamma_s} = \frac{\gamma_a + \gamma_s - \sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s}}{\gamma_s} = 1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_s} - \sqrt{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right)^2 + 2\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right)} = F\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right) \quad (1.138.)$$

Ja $\gamma_a / \gamma_s \rightarrow 0$, t. i., izkļiede dominē pār absorbciju, tad $k \rightarrow 1$, jeb difūzā izkļiede būs izteikta un spēcīga (skat. 1-40. att.), kā tas ir žilbinoši balta sniega vai ledāju gadījumā.

Pretējā gadījumā, kad $\gamma_s / \gamma_a \rightarrow 0$, t. i., absorbcija dominē pār izkļiedi un (šeit nenoteik-



1-40. att. Refleksijas koeficienta atkarība no γ_s / γ_a .

tības atrisināšanai lietota Lopitāla kārtula)

$$k = \frac{\Phi_+(0)}{\Phi_-(0)} = \lim_{\gamma_s \rightarrow 0} \frac{\gamma_a + \gamma_s - \sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s}}{\gamma_s} =$$

$$= \lim_{\gamma_s \rightarrow 0} \frac{d}{d\gamma_s} \left(\gamma_a + \gamma_s - \sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s} \right) = \lim_{\gamma_s \rightarrow 0} \left(1 - \frac{\gamma_a}{\sqrt{\gamma_a^2 + 2\gamma_a\gamma_s}} \right) = 1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_a} = 0$$

no kurienes $\Phi_+(0)=0$, jeb izkļiedētā starojuma nav (skat. 1-40. att.). Šis gadījums tuvināti atbilst elektromagnētiskā starojuma mijiedarbībai ar dziļu tīra ūdens slāni (okeānu), kad izkļiedētais starojums ir niecīgs. Ir tikai refleksija no ūdens virsmas, taču praktiski viss lauztais starojums tiek absorbēts.

1.5.4. Izkļiedētā starojuma modelēšana

Ja elektromagnētiskais starojums nekrīt perpendikulāri planētas (Zemes) virsmai vai arī citu iemeslu dēļ nav apmierinoši aprakstāms ar viendimensionālu modeli, tad izkļiedes raksturošanai visbiežāk izmanto spožumu $B_\lambda(\alpha_R, \beta_R)$ virzienā, ko raksturo leņķi α_R un β_R (reģistrējošās ierīces virzienā). Taču konceptuāli ir iespējams spriest līdzīgi un iegūt izkļiedētā starojuma pārnese vienādojumu formā (šeit dl – attāluma diferenciālis reģistrējošās ierīces virzienā)

$$\frac{dB_\lambda(\alpha_R, \beta_R)}{dl} = -(\gamma_a + \gamma_s)B_\lambda(\alpha_R, \beta_R) + \gamma_s B'_\lambda(\alpha_R, \beta_R) \quad (1.139.)$$

kur $B'_\lambda(\alpha_R, \beta_R)$ – spožums virzienā (α_R, β_R) , kas rodas, gaismai izkļiedējoties vidē no vi-
siem citiem virzieniem (α_K, β_K)

$$B'_\lambda = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} B_\lambda(\alpha_K, \beta_K) P(\cos g) d\Omega_K \quad (1.140.)$$

$P(\cos g)$ – t. s. fāzes funkcija, kas raksturo izkļiedētā starojuma telpisko (jeb leņķisko vir-
zienu) sadalījumu. Lielumu g , līdzīgi kā iepriekš, sauc par fāzes leņķi un aprēķina atbilstoši
sfēriskās kosinusu teorēmas formulai

$$\cos g = \cos\beta_R \cos\beta_K + \sin\beta_R \sin\beta_K \cos(\alpha_R - \alpha_K)$$

Detalizētāk šo modelēšanu neapskatīsim, ņemot vērā tās matemātisko komplikētību. Šo komplikētību lielā mērā nosaka tas, ka difrakcijas (skat. 1.1. nodaļu) dēļ elektromag-
nētiskā starojuma izkļiede ir ļoti atkarīga no to daļiņu izmēriem (diametra d), kas, mijie-
darbojoties ar starojumu, izraisa telpisko difūzās izkļiedes parādību. Līdzīgi kā starojuma
mijiedarbības ar virsmu gadījumos, arī telpiskā (jeb tilpuma) difūzā izkļiede ir atšķirīga
gadījumos ($\lambda \gg d$), ($\lambda \sim d$), ($\lambda \ll d$), kur λ – elektromagnētiskā starojuma viļņa garums
(skat. 1-41. att.)

Kad izkļiede (optiskajā diapazonā) notiek uz sīkām daļiņām (gāzes molekulām), kurām
 $\lambda \gg d$, izmantojama difūzās izkļiedes teorija, ko sauc par Releja izkļiedi. Citos gadījumos,
kad izkļiede notiek uz lielākām daļiņām (aerosoli, sīki pilieniņi), kurām $\lambda \sim d$, izmanto-
jama difūzās izkļiedes teorija, ko sauc par Mī izkļiedi. Vēl citos gadījumos, kad izkļiede
notiek uz ļoti lielām daļiņām (lietus lāses, krusas graudi), kurām $\lambda \ll d$, izmantojama cita

difūzās izkliedes teorija, ko dēvē par neselektīvo (jeb Tindala) izkliedi. Turklāt pastāv arī vēl citas komplicētākas izkliedes teorijas (piemēram, Ramana izkliede), kas veidotas, izmantojot priekšstatus par fotonu elastīgām sadursmēm ar izkliedējošajām daļiņām, kuru rezultātā notiek enerģijas apmaiņa un mainās izkliedētā starojuma viļņa garums. Tādējādi dažādu difūzās izkliedes gadījumu interpretācijai izmanto visai atšķirīgus un dažreiz pat pretrunīgus matemātiskos modeļus, kuru detalizēts izklāsts rodams plašā zinātniskās literatūras klāstā [16, 17, 18, 19, 20].

1.5.5. Starojuma absorbcijas modelēšana, Bēra likums

Lai detalizētāk iepazītos ar starojuma absorbcijas modelēšanas pamatidejām, apskatīsim starojuma pārnesei vienādojumu (1.139.) speciālgadījumā, kad notiek tikai absorbcija, t. i., $\gamma_s = 0$, $\gamma_a \neq 0$. Šajā gadījumā būs tikai lejupejošais starojums Φ_- , tādēļ jāizmanto (1.129.) veida vienādojums

$$\frac{dB_\lambda(\alpha, \beta)}{dl} = \gamma_a B_\lambda(\alpha, \beta) \quad (1.141.)$$

kur atvasināšana notiek l ass virzienā, kuras stāvokli (skat. 1-42. att.) nosaka leņķi (α, β) .

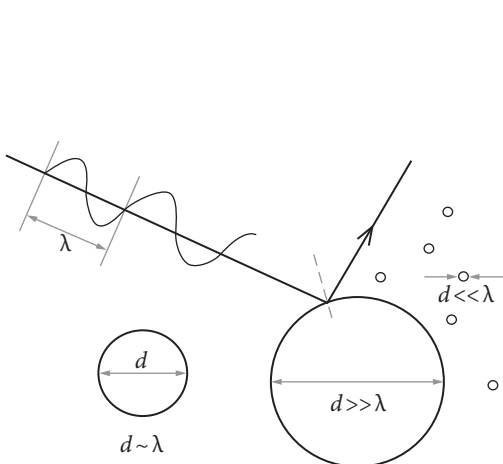
Vienādojumu (1.141.) varam pārveidot formā

$$\frac{dB_\lambda}{B_\lambda} = \gamma_a \sec \beta dz$$

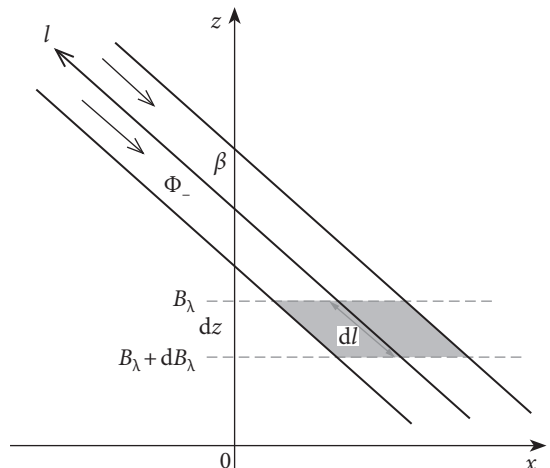
no kuras izriet, ka $dB_\lambda < 0$, jo lejupejošajam starojumam $dz < 0$. Apzīmējot $\gamma_a = \kappa_\lambda \rho$, kur κ_λ – īpatnējais absorbcijas koeficients, ρ – vides blīvums, iegūstam

$$\frac{dB_\lambda}{B_\lambda} = \kappa_\lambda \rho \sec \beta dz \quad (1.142.)$$

Atmosfēras gadījumā ir lietderīgi uzskatīt, ka tā atrodas virs x ass (t. i., pie pozitīvām z vērtībām), un integrēt vienādojumu (1.142.), sākot no pozitīvas bezgalības vērtības. Mainīgie vienādojumā (1.142.) ir atdalīti, tāpēc



1-41. att. Difūzā izkliede uz dažāda izmēra daļiņām.



1-42. att. Slīpa starojuma absorbcijas aina.

$$\int_{B_\lambda(z)}^{B_\lambda(\infty)} \frac{dB_\lambda}{B_\lambda} = \kappa_\lambda \sec \beta \int_z^\infty \rho(z) dz$$

Ieviešot lielumu u , ko sauc par blīvumattālumu

$$u = \sec \beta \int_z^\infty \rho(z) dz \quad (1.143.)$$

iegūstam

$$\ln B_\lambda(\infty) - \ln B_\lambda(z) = \kappa_\lambda u$$

jeb

$$B_\lambda = B_\lambda^\infty \exp(-\kappa_\lambda u) \quad (1.144.)$$

kur $B_\lambda^\infty = B_\lambda(\infty)$ – krītošā elektromagnētiskā starojuma radiometriskais spožums (1.50.) ārpus planētas (Zemes) atmosfēras. Pēdējo sakarību (1.144.) sauc par **Bēra likumu** nehomogēnai videi. Tas raksturo spožuma izmaiņu, starojumam iespiežoties vidē, kurā notiek tā absorbcija. Nereti Bēra likuma kontekstā tiek apskatīts arī t. s. vides optiskā biezuma $\sigma_\lambda = \kappa_\lambda u$ jēdziens, kas ir saistīts ar iepriekš apskatīto absorbcijas dziļuma x_ω jēdzienu (skat. (1.94.)). Starojumam iespiežoties vidē absorbcijas dziļumā x_ω , tā enerģijas plūsma (un arī spožums) samazinās $e = 2,718...$ reizes, bet saskaņā ar (1.144.) šim absorbcijas dziļumam x_ω atbilstošais vides optiskais biezums $\sigma_\lambda = 1$.

N. B. Absorbējošas vides slāņa starojuma caurlaidības spēju definē kā

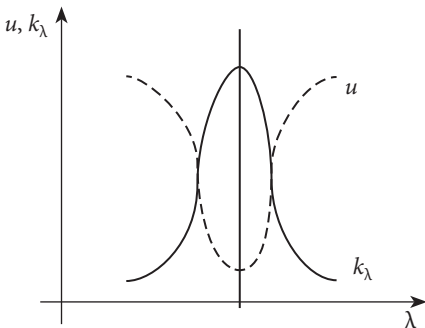
$$\tau_\lambda = \frac{B_\lambda}{B_\lambda^\infty} = \exp(-\kappa_\lambda u)$$

Tādējādi tā absorbcijas spēju $a_\lambda = 1 - \tau_\lambda$ un īpatnējo absorbcijas koeficientu κ_λ saista nelineāra sakarība

$$a_\lambda = 1 - \exp(-\kappa_\lambda u)$$

Ar šo piemēru vēršam uzmanību uz to, ka absorbciju var raksturot (un raksturo) ar dažādiem parametriem, kuru savstarpējā saistība var būt nelineāra un reizēm visai komplicēta.

N. B. Analizējot absorbcijas spektrus (skat. arī 1-20. att.), varam secināt, ka absorbcijas līniju (joslu) centros īpatnējā absorbcijas koeficienta κ_λ vērtības ir lielas un noteiktu optiskā biezuma $\sigma_\lambda = \kappa_\lambda u$ vērtību var sasniegt pie mazām blīvumattāluma u vērtībām (skat.



1-43. att. Absorbcijas spektra līnijas raksturojums.

1-43. att.). Savukārt, attālinoties no absorbcijas līnijas (joslas) centra, īpatnējā absorbcijas koeficienta κ_λ vērtība strauji samazinās, un tā paša optiskā biezuma σ_λ sasniegšanai nepieciešamas daudz lielākas blīvumattāluma u vērtības. Citiem vārdiem – situācija ir pretēja.

1.5.6. Absorbcijas vertikālie profili, Čepmena likums

Absorbcijas vertikālos profilus monohromatiskam starojumam pirmais analizēja britu ģeofiziķis Sidnejs Čepmens (1888–1970). Lai noteiktu, kāds ir absorbcijas intensitātes vertikālais sadalījums, viņš atvasināja Bēra likuma (1.144.) formulu

$$\frac{dB_\lambda}{dz} = -B_\lambda^\infty \kappa_\lambda \exp(-\kappa_\lambda u) \frac{du}{dz} \quad (1.145.)$$

No izteiksmes (1.143.) savukārt

$$\frac{du}{dz} = -\rho \sec \beta$$

ko, ievietojot (1.145.), iegūstam

$$\frac{dB_\lambda}{dz} = B_\lambda^\infty \left(\frac{\rho}{u} \right) (\kappa_\lambda u) \sec \beta \exp(-\kappa_\lambda u) \quad (1.146.)$$

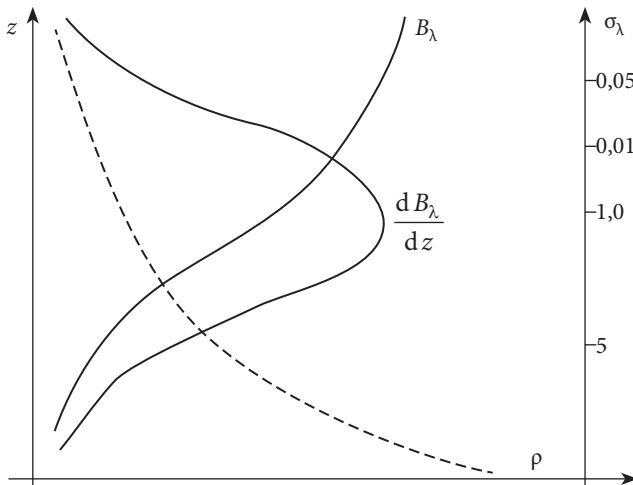
Planētu atmosfērā arī spiediens un blīvums mainās eksponenciāli³¹

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (1.147.)$$

kur Zemes atmosfērai [21] konstante $H = 8,4$ km, tādējādi (1.143.)

$$u = \sec \beta \int_z^\infty \rho dz = \rho_0 \sec \beta \int_z^\infty \exp\left(-\frac{z}{H}\right) dz = H \rho_0 \sec \beta \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

no kurienes



1-44. att. Absorbcijas vertikālie profili.

31 Šīs formulas izvedumu skat. nākamajā lekcijā.

$$\frac{\rho}{u} = \frac{1}{H \sec \beta}$$

Ievietojot pēdējo sakarību izteiksmē (1.146.), kā arī atceroties, ka optiskais biezums $\sigma_\lambda = \kappa_\lambda u$, iegūstam

$$\frac{dB_\lambda}{dz} = \frac{B_\lambda^\infty}{H} \sigma_\lambda \exp(-\sigma_\lambda) \quad (1.148.)$$

ko arī sauc par Čepmena likumu.

Noteiksim šīs funkcijas maksimumu atkarībā no σ_λ , to atvasinot un pielīdzinot iegūto atvasinājumu nullei

$$\frac{d}{d\sigma_\lambda} \left(\frac{dB_\lambda}{dz} \right) = \frac{B_\lambda^\infty}{H} (1 - \sigma_\lambda) \exp(-\sigma_\lambda) = 0$$

no kurienes $\sigma_\lambda = 1$. Tātad visintensīvākā absorbcija notiek tajā atmosfēras līmenī (augstumā), kur vides optiskais blīvums $\sigma_\lambda = 1$ (skat. 1-44. att.). Atmosfēras augšējos slāņos absorbcijas ātrums dB_λ/dz ir neliels, jo mazs ir tās blīvums ρ . Atmosfēras apakšējos slāņos absorbcijas ātrums dB_λ/dz arī var izrādīties mazs, ja lielākā daļa starojuma enerģijas plūsmas jau būs absorbēta.

Tādējādi vislielākais absorbcijas ātrums būs novērojams augstumā, kur $\sigma_\lambda = 1$. Taču šāda situācija veidojas tikai absorbcijas līnijās un joslās (skat. 1-43. att.), jo pie mazām īpatnējās absorbcijas koeficienta κ_λ vērtībām optiskais biezums $\sigma_\lambda < 1$ pat uz Zemes virsmas, un varam secināt, ka lielākā daļa Saules starojuma sasniedz mūsu planētas virsmu.

Apskatītais absorbcijas modelis, ko reprezentē Bēra (1.144.) un Čepmena (1.148.) likumi, sniedz tuvinātu, bet kvalitatīvi pareizu absorbcijas ainu Zemes atmosfērā, lai arī tas ietver virkni tuvinātu pieņēmumu. Tādēļ Zemes atmosfērai ir izveidoti arī citi precīzāki absorbcijas modeļi, kas nereti apvienoti ar difūzās izkliedes matemātiskajiem modeļiem.

1.6. Zemes atmosfēra un hidrosfēra (7. lekcija)

1.6.1. Kopsavilkums

Šajā lekcijā iepazīsimies ar Zemes atmosfēras ķīmisko sastāvu un termodinamiskos procesus nosakošajiem galvenajiem selektīvajiem absorbētājiem. Analizēsim atmosfēras blīvuma, spiediena un temperatūras atkarību no augstuma virs Zemes virsmas. Iepazīsim atmosfēras galvenos slāņus (troposfēru, stratosfēru, mezosfēru un termosfēru), kā arī īsumā aplūkosim hidrosfēras galvenās īpašības.

1.6.2. Atmosfēras sastāvs un galvenie absorbētāji

Zemes atmosfēra ir gāzu maisījums bez augšējās robežas. Atmosfēras gāzu molekulas ir reģistrējamas pat miljons km attālumā no Zemes virsmas un vēl tālāk. Termiskās difūzijas dēļ Zeme pastāvīgi zaudē daļu no atmosfēras (gāzu molekulas izklist kosmiskajā telpā), bet tā tiek kompensēta galvenokārt no hidrosfēras (iztvaikošanas rezultātā no okeāniem, jūrām un arī cietzemes) un citiem gāzu avotiem (tostarp vulkāniskas izcelsmes) uz Zemes virsmas. Šo procesu rezultātā ir izveidojies atmosfēras gāzu maisījums, kas sastāv no komponentēm ar konstantu koncentrāciju un komponentēm ar laikā un telpā mainīgu koncentrāciju (skat. 1-45. att.).

1-2. tab. [3] redzams, ka trīs pamatgāzes – slāpekļis, skābeklis un argons – veido 99.99 % no Zemes atmosfēras sastāva. Ogļskābā gāze (oglekļa dioksīds) globālā mērogā ir konstanta atmosfēras komponente, bet lokālā mērogā arī to var uzskatīt par mainīgu. Taču Zemes atmosfēras svarīga īpatnība ir tā, ka minētās trīs pamatgāzes (N_2 , O_2 , Ar) ir caurspīdīgas un ļoti vāji mijiedarbojas ar Saules elektromagnētisko starojumu. Termodinamiskos procesus atmosfērā dominējoši nosaka pavisam citas tās komponentes: ogļskābā gāze, ozons un ūdens tvaiks, mazākā mērā arī metāns un daļēji skābeklis. Šīs gāzes (izņemot skābekli

1-2. tab. Zemes atmosfēras konstantās un mainīgās komponentes.

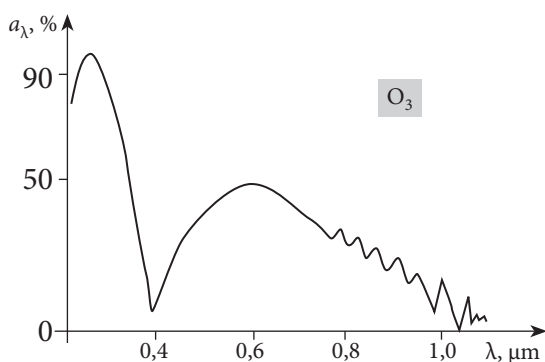
Konstantā komponente	Daudzums %	Mainīgā komponente	Daudzums %
Slāpekļis (N_2)	78,08	Ūdens tvaiks (H_2O)	0–4
Skābeklis (O_2)	20,95	Ozons (O_3)	$(0-12) \cdot 10^{-4}$
Argons (Ar)	0,93	Amonjaks (NH_3)	$\sim 0,004 \cdot 10^{-4}$
Oglekļa dioksīds (CO_2)	0,041	Sēra dioksīds (SO_2)	$\sim 0,001 \cdot 10^{-4}$
Neons (Ne)	$18,2 \cdot 10^{-4}$	Slāpekļa dioksīds (NO_2)	$\sim 0,001 \cdot 10^{-4}$
Hēlijs (He)	$5,2 \cdot 10^{-4}$	Citas gāzes	Niecīgi daudz
Kriptons (Kr)	$1,1 \cdot 10^{-4}$		
Ksenons (Xe)	$0,089 \cdot 10^{-4}$		
Ūdeņradis (H_2)	$0,5 \cdot 10^{-4}$		
Metāns (CH_4)	$1,5 \cdot 10^{-4}$		
Slāpekļa oksīds (N_2O)	$0,27 \cdot 10^{-7}$		
Oglekļa monoksīds (CO)	$0,19 \cdot 10^{-4}$		

un ūdens tvaiku) atmosfērā ir nēcīgā koncentrācijā, tādējādi, nedaudz ietekmējot to daudzumu, ir iespējams būtiski mainīt termodinamiskos procesus, kas regulē un nosaka mūsu planētas klimatisko situāciju. Tādēļ iepazīsimies ar šiem t. s. galvenajiem selektīvajiem absorbētājiem nedaudz detalizētāk.

Ūdens tvaiks (H_2O). Ūdens tvaika koncentrācija atmosfērā ir laikā un telpā ļoti mainīga (0–4 %). Tā ir ļoti atkarīga no temperatūras, jo pie $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 kg sausa gaisa spēj izšķīdināt un noturēt sevī līdz 50 g ūdens, savukārt pie $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vairs tikai 5,5 g. Termodinamisko līdzsvaru atmosfērā un līdz ar to klimata stabilitāti lielā mērā ietekmē arī H_2O divu fāžu pāreju (sasalšana/kušana un iztvaikošana/kondensācija) latentais siltums. Pat relatīvi nelielas ūdens tvaika koncentrācijas izmaiņas ļoti ietekmē lokālā klimata raksturlielumus troposfērā (t. i., līdz 6–10 km augstumam), kur atrodas lielākā H_2O daļa. Galvenais ūdens tvaika avots atmosfērā ir iztvaikošana no okeāniem un veģetācijas, bet tā daudzumu samazina kondensācija mākoņos un nokrišņi. Palielinoties augstumam, vairumā gadījumu ūdens tvaika koncentrācija troposfērā samazinās, bet ne vienmēr. Ūdens tvaika spektrā ir daudz intensīvu absorbcijas līniju un joslu (5,5–7,5 μm , 2,6–3,3 μm , 1,9 μm , 1,4 μm , 1,1 μm , 0,94 μm , 0,81 μm , 0,72 μm u. c.), tostarp īsviļņu diapazonā, kas atbilst Saules starojuma spektrālā blīvuma maksimumam (skat. 1-18. att.). Saules elektromagnētiskā starojuma absorbcija šajā diapazonā veido būtisku enerģijas plūsmu, kas silda troposfēru. Okeānu klātbūtne uz mūsu planētas nodrošina ūdens tvaika stabilu vidējo koncentrāciju Zemes atmosfērā, un būtiskas problēmas klimata izmaiņu kontekstā saistībā ar to netiek prognozētas.

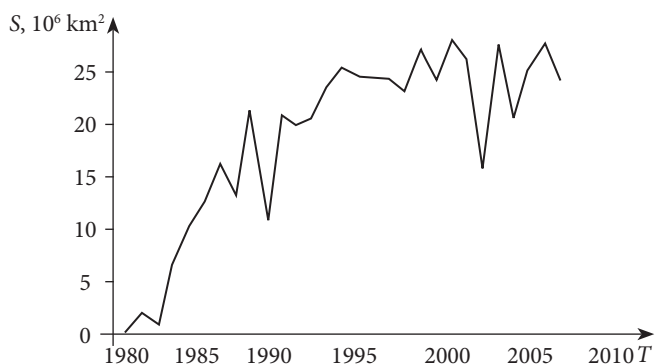
Ozons (O_3). Līdzīgi ūdens tvaikam, arī ozona koncentrācija atmosfērā ir laikā un telpā ļoti mainīga (no 0 % līdz $12 \cdot 10^{-4}$ %), taču runa ir par ievērojami mazākām koncentrācijas vērtībām. Ozons veidojas atmosfērā 10 km līdz 60 km augstumā (stratosfērā) fotoķīmisku reakciju rezultātā (Saules ultravioletais starojums sašķēļ skābekļa O_2 molekulas atomārajā skābeklī O , kas ir ķīmiski ārkārtīgi aktīvs un nereti pievienojas molekulārā skābekļa O_2 molekulām, veidojot ozona O_3 molekulas).

Ozons O_3 , arī būdams ķīmiski aktīva un relatīvi smaga gāze, grimst lejup un akumulējas stratosfēras apakšējos slāņos (15 km līdz 35 km augstumā), kur intensīvi izzūd, jo reaģē ar atmosfēras ķīmiskā piesārņojuma molekulām, kuru daudzums eksponenciāli pieaug, samazinoties augstumam. Ozons intensīvi absorbē Saules elektromagnētisko starojumu visā spektrālajā diapazonā, gan mikroviļņos, gan infrasarkanajā, bet it īpaši ultravioletajā

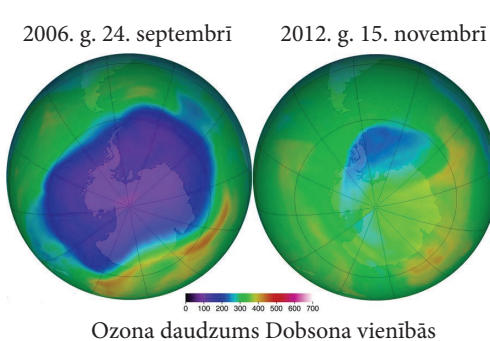


1-45. att. Ozona spektrālās absorbcijas profils.

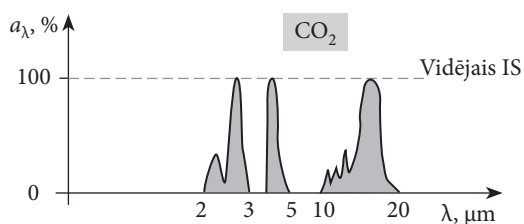
diapazonā (1-45. att.). Tas nodrošina gan dzīvības iespēju uz Zemes virsmas, jo to nesasniedz Zemes dzīvības formām bīstamais intensīvais jonizējošais UV starojums, gan arī, kā to redzēsim turpmāk, ievērojami silda jonosfēru, izkļiedējot tajā termisko enerģiju un pasargājot Zemes virsmu no nevēlamas pārkaršanas. Ozona O_3 daudzums stratosfērā ir patiesi niecīgs, ja to visu savāktu un izveidotu tīra gāzveida ozona slāni, tā biezums būtu tikai daži milimetri. Ozona molekulu “dzīves” ilgums stratosfērā ir nedēļas vai mēneši. Tad tās izzūd, ķīmiski reaģējot ar dažādu vielu molekulām, kas difundējušas 15 km līdz 35 km augstumā no vulkānu izvirdumiem un cilvēku antropogēnās darbības (industriālo skursteņu izmešiem, automobiļu un lidmašīnu izplūdes gāzēm, freonu noplūdēm u. c.) rezultātā. Tiek vērtēts, ka antropogēnā darbība mūsdienās nodrošina ap 50 % no šī ķīmiskā piesārņojuma. Lai arī ozona stratosfērā ir ārkārtīgi maz, tā ietekme uz termodinamiskajiem procesiem atmosfērā ir nesamērīgi liela, tādēļ pat nelielas ozona koncentrācijas



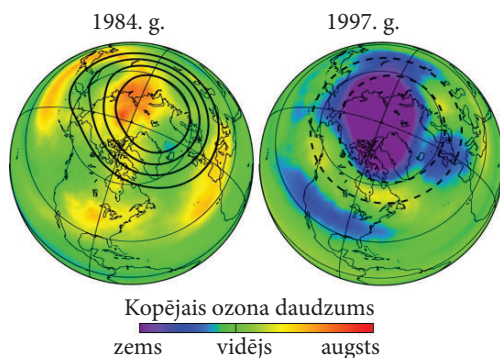
1-46. att. Ozona caurumu vidējā platība Zemes atmosfērā.



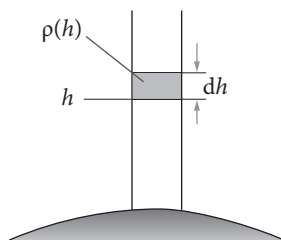
1-47. att. Ozona cauruma izmaiņas antarktiskajā reģionā.



1-49. att. Oglekļa dioksīda spektrālās absorbcijas profils.



1-48. att. Ozona cauruma izmaiņas arktiskajā reģionā.



1-50. att. Atmosfēras spiediena modelēšana.

izmaiņas būtiski ietekmē mūsu planētas klimatu. Savukārtniecīgo ozona koncentrāciju ir ļoti viegli ietekmēt un izmainīt ar nekontrolētu atmosfēras ķīmisko piesārņojumu, kas var izraisīt grūti prognozējamas ģeofizikālas sekas. Tādēļ ozona daudzums stratosfērā tiek intensīvi pētīts (1-46. att.).

Īpaši tas attiecas uz t. s. ozona caurumiem Zemes polārajos apgabalos (Antarktīdā (1-47. att.) un Arktikā (1-48. att.)), kuros ozona stratosfērā praktiski nav. Ozona caurumu Antarktīdā 1985. gadā atklāja britu ģeofiziķi, apstrādājot iepriekšējos gados antarktiskajās stacijās iegūtos mērījumus. Kopš 20. gadsimta beigām ievērojams ozona deficīts konstatēts arī Arktikā un tai pieguļošajos ģeogrāfiskajos reģionos (1-48. att.). Ozona caurumi ir ļoti mainīgi gan laikā, gan telpā, taču to kopīgais laukums, kas raksturo globālo ozona deficītu Zemes atmosfērā, laikā no 1980. līdz 1995. gadam ir ievērojami pieaudzis (1-46. att.). Pašlaik novērojama tā zināma stabilizācija (bet nekādā gadījumā ne samazināšanās), kas varētu būt saistīta ar industriālā atmosfēras piesārņojuma ierobežošanu globālā mērogā.

Oglekļa dioksīds jeb ogleškābā gāze (CO_2) un **metāns** (CH_4). Ogleškābās gāzes vidējā koncentrācija atmosfērā ir nosacīti stabila (0,041 %). Tās galvenie avoti ir okeāns, vulkānisms, fosilo degvielu dedzināšana un biosfēra (elpošana), galvenie patērētāji – biosfēra (fotosintēze) un ģeoloģiskie procesi (karbonātiežu veidošanās). Ogleškābās gāzes ietekme uz termodinamiskajiem procesiem Zemes atmosfērā atšķiras no iepriekš apskatītās ūdens tvaika un ozona ietekmes, jo oglekļa dioksīdam ir plata intensīvas absorbcijas josla (10–20) μm viļņu garumu diapazonā (1-49. att.). Tas izraisa t. s. siltumnīcas efektu, jo ogleškābā gāze spēcīgi absorbē Zemes elektromagnētiskā starojuma reemisiju infrasarkanajā diapazonā.

Kopš 19. gadsimta oglekļa dioksīda daudzums atmosfērā vienmērīgi pieaug, kas izraisa arī siltumnīcas efekta pastiprināšanos, tādējādi veicinot globālo sasilšanu. Globālās sasilšanas parādība būtu vēl daudz straujāka, ja ogleškābā gāze nešķīstu okeānu ūdenī, kas regulē šīs gāzes daudzumu Zemes atmosfērā. Okeānos ir izšķīduši aptuveni 99 % no atmosfērā un hidrosfērā sastopamā oglekļa dioksīda daudzuma.

Arī metāns (CH_4) ir gāze, kas pastiprina siltumnīcas efektu. Globālās sasilšanas dēļ kust arktiskie ledāji un mūžīgā sasaluma apgabali Sibīrijas un Kanādas ziemeļu tundrā, atbrīvojot atmosfērā ievērojamu metāna daudzumu, kas līdz šim bijis paslēpts zem mūžīgā sasaluma ledus slāņa. Tas savukārt palielina globālās sasilšanas tempu uz mūsu planētas.

1.6.3. Atmosfēras blīvums un spiediens

Atmosfēras spiediena atkarību no augstuma virs Zemes virsmas modelē [2], izmantojot loģisku spriedumu, ka augstumā h spiedienu rada tikai gāzu stabiņa (1-50. att.) augšējā daļa. Turklāt, augstumam h palielinoties par lielumu dh , spiediens samazinās par iesvītrotā “kluciša” radīto spiedienu (svaru), t. i.,

$$-dp = \rho g dh$$

kur ρ – atmosfēras blīvums augstumā h , g – brīvās krišanas paātrinājums. Sakarību starp spiedienu p un blīvumu ρ nosaka [1] Boila-Mariota likums

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0}$$

kur $p_0 = p(h=0)$ un $\rho_0 = \rho(h=0)$.

Tātad

$$dp = -p \frac{\rho_0}{p_0} g dh$$

ko integrējot

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} g \int_0^h dh$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\rho_0 g h}{p_0}$$

jeb

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right) \quad (1.149.)$$

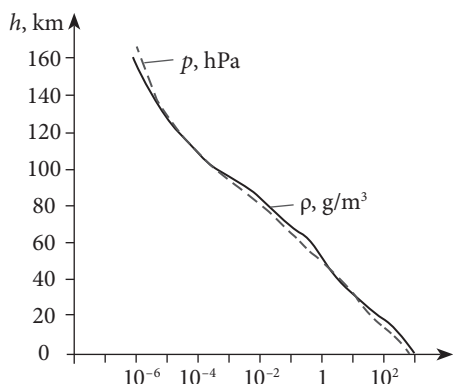
kur konstante $H = p_0 / \rho_0 g \cong 8,4$ km, bet $p_0 = 1013,2$ hPa (pie Zemes virsmas vidējās temperatūras $T_0 = +15$ °C). No Boila-Mariota likuma savukārt izriet, ka

$$\rho = p \frac{\rho_0}{p_0} = \rho_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right) \quad (1.150.)$$

Formulas (1.149.) un (1.150.) apraksta tuvinātu, bet kvalitatīvi precīzu atmosfēras spiediena p un blīvuma ρ atkarības no augstuma h matemātisko modeli t. s. plakanparalēlajā tuvinājumā. Ja šis modelis būtu pavisam precīzs, tad spiediena un blīvuma grafikiem loģaritmiska mēroga izmantošanas gadījumā būtu jābūt taisnēm. Taču reālā gadījumā šie grafiki atbilstoši ICAO³² (Starptautiskās Civilās aviācijas organizācijas) standarta atmosfēras precīzajam modelim (1-51. att.) nedaudz atšķiras no lineāriem. Taču pārsvarā Zemes atmosfēras spiediens p un blīvums ρ , augstumam h palielinoties, samazinās eksponenciāli, t. i., h pieaugot par $H \cong 8,4$ km, p un ρ samazinās $e \cong 2,718$ reizes.

Izmantojot formulas (1.149.) un (1.150.), nav grūti aprēķināt, ka puse no Zemes atmosfēras masas atrodas zem ~ 500 hPa spiediena līmeņa jeb slānī zem $h = 5,5$ km. 31 km augstumā ~ 1 % Zemes atmosfēras masas atrodas virs šī līmeņa, 50 km augstumā spiediens ir $p = 1$ hPa un tikai $\sim 0,1$ % atmosfēras masas atrodas vēl augstāk.

Nobeigumā īss atgādinājums par atmosfēras spiediena dažādajām (bet bie-



1-51. att. Atmosfēras spiediena un blīvuma atkarība no augstuma.

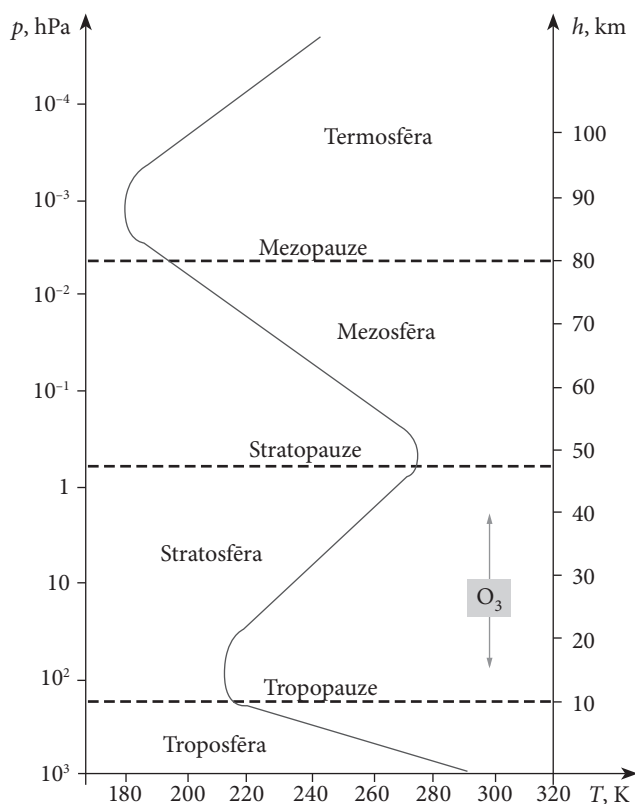
32 ICAO – International Civil Aviation Organization.

ži izmantotajām) mērvienībām: $1 \text{ Pa (paskāls)} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar (bāru)}$, no kurienes $1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}$. Savukārt milimetrs dzīvsudraba stabiņa $1 \text{ mm Hg} \approx 133,322 \text{ Pa}$, fiziskā atmosfēra $1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 101325 \text{ Pa}$. Turklāt tiek lietota arī t. s. tehniskā atmosfēra $1 \text{ Atm} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 98066,5 \text{ Pa}$.

1.6.4. Temperatūras sadalījums atmosfērā

Temperatūras T sadalījums atmosfērā ievērojami atšķiras no spiediena un blīvuma eksponenciālajām izmaiņām atkarībā no augstuma h virs Zemes virsmas (skat. 1-52. att.).

Pie Zemes virsmas ir silts (vidēji $+15^\circ \text{C}$), jo tā absorbē Saules elektromagnētisko starojumu un notiek intensīva reemisija infrasarkanajā diapazonā (kā arī konvektīvi procesi), kas sasilda atmosfēras apakšējo slāni, ko sauc par troposfēru. Troposfēra ir mitra, jo satur praktiski visu ūdens (H_2O) daudzumu, kas pieejams Zemes atmosfērā. Palielinoties augstumam h virs Zemes virsmas, troposfēras temperatūra samazinās par 6°C līdz 8°C uz katru kilometru, nokrītot līdz aptuveni -50°C 10 km augstumā. Troposfērā ir izteiktas vertikālās cirkulācijas, jo mazāk blīvais siltais gaiss ceļas uz augšu blīvākajā vēsākajā gaisā. Taču šīs vertikālās cirkulācijas ir telpiski daudz mazākas par horizontālajām cirkulācijām (cikloniem, anticikloniem), kas tāpat veidojas troposfērā. Nereti novērojami arī nelieli horizontāli virpuļi (orkāni, tornado), plūsmas (pasāti) un citas meteoroloģiskas parādī-



1-52. att. Temperatūras sadalījums atmosfērā mērenajā klimatiskajā zonā.

bas. Reizēm veidojas temperatūras inversijas, kas aptur vertikālās cirkulācijas, formējot slāņveida (mākoņu) struktūras. Citiem vārdiem, troposfēra ir tas atmosfēras slānis, ko var uzskatīt par “meteoroloģisko virtuvi”, tajā formējas un noris galvenie klimatiskie procesi un meteoroloģiskās parādības.

Aptuveni 8 km augstumā (polārajos apgabalos) un 15 km augstumā (ekvatoriālajā zonā) temperatūras samazināšanās, palielinoties augstumam h , izbeidzas, un aptuveni 10 km augstumā atmosfēras temperatūra daudz nemainās (tās faktiskā vērtība ir ļoti atkarīga no ģeogrāfiskās zonas un meteoroloģiskajiem apstākļiem). Šo Zemes atmosfēras starpslāni sauc par tropopauzi, tajā strauji samazinās mitrums (H_2O koncentrācija) un strauji pieaug ozona daudzums (O_3 koncentrācija).

Nākamais atmosfēras slānis, ko sauc par stratosfēru, atrodas aptuveni 15 km līdz 50 km augstumā. Stratosfēra ir temperatūras inversijas apgabals, jo tajā, palielinoties augstumam h , temperatūra pieaug, sasniedzot 50 km augstumā gandrīz tādu pat vērtību kā uz Zemes virsmas. Stratosfēras uzsilšanas cēlonis ir Saules elektromagnētiskā starojuma absorbcija ozona O_3 slānī, kas arī koncentrēties 10 km līdz 50 km augstumā. Šis atmosfēras slānis ir sauss (praktiski nesatur H_2O) un bez vertikālām cirkulācijām. Ar ozonu bagātais un sauss stratosfēras gaiss slikti jauca ar mitro troposfēras gaisu, formējot tādu kā “vāku” virs troposfēras un ierobežojot meteoroloģisko procesu formēšanās apgabalu. Visam, kas novērojams stratosfērā, ir izteikti slāņaina struktūra (aerosolu slāņiem, ledus kristāliņu t. s. perlamutra mākoņiem 20 km līdz 30 km augstumā u. c.), jo tajā nav vertikālo cirkulāciju. Atmosfēras ķīmiskais sastāvs stratosfērā ir tāds pats kā troposfērā, izņemot atšķirības O_3 un H_2O koncentrācijā.

Atmosfēras starpslāni 50 km līdz 55 km augstumā, kur temperatūra ir gandrīz tāda pati kā uz Zemes virsmas, sauc par stratopauzi. Šajā slānī atmosfēras temperatūra daudz nemainās atkarībā no augstuma virs Zemes virsmas. Taču atšķirībā no troposfēras apakšējā slāņa siltums šeit nav izteikti sajūtams lielā retinājuma dēļ, un temperatūra tiek noteikta kinētiskās temperatūras nozīmē.

Atmosfēras slānī, kas atrodas 55 km līdz 80 km augstumā virs Zemes virsmas, temperatūra atkal pazeminās, pieaugot augstumam h . Šo slāni sauc par mezofēru, un, lai arī atmosfēras spiediens tajā ir ļoti zems, atmosfēras ķīmiskais sastāvs joprojām ir bez būtiskām izmaiņām.

Aiz mezofēras seko atmosfēras starpslānis, ko sauc par mezopauzi, ar maz mainīgu, aptuveni $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūru. Tā ir viszemākā temperatūra atmosfērā, un faktiski šeit beidzas ķīmiski stabilā Zemes atmosfēra. Tāpēc atmosfēras slāni no Zemes virsmas līdz mezopauzei dēvē arī par homosfēru.

Tālāk seko t. s. termosfēra, kurā temperatūra (kinētiskās temperatūras nozīmē) zemā blīvuma dēļ (un molekulām absorbējot Saules elektromagnētiskā starojuma kvantus) atkal pieaug, attālinoties no Zemes virsmas, sasniedzot samērā ekstrēmu 500 K līdz 2000 K vērtību. Atmosfēras ķīmiskais sastāvs šajā slānī ir mainīgs un nenoteikts un, pieaugot augstumam, dominē jonosfēra (no 50 km augstuma pastāvoša jonizētas atmosfēras komponente), ko ļoti ietekmē mijiedarbība ar Saules vēju. Abus kopā šos atmosfēras slāņus nereti dēvē par heterosfēru (t. i., nestabilo atmosfēras daļu).

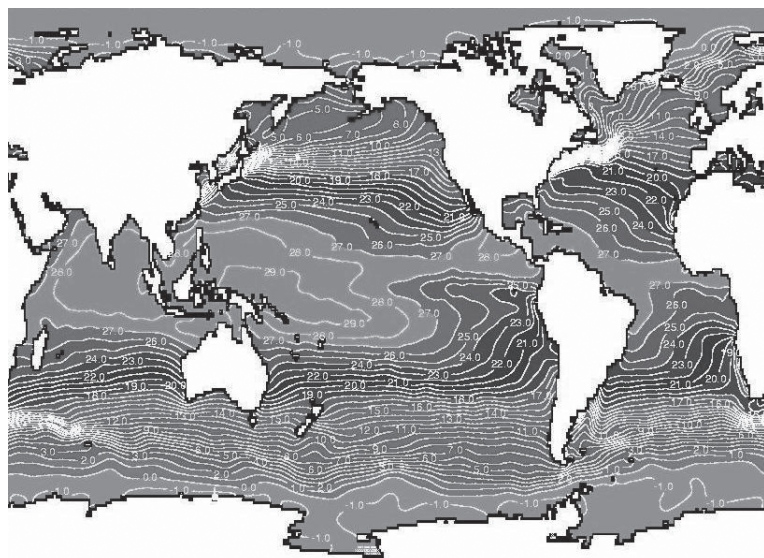
Zemes atmosfēra tādējādi tiek strukturēta četros slāņos: troposfērā, stratosfērā, mezofērā un termosfērā (ar atšķirīgiem temperatūras izmaiņas režīmiem atkarībā no augstuma h), ko atdala trīs starpslāņi: tropopauze, stratopauze un mezopauze (kuros temperatūra

gandrīz nemainās). Citiem vārdiem, šī klasifikācija ir veidota, balstoties uz temperatūras izmaiņu īpatnībām Zemes atmosfērā.

Nobeigumā dažas piezīmes par ozona slāņa nozīmi Zemes atmosfērā un tā izmaiņu ietekmi uz klimatiskajiem un meteoroloģiskajiem procesiem. Ozona slānis ir iesaistīts vairākos klimata stabilitātes procesos, no kuriem svarīgākie ir divi. Pirmkārt, ozona slānis, absorbējot Saules jonizējošo ultravioleto starojumu, aizsargā Zemes dzīvības formas no tā kaitīgās ietekmes. Šī absorbcija arī izkļiedē ievērojamu Saules enerģijas plūsmas daļu stratosfērā (to uzsildot) un neļauj tai nonākt līdz Zemes virsmai, pasargājot to no pārkaršanas (kaitīgās globālās sasilšanas). Otrkārt, uzsildot stratosfēru, veidojas tās lamināri slāņainā struktūra, kas telpiski ierobežo konvektīvos procesus troposfērā un meteoroloģisko procesu intensitāti Zemes virsmas tuvumā. Samazinoties ozona daudzumam jonosfērā, tā atdziest, ļaujot klimatiskajiem un meteoroloģiskajiem procesiem attīstīties daudz biežākā troposfēras slānī. Šādos apstākļos meteoroloģisko procesu intensitāte būtiski pastiprinās (agrāk nebijuša stipruma vētras, palielināts nokrišņu daudzums un plūdi vienos, karstums un sausums citos planētas reģionos u. c. ekstrēmas parādības), ko arī nepārprotami novērojam 21. gadsimta pirmajās desmitgadēs.

1.6.5. Hidrosfēra

Par hidrosfēru sauc visu uz Zemes pieejamā ūdens daudzumu, kas sastopams gan okeānos un jūrās, gan atmosfērā, gan zem zemes, ledājos un biosfērā. Lielākā daļa no šī ūdens daudzuma, protams, atrodama okeānos un jūrās, kuru virsma veido 72 % no mūsu planētas kopējās virsmas. Atmosfēras un okeānu procesu modelēšana, kā arī hidroloģisko ciklu pētījumi pārliecinoši rāda, ka atmosfēra un hidrosfēra veido cieši saistītu fizikālu sistēmu, kuras pareiza izpratne nav iespējama, analizējot atsevišķi tikai kādu no tās komponentēm. Komplicētais temperatūras sadalījums pasaules okeānos (1-53. att.), siltuma pārnese no



1-53. att. Temperatūras sadalījums pasaules okeānos.

okeāna uz atmosfēru un otrādi, nokrišņu dinamika, kas saistīta ar latentā siltuma izdalīšanos (vai absorbciju) un citi savstarpēji saistīti termodinamiskie procesi padara neiespējamu dalītu atmosfēras un okeāna procesu adekvātu analīzi. Tādēļ īsi iepazīsimies ar galvenajiem mūsu planētas hidrosfēras parametriem.

Ūdens tvaiki atmosfērā veido tikai 0,001 % no kopējās ūdens masas hidrosfērā. Lielākais ūdens daudzums uz Zemes atrodams:

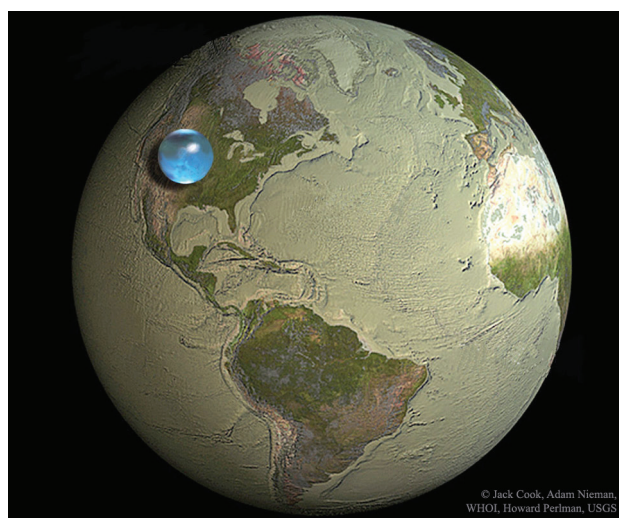
- okeānos (97 %);
- ledājos (2,4 %);
- gruntsūdeņos (0,6 %).

Kopējais saldūdens daudzums hidrosfērā nepārsniedz 2,5 %. Hidrosfēras pilnā masa ir aptuveni $1,4 \cdot 10^{21}$ kg, bet tās tilpums vienāds ar $1400 \cdot 10^6$ km³. 1-3. tabulā apkopotas galvenās hidrosfēras komponentes un daži to raksturlielumi.

Lai arī Zemes hidrosfēras apjoma absolūtie skaitļi šķiet iespaidīgi, tā tomēr veido tikai relatīvi nelielu daļu no mūsu planētas kopējā tilpuma un masas (1-54. att.).

1-3. tab. Zemes hidrosfēras galvenās komponentes.

Komponente	Tilpums [km ³]	Ekv. biezums [m]	"Dzīves ilgums"
Okeāni un jūras	$1370 \cdot 10^6$	2500	~4000 gadu
Ledāji	$30 \cdot 10^6$	60	~10 000 gadu
Gruntsūdeņi	$4 \cdot 10^6$	8	dienas
Saldūdens ezeri	$125 \cdot 10^3$	0,25	gadsimti
Atmosfēras tvaiks	$13 \cdot 10^3$	0,025	8 līdz 10 dienas
Mitrums zemē	6500	0,013	15 līdz 350 dienas
Purvi	3600	0,007	gadi
Ūpes	1700	0,003	~15 dienas
Ūdens dzīvās būtnēs	700	0,001	nedēļas



1-54. att. Zemes hidrosfēras relatīvais apjoms.

Par hidroloģisko ciklu sauc labi zināmo ūdens aprīņojumu dabā, un to būtiski ietekmē:

- iztvaikošanas un nokrišņu dinamika;
- Saules elektromagnētiskā starojuma plūsmas izkliede, absorbcija un reemisija (t. i., Zemes virsmas, mākoņu un atmosfēras infrasarkanais starojums);
- cirkulācijas Zemes atmosfērā, kas pārvieto lielu enerģijas daudzumus;
- dažādi lokālie meteoroloģiskie procesi.

Atmosfēras gaisā, kā jau tika atzīmēts, vidēji ir izšķīdis tikai 0,001 % jeb 13 000 km³ no kopējā hidrosfēras ūdens daudzuma. Iztvaikošanas ātrums ir vidēji ap 250 km³ diennaktī. Nokrišņus aptuveni 65 % apmērā veido no okeāniem iztvaikojušais ūdens, pārējais ir nācis no veģetācijas un iztvaikošanas virs cietzemes. Gan iztvaikošana, gan nokrišņi ir lieli enerģijas pārnēsēji (tie saistīti arī ar apjomīgu latentu siltumu), kas sasaista atmosfēras un okeāna termodinamiskos procesus.

1.7. Starojuma mijiedarbība ar atmosfēru (8. lekcija)

1.7.1. Kopsavilkums

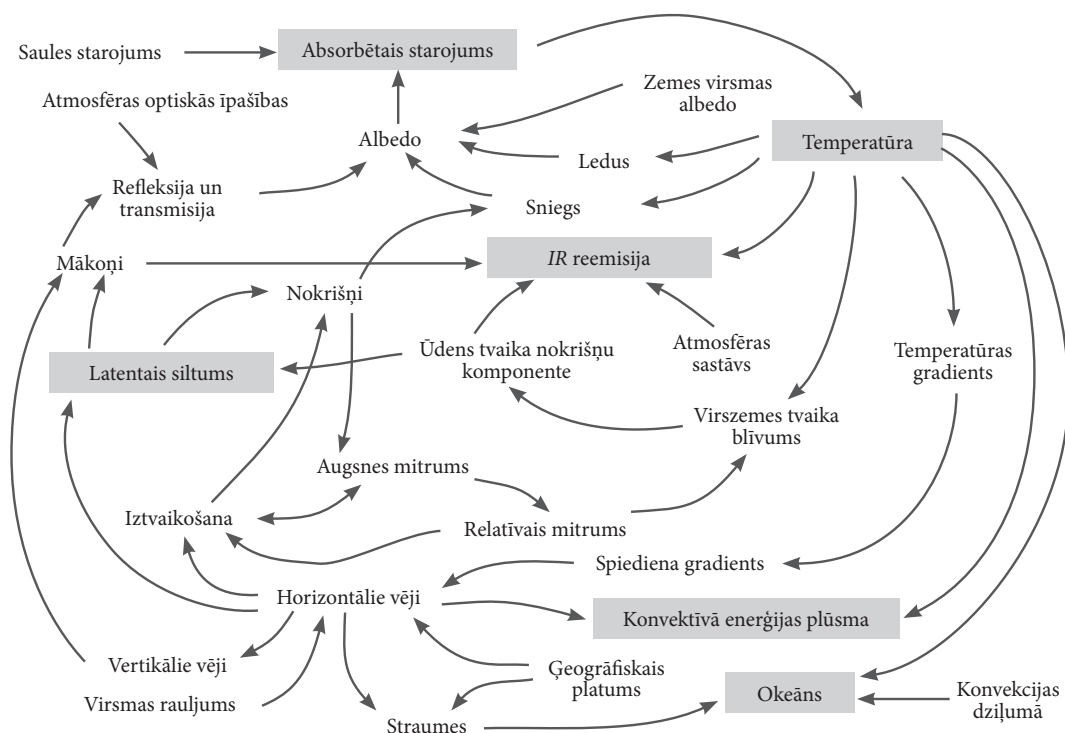
Saules elektromagnētiskā starojuma mijiedarbība ar Zemes atmosfēras komponentēm ir visai daudzveidīga. Lai izprastu kaut vai tikai difūzo izkliedi atmosfērā, jāpiemēro trīs dažādi un savstarpēji atšķirīgi matemātiskie modeļi. Tādēļ iepazīsimies tikai ar svarīgākajiem šīs mijiedarbības aspektiem, tiem, ko biežāk izmanto, interpretējot tālīzpētes mērījumu rezultātus.

1.7.2. Starojuma termodinamiskais līdzsvars

Procesus, kas notiek atmosfērā un hidrosfērā, darbina “siltuma motors”. Siltums enerģijas plūsmas veidā nāk no Saules, galvenokārt tās spektra īsviļņu diapazonā, bet aizplūst galvenokārt infrasarkanajā diapazonā. Reālā termodinamiskā mijiedarbība un procesi Zemes atmosfērā ir ļoti komplicēti (1-55. att.) un, iespējams, ne visi līdz galam izprasti.

Taču galvenie šīs mijiedarbības faktori ir šādi:

- difūzā refleksija no mākoņiem, kas maina planētas albedo (skat. 1.4.4. sadaļu);
- Saules radiācijas absorbcija atmosfēras gāzēs (ozonā O_3 – stratosfērā un ūdens tvaikā H_2O – troposfērā);
- Zemes reemisijas (jeb atpakaļstarojuma) *IR* diapazonā absorbcija (t. s. siltumnīcas



1-55. att. Termodinamiskie procesi Zemes atmosfērā.

efekts) atmosfēras gāzēs (CO_2 , CH_4 , H_2O , O_3);

- Zemes IR atpakaļstarojuma absorbcija mākoņos, kas siltumnīcas efektu vēl pastiprina.

Turklāt aptuveni 51 % Saules enerģijas plūsmas absorbē Zemes cietā un šķidrā (okeānu) virsma, kas pēc tam tiek izstarota atpakaļ infrasarkanā starojuma veidā. 1-56. att. redzami arī citi galvenie siltuma enerģijas apmaiņas procesi Zemes atmosfērā un to relatīvā ietekme uz tās termodinamisko līdzsvaru.

Kā noskaidrots iepriekš (skat. 1.2.8. sadaļu), apstarojumu Zemes orbītas rādiusa attālumā no Saules (uz laukuma vienību, kas novietota perpendikulāri virzienam uz Sauli) nosaka t. s. solārkonstante, kuras tuvināta vērtība ir

$$A_{\odot} = 1,37 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$$

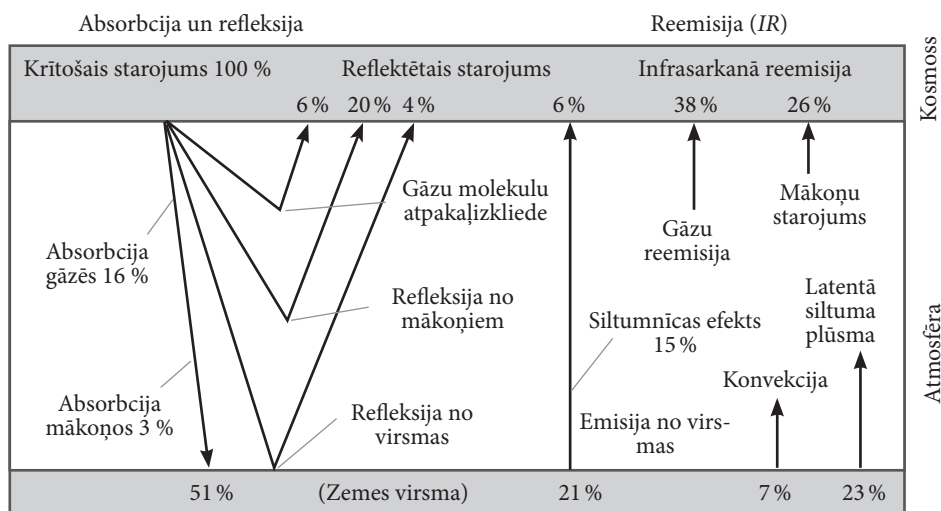
Tā ir ļoti liela apstarojuma vērtība, kas atbilst intensīvai enerģijas plūsmai no Saules. Taču refleksija no mākoņiem, citām atmosfēras komponentēm un Zemes virsmas, ko raksturo Zemes t. s. planētas albedo (skat. 1.4.4. sadaļu) $\bar{k}_{\oplus} \cong 30 \%$, samazina šo apstarojuma vērtību līdz aptuveni

$$A'_{\odot} = (1 - \bar{k}_{\oplus}) A_{\odot} \cong 966 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.151.)$$

Apstarojumu $A'_{\odot}$ absorbē Zemes virsma un atmosfēra, lai pēc tam to reemitētu IR diapazonā ar vidējo spīdību

$$R_{\oplus} = (1 - \bar{k}_{\oplus}) A_{\odot} \frac{S_A}{S_{\oplus}} = (1 - \bar{k}_{\oplus}) A_{\odot} \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi R_{\oplus}^2} = (1 - \bar{k}_{\oplus}) \frac{A_{\odot}}{4} \cong 241 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.152.)$$

kur S_A – apstarotais laukums, $S_{\oplus}$ – Zemes virsmas laukums, $R_{\oplus}$ – Zemes vidējais rādiuss. Tātad, lai iestātos termodinamiskais (enerģētiskais) līdzsvars, katram Zemes virsmas kvadrātmetram IR diapazonā jāizstaro 241 W liela enerģijas plūsma (citādi Zeme uzkarstīs), un tā jānovada apkārtējā kosmiskajā telpā.



1-56. att. Enerģijas apmaiņas procesi Zemes atmosfērā.

Saskaņā ar 1-56. att. 16 % apstarojuma $A_{\odot}$ absorbē atmosfēras gāzes un aerosoli, 3 % absorbē mākoņi, bet 51 % sasniedz un tiek absorbēts uz Zemes virsmas. Reemisija *IR* diapazonā ar vidējo spīdību (1.152.) arī ir daudzpakāpju process, kas parādīts 1-56. att. labajā pusē. Tiešais *IR* starojums aiznes no Zemes virsmas 21 % no absorbētajiem 51 % apstarojuma $A_{\odot}$, taču tikai 6 % no tā nokļūst apkārtējā kosmiskajā telpā, jo 15 % absorbē atmosfēras gāzes, īpaši CO_2 (siltumnīcas efekta dēļ). Konvektīvā siltuma plūsma Zemes virsmu atbrīvo vēl no 7 %, latentā siltuma plūsma (iztvaikošanas un kušanas fāžu pārejas ūdenim) – vēl no 23 % absorbētā 51 % starojuma. Tādējādi reemisijas rezultātā atmosfērā nonāk liels siltuma daudzums ($15 \% + 7 \% + 23 \% = 45 \%$), kas pievienojas tiešās absorbcijas ($16 \% + 3 \% = 19 \%$) siltuma daudzumam. No šī ievērojamā siltuma enerģijas daudzuma ($45 \% + 19 \% = 64 \%$) Zemes atmosfēra atbrīvojas atmosfēras gāzu *IR* reemisijas (38 %) un mākoņu *IR* reemisijas (26 %) rezultātā.

Lokālā nozīmē, protams, novērojama izteikta nehomogenitāte. Atsevišķi Zemes virsmas apgabali pieminēto procesu rezultātā uzsilst, citi savukārt atdziest, jo liela nozīme ir lokālajiem klimatiskajiem un meteoroloģiskajiem apstākļiem. Taču globālā nozīmē faktiskais temperatūras līdzsvars (ar vidējo Zemes virsmas temperatūru $+15^{\circ}\text{C}$) var nostabilizēties tikai tad, ja reemisija notiek ar vidējo spīdību, kas nedaudz pārsniedz (1.152.) noteikto vērtību, jo Zeme, līdzīgi Jupiteram un citām planētām, tomēr nav termodinamiskā līdzsvarā ar apkārtējo vidi.

1.7.3. Aerosoli

Aerosoli ir sīkas dažāda ķīmiskā sastāva daļiņas Zemes atmosfērā. To nozīmi nosaka tas, ka:

- difūzā izkliede uz tiem bieži korelē ar dažādām parādībām atmosfērā, tādējādi to izmanto atmosfēras pētniecības tālizpētes sistēmās;
- tie kalpo par kondensācijas centriem mākoņu veidošanās procesā un tādējādi ietekmē nokrišņus un meteoroloģisko procesu norisi;
- tie nedaudz (salīdzinājumā ar atmosfēras gāzēm un mākoņiem) absorbē un izkliedē Saules elektromagnētisko starojumu un izmaina enerģētisko bilanci atmosfērā, tā ietekmējot klimatu un ar to saistītās parādības atmosfērā.

Aerosolu izcelsmes avots ir Zemes virsma. To sastāvs var būt visai daudzveidīgs, taču visbiežāk tie ir Zemes virskārtas putekļi, dūmi, vulkāniskas izcelsmes daļiņas vai sāls putekļi, kas veidojušies, iztvaikojot sīkiem okeāna ūdens pilieniem. Šie sāls putekļi parasti ir nātrijs Na un magnijs Mg hlorīda daļiņas, kas ir higroskopiskas un bieži katalizē mākoņu veidošanos.

Aerosoli sastopami tikai troposfērā, kur tos no Zemes virsmas paceļ troposfēras vertikālās cirkulācijas. Īpaši daudz aerosolu sastopams troposfēras zemajos slāņos līdz 1 km augstumam. To koncentrācija var būt ļoti dažāda: virs okeāniem novērojamais aerosolu daļiņu skaits parasti ir 10^3 cm^{-3} , virs cietzemes – 10^4 cm^{-3} , savukārt virs pilsētām – 10^5 cm^{-3} . Turklāt aerosolu koncentrācija samazinās, pieaugot attālumam no Zemes virsmas.

Aerosolus Zemes atmosfērā veido galvenokārt cietas daļiņas, bet atsevišķos gadījumos tie var būt arī sīki pilieniņi. Aerosolus klasificē pēc to sastāva un arī izmēra:

- vissīkākās aerosolu daļiņas ($0,005 \mu\text{m}$ līdz $0,2 \mu\text{m}$) dēvē par Aitkena kodoliem;

- daļiņas, kuru izmērs ir $0,2\ \mu\text{m}$ līdz $1,0\ \mu\text{m}$, dēvē par lielajiem kodoliem;
- daļiņas, kuru izmērs ir virs $1,0\ \mu\text{m}$, sauc par ļoti lielajiem kodoliem.

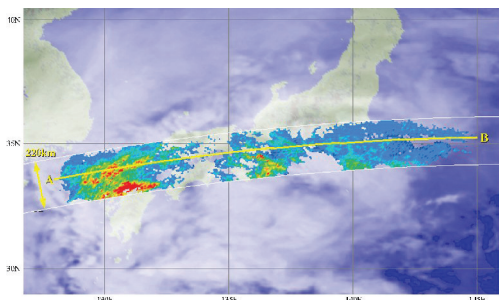
Aerosolu kodolu koncentrācija troposfērā arī ir būtiski atkarīga no to izmēriem. Visvairāk ir sīko Aitkena kodolu ($10^3\ \text{cm}^{-3}$ līdz $10^5\ \text{cm}^{-3}$), daudz mazāk sastopami lielie kodoli ($\sim 100\ \text{cm}^{-3}$), bet pavisam maz ir ļoti lielo kodolu ($\sim 1\ \text{cm}^{-3}$).

Aerosolu mijiedarbība ar Saules elektromagnētisko starojumu visvairāk izpaužas kā difūzā izkliede spektra redzamajā diapazonā uz daļiņām, kuru izmērs ir $0,2\ \mu\text{m}$ līdz $2,0\ \mu\text{m}$. Infrasarkanajā diapazonā difūzā izkliede vēl ir novērojama, bet tā ir neliela. Mikroviļņu diapazonā šādas izkļedes vairs praktiski nav.

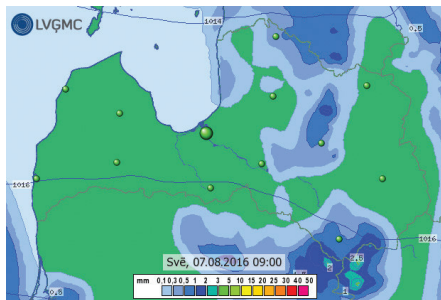
1.7.4. Mākoņi un nokrišņi

Mākoņi sastāv no sīkiem pilieniņiem un/vai ledus kristāliņiem, kas formējas uz kondensācijas centriem. Tipiska šo daļiņu koncentrācija mākoņos ir aptuveni $100\ \text{cm}^{-3}$. Virs cietzemes, kur aerosoli satur nelielu higroskopisko sāls putekļu komponenti, tikai $\sim 1\%$ aerosolu kalpo par mākoņu kondensācijas centriem, virs okeāniem, kur ir daudz higroskopisko sāls putekļu, līdz 20% aerosolu piedalās mākoņu formēšanā. Atšķirīgi ir arī mākoņu pilieniņu raksturīgie izmēri virs cietzemes un okeāniem. Virs cietzemes mākoņu pilieniņu izmērs visbiežāk ir $2\ \mu\text{m}$ līdz $10\ \mu\text{m}$, savukārt virs okeāniem no $3\ \mu\text{m}$ līdz $22\ \mu\text{m}$ atsevišķos gadījumos – līdz $30\ \mu\text{m}$. Sākot no $100\ \mu\text{m}$, pilieniņus jau dēvē par lietus pilēm, jo gaisa vertikālās cirkulācijas mākoņos tos vairs ne vienmēr spēj noturēt. Mākoņi izsauc stipru difūzo izkļedi redzamās gaismas un infrasarkanajā diapazonā, bet tie ir caurspīdīgi mikroviļņu diapazonā. Mākoņi arī paši spēcīgi staro infrasarkanajā un nedaudz mikroviļņu diapazonā.

Nokrišņi veidojas, palielinoties mākoņu pilieniņu izmēram. Sākotnējo pilieniņu palielināšanos (līdz $30\ \mu\text{m}$) izraisa kondensācija. Taču, sasniedzot aptuveni $18\ \mu\text{m}$ līdz $20\ \mu\text{m}$ izmēru, pilieniņi sāk apvienoties un palielināt savus izmērus arī sadursmju rezultātā. $30\ \mu\text{m}$ un lielākiem pilieniņiem sadursmes jau kļūst par dominējošo procesu, kas nosaka pilieniņu izmēru pieaugšanu. Aukstos mākoņos notiek sniegpārslu kristalizācija un nokrišņu veidošanās procesi ir komplicētāki. Mākoņos, kuru temperatūra ir aptuveni $0\ ^\circ\text{C}$ ūdens pilieniņi iztvaiko un kristalizējas tieši uz ledus kristāliņiem (jo mitruma piesātinātība ir atšķirīga ūdens šķidrām un ledus kristāliskām virsmām). Krītot zemāk siltākos gaisa slā-



1-57. att. Lietus infrasarkanā starojuma mērījumi no satelīta.



1-58. att. Lietus intensitātes mērījumi, izmantojot nokrišņu radaru.

nos, šie ledus kristāliņi nereti izkūst un, absorbējot latentu siltumu, veido aukstu lietu. Šo nokrišņu veidošanās scenāriju sauc par Beržerona-Findeisona procesu.

Atkarībā no ūdens pilieniņu ģeometriskajiem izmēriem tos var klasificēt šādi:

- līdz $100\ \mu\text{m}$ – mākoņu daļiņas;
- no $100\ \mu\text{m}$ līdz $250\ \mu\text{m}$ – smidzināšana;
- no $250\ \mu\text{m}$ līdz $2500\ \mu\text{m}$ – lietus.

Smidzināšana nāk no plāniem, parasti dažus simtus metru bieziem mākoņiem. Lietus savukārt nāk no bieziem (nereti līdz $10\ \text{km}$), spēcīgu vertikālo gaisa cirkulāciju veidotiem konvektīviem mākoņiem, kas spēj noturēt gaisā relatīvi lielus ūdens pilienus. Lai veidotos krusa, vajadzīgas ļoti spēcīgas vertikālās cirkulācijas, kādas parasti formējas negaisa mākoņos.

Nokrišņiem lietus formā ir raksturīgs spēcīgs infrasarkanais starojums, ko var viegli reģistrēt ar satelītu IR^{33} sensoriem un izmantot šo informāciju lietusgāzu stipruma novērtēšanai (1-57. att.). Līdzīgi lietusgāzu intensitāti var novērtēt, arī izmērot radara mikroviļņu signāla difūzo izkliedi uz lielajiem lietus pilieniem. Šo tehnoloģiju lieto t. s. nokrišņu radaros, kādus izmanto arī Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrā (LVĢMC) (skat. 1-58. att.).

1.7.5. Difūzā izklide atmosfērā

No iepriekšējā izklāsta izriet, ka difūzā izklide³⁴. Zemes atmosfērā notiek uz ļoti dažāda izmēra daļiņām, proti:

- gāzu molekulām, kuru izmērs ir aptuveni $10^{-4}\ \mu\text{m}$;
- aerosoliem, kuru izmērs ir aptuveni no $10^{-2}\ \mu\text{m}$ līdz $1,0\ \mu\text{m}$;
- mākoņu pilieniņiem, kuru izmērs ir aptuveni no $1\ \mu\text{m}$ līdz $10\ \mu\text{m}$;
- ledus kristāliņiem mākoņos, kuru izmērs ir aptuveni no $1\ \mu\text{m}$ līdz $100\ \mu\text{m}$;
- lietus pilieniņiem, kuru izmērs ir aptuveni no $100\ \mu\text{m}$ līdz $2500\ \mu\text{m}$;
- sniegpārslīņām, kuru izmērs ir aptuveni no $1\ \text{mm}$ līdz $10\ \text{mm}$;
- krusas graudiem, kuru izmērs ir aptuveni līdz $10\ \text{cm}$.

Saules elektromagnētiskais starojums savukārt aptver plašu viļņu garumu spektru no ultravioletā diapazona (λ ir no $0,2\ \mu\text{m}$ līdz $0,4\ \mu\text{m}$) līdz mikroviļņu diapazonam (λ ir no $1\ \text{mm}$ līdz $100\ \text{mm}$). Tādējādi dažādām atmosfēru veidojošajām daļiņām ar ģeometriskajiem izmēriem d un dažādiem Saules starojuma viļņu garumiem λ ir iespējamās dažādas to samēru attiecības: gan ($\lambda \gg d$), gan ($\lambda \sim d$), gan ($\lambda \ll d$). Atbilstoši 1.5.4. sadaļā minētajam katram šim gadījumam ir piemērojami atšķirīgi difūzās izklandes matemātiskie modeļi (Releja izklide, Mī izklide, Tindala izklide), kas patieso starojuma difūzās izklandes modelēšanu Zemes atmosfērā padara visai komplicētu. Neiedziļinoties šīs modelēšanas detaļās, ar kurām var iepazīties gan atbilstošos fizikasursos [1, 2, 11], gan zinātniskajās publikācijās [16, 17, 18, 19, 20], atzīmēsim tikai, ka difūzās izklandes tips un īpašības (tostarp virziena diagramma) ir lielā mērā atkarīgas no viena raksturīga parametra

$$\alpha = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (1.153.)$$

³³ IR – *Infrared*.

³⁴ Angļu val. – *scattering*.

Gadījumos, kad:

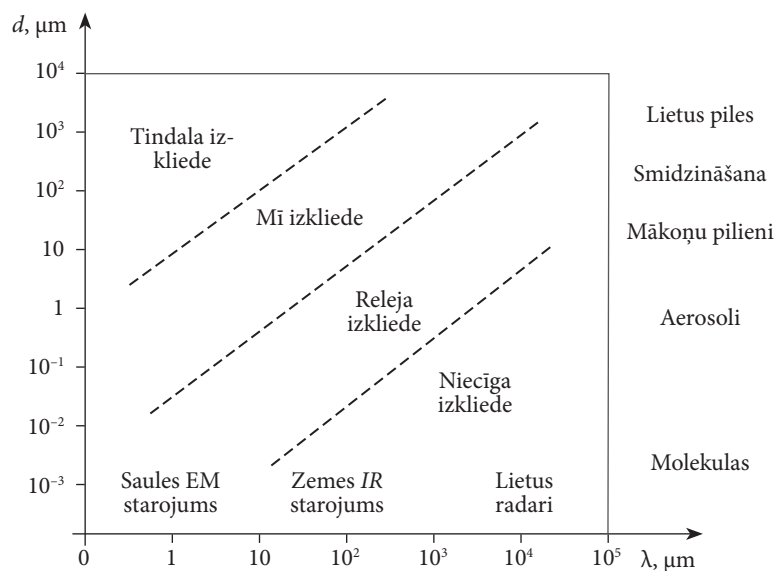
- $\alpha > 50$, piemērojams Tindala jeb neselektīvās izkliedes matemātiskais modelis, kas balstās uz ģeometriskās optikas likumsakarību lietošanu starojuma refleksijai no lieliem objektiem;
- $0,1 < \alpha < 50$, piemērojams Mī izkliedes matemātiskais modelis, kura teorija ir līdzīga absorbcijas teorijas (skat. 1.5.5. sadaļu) matemātiskajiem modeļiem un balstās uz (1.139.) veida vienādojumu izmantošanu;
- $0,001 < \alpha < 0,1$, piemērojams Releja izkliedes matemātiskais modelis, kura pazīstamākā īpašība (kas izskaidro arī debess zilo krāsu) ir izkliedes koeficienta γ apgrieztā proporcionalitāte krītošā starojuma viļņa garuma λ ceturtajai pakāpei, t. i., $\gamma \sim \lambda^{-4}$;
- $\alpha < 0,001$, novērojama niecīga neselektīva izkliede.

Minētie gadījumi uzskatāmi atainoti 1-59. att. diagrammā, kuras labajā pusē atzīmētas atmosfēras daļiņas ar atbilstošajiem raksturīgajiem izmēriem.

Novērojot difūzās izkliedes vai absorbcijas parametrus (t. i., veicot to mērījumus) un izmantojot atbilstošos matemātiskos modeļus, varam iegūt tālīzpētes informāciju par vides fizikālajiem raksturlielumiem (izkliedējošo daļiņu izmēriem d , to koncentrāciju N , kā arī (absorbcijas gadījumos) vides dielektrisko caurlaidību ϵ un tās optisko blīvumu $n = \sqrt{\epsilon}$).

Kā piemēru apskatīsim nokrišņu radara darbības principu, kas balstās uz difūzās izkliedes koeficienta γ_s mērījumiem mikroviļņu diapazonā. Lietus mākonī ir sastopami dažāda izmēra pilieniņi ar rādiusiem $a = d/2$, un šo mākonī var reprezentatīvi raksturot ar pilieniņu koncentrācijas sadalījuma funkciju $N(a)$, kas ļauj aprēķināt gan kopīgo ūdens masu mākonī, gan tā blīvumu. Mikroviļņu difūzās izkliedes koeficients γ_s ir atkarīgs gan no pilieniņu šķēsgriezuma laukuma πa^2 , gan no to koncentrācijas $N(a)$, proti,

$$\gamma_s = \int_0^{\infty} \pi a^2 N(a) da$$



1-59. att. Difūzās izkliedes modeļu piemērojamības apgabali.

Savukārt ūdens masas blīvums lietus mākonī izsakāms kā

$$\rho = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_w N(a) da$$

kur $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ – šķidra ūdens blīvums. Tādējādi, ja ar nokrišņu radaru varam nomērīt izkļiedes koeficientu γ_s , tad no pirmā vienādojuma, kas ir integrālvienādojums, varam aprēķināt pilieniņu koncentrācijas sadalījuma funkciju $N(a)$. Otrais vienādojums ļauj aprēķināt ūdens masas blīvumu pētāmajā lietus mākonī. Šo vienādojumu izmanto nokrišņu intensitātes raksturošanai. Ar šādu metodiku varam izveidot 1-58. att. redzamās nokrišņu intensitātes kartes.

Līdzīgi tiek konstruēti atmosfēras ģeofizikālās izpētes ar tālīzpētes metodēm matemātiskie modeļi arī citos gadījumos.

1.7.6. Spožuma temperatūra

Lai veiktu nokrišņu intensitātes mērījumus no satelītiem, izmantojot infrasarkanā vai mikroviļņu radiometru mērījumus (skat. 1-57. att.), kā arī virknē citu tālīzpētes lietojumu, izmanto atšķirīgu pieeju, kad rēķina t. s. spožuma temperatūru.

Par ķermeņa (objekta) **spožuma temperatūru** sauc tādu absolūti melna ķermeņa (skat. 1.2.6. sadaļu) temperatūru T_s , kura termiskā starojuma spožums (skat. 1.2.5. sadaļu) izvēlētajam viļņa garumam λ ir vienāds ar pētāmā objekta spožumu dotajā virzienā (un pie tā paša viļņa garuma). Tādējādi spožuma temperatūru definē ar sakarību

$$B_{\lambda}^*(T_s) = B_{\lambda}(T)$$

kur T – pētāmā objekta reālā temperatūra, ar zvaigznīti (*) apzīmētais lielums attiecas uz absolūti melnu ķermeni. Izvēloties tādu absolūti melnu ķermeni, kas vienmērīgi staro uz visām pusēm, t. i., izotropu starotāju, varam izmantot formulu (1.48.)

$$B_{\lambda}^*(T_s) = \frac{1}{\pi} R_{\lambda}^*(T_s)$$

kur R_{λ}^* – absolūti melnā ķermeņa spīdība pie izvēlēta viļņa garuma λ . Savukārt saskaņā ar (1.51.) integrālā spīdība ir vienāda ar

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda$$

kur Φ – starojuma enerģijas plūsma, r_{λ} – ķermeņa emisijas spēja. Tādējādi šauras spektrālās joslas $\Delta\lambda$ gadījumā

$$R_{\lambda}^* \cong r_{\lambda}^*(T_s) \Delta\lambda$$

savukārt funkciju $r_{\lambda}^*(T) = f(\lambda, T)$ nosaka Planka formula (1.55.)

$$f(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

kur c – elektrodinamiskā konstante (gaismas ātrums vakuumā), k – Bolcmaņa konstante, h – Planka konstante.

Strādājot ar elektromagnētisko starojumu, kura viļņu garums $\lambda > 14 \mu\text{m}$ (uz šo gadi-

jumu attiecas mikroviļņu starojums un lielākā daļa termiskā infrasarkanā starojuma), ir spēkā nosacījums

$$\lambda \gg \frac{hc}{kT}$$

un eksponenti Planka formulā var tuvināti izvirzīt Teilora rindā

$$e^{hc/kT\lambda} - 1 \cong \frac{hc}{kT\lambda} + \dots$$

kas ļauj vienkāršot Planka formulu šādā veidā

$$f(\lambda, T) \cong \frac{2\pi ck}{\lambda^4} T \quad (1.154.)$$

Šo tuvinājumu sauc par Releja-Džīnsa formulu, un tas ļauj viegli aprēķināt pētāmā objekta spožuma temperatūru T_s , ja veikti tā spožuma B_λ mērījumi, proti,

$$B_\lambda = B_\lambda^*(T_s) = \frac{1}{\pi} R_\lambda^*(T_s) = \frac{1}{\pi} r_\lambda^*(T_s) \Delta\lambda = \frac{1}{\pi} f(\lambda, T_s) \Delta\lambda = \frac{2ck}{\lambda^4} T_s \Delta\lambda$$

no kurienes

$$T_s = B_\lambda \frac{\lambda^4}{2ck\Delta\lambda}$$

Lai noteiktu pētāmā objekta reālo temperatūru, jāatceras, ka (1.59.) reālam ķermenim

$$r_\lambda(T) = a_\lambda f(\lambda, T)$$

kur a_λ – šī ķermeņa absorbcijas spēja, un no $r_\lambda(T) = r_\lambda^*(T_s)$ izriet $a_\lambda f(\lambda, T) = f(\lambda, T_s)$, tādējādi Releja-Džīnsa tuvinājumā (1.154.)

$$a_\lambda T = T_s$$

jeb

$$T = \frac{1}{a_\lambda} T_s$$

Reāliem ķermeņiem $a_\lambda < 1$, tāpēc visos gadījumos $T > T_s$ jeb tālīzpētes objektu reālā temperatūra vienmēr ir augstāka par to spožuma temperatūru.

Šo faktu var efektīvi izmantot nokrišņu monitoringa veikšanai. Okeānu virsmai $a_\lambda \approx 0,5$, savukārt lietum $a_\lambda \approx 0,9$, tāpēc pie tās pašas reālās temperatūras T lietūs apgabaliem būs stipri atšķirīga r_λ (un arī spožuma B_λ) vērtība, salīdzinot ar okeāna virsmas apgabaliem. Aprēķinot spožuma temperatūru T_s šiem apgabaliem, iegūstam, ka lietūs apgabalu spožuma temperatūra ir ievērojami augstāka nekā apkārtējā okeāna spožuma temperatūra. Ar šādu metodiku varam izveidot 1-57. att. redzamās nokrišņu intensitātes kartes, kur faktiski attēlotas spožuma temperatūras T_s vērtības. Jāatzīmē tikai, ka tuvajam un vidējam infrasarkanā starojuma diapazonam Releja-Džīnsa tuvinājums korekti nav piemērojams (jo šajos gadījumos $\lambda < 14 \mu\text{m}$) un jāizmanto pilna Planka formula. Tādēļ rezultāts ir nedaudz komplicētāks, bet kvalitatīvie secinājumi neatšķiras no tikko analizētajiem.

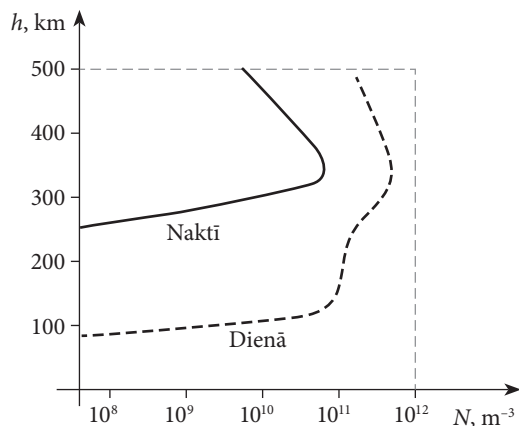
1.7.7. Starojuma mijiedarbība ar jonosfēru

Zemes atmosfērā jonizētā komponente parādās jau 50 km līdz 70 km augstumā un izteikti turpinās līdz apmēram 1000 km attālumam no planētas virsmas. Atmosfēras jonizāciju izsauc galvenokārt Saules elektromagnētiskā starojuma ultravioletā, rentgenstaru un gamma starojuma komponentes, kā arī Saules vēja lādēto daļiņu klātbūtne, ko nodrošina Zemes magnētiskais lauks. Jonosfēra būtiski mijiedarbojas ar mikroviļņu starojumu, tādējādi spēcīgi ietekmējot tās tālzipētes tehnoloģijas, kas saistītas ar radaru izmantošanu (piemēram, radaraltimetrijas u. c. mikroviļņu tehnoloģiju mērījumus). Jonosfēras elektriskās īpašības ir ļoti tuvas elektronu plazmas īpašībām (skat. 1.3.5. sadaļu), un tās relatīvā dielektriskā caurlaidība saskaņā ar (1.96.) ir izsakāma formā

$$\varepsilon \approx 1 - \frac{N_e q_e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

kur N_e – elektronu koncentrācija jonosfērā, q_e un m_e – elektrona lādiņš un masa, ω – izmantotā mikroviļņu starojuma cikliskā frekvence, ω_p – t. s. plazmas frekvence, ko nosaka formula (1.97.). Ja $\omega > \omega_p$, tad jonosfēra ir caurspīdīga, jo tās laušanas koeficients $n = \sqrt{\varepsilon}$ ir reāls, bet, ja $\omega < \omega_p$, tad jonosfēra mikroviļņu starojumam kļūst necaurspīdīga, jo tās laušanas koeficients n ir kļuvis imaginārs. Tādējādi jonosfēras absorbcijas īpašības strauji izmainās, ja izmantotā mikroviļņu starojuma cikliskā frekvence ir samērojama ar jonosfēras plazmas frekvenci ω_p , kas ir atkarīga no strauji mainīgā (par vairākām lieluma kārtām) brīvo elektronu skaita jonosfēras tilpuma vienībā (blīvuma) N_e (skat. 1-60. att.).

Elektronu blīvums jonosfērā N_e (kas nosaka tās galvenās elektriskās īpašības) ir ļoti atkarīgs gan no Saules aktivitātes līmeņa, gan gadalaika, gan diennakts stundas, gan citiem faktoriem, daļa no kuriem ir grūti prognozējama.



1-60. att. Elektronu blīvums Zemes jonosfērā.

2. daļa

Multispektrālās un mikroviļņu tehnoloģijas

2.1. Tālīzpēte optiskajā (VIR) diapazonā (9. lekcija)

2.1.1. Kopsavilkums

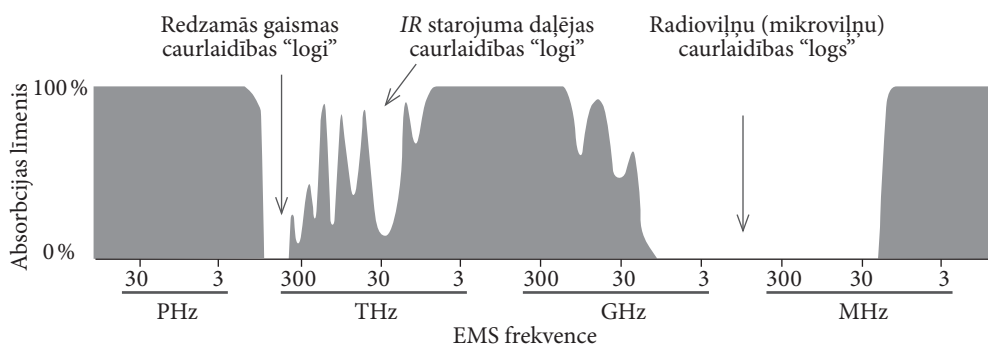
Multispektrālo sensoru (MSS) tālīzpētes tehnoloģijas ir attīstījušās uz hiperspektrālo tehnoloģiju (HSS) ideju bāzes. Grūtības reģistrēt precīzas spektrālās signatūras motivēja izveidot dažādus multispektrālos sensorus un tiem pielāgotas tālīzpētes metodes, kas mūsdienās ir visvairāk izmantoto tālīzpētes tehnoloģiju saimē. Iepazīsimies ar šo MSS tehnoloģiju pamatidejām un vairākām aktuālām MSS satelītprogrammām.

2.1.2. EMS optiskā diapazona izmantošana tālīzpētē

Elektromagnētiskā starojuma (EMS) optiskā diapazona izmantošana tālīzpētē izriet no tā, ka absorbcija Zemes atmosfērā ir ļoti atkarīga no EMS viļņu garuma (frekvences) un faktiski nodrošina tikai divus raksturīgus caurlaidības apgabalus (t. s. “logus”) [43]. Pirmais no tiem ir redzamās gaismas un infrasarkanajā (ar daļēju ierobežotu caurlaidību) spektra diapazonā (t. s. VIR¹ diapazons), otrs – EMS mikroviļņu (MW²) diapazonā (skat. 2-1. att.).

Pirmo no minētajiem EMS caurlaidības logiem izmanto MSS tehnoloģijas, kuru sensori ir gaismas jutīgas pusvadītāju ierīces (CCD un CMOS tehnoloģijas), kas piemērotas EMS reģistrēšanai šādos starojuma viļņu garumu un frekvenču diapazonos:

- redzamās gaismas diapazons – λ ir no 0,4 μm līdz 0,7 μm , f ir no 430 THz līdz 770 THz;
- tuvais infrasarkanais (NIR³) diapazons – λ ir no 0,7 μm līdz 1,4 μm , f ir no 214 THz līdz 430 THz;



2-1. att. EMS caurlaidības “logi” Zemes atmosfērā.

1 VIR – Visual and Infrared.

2 MW – Microwawe.

3 NIR – Near Infrared.

- īsviļņu (jeb vidējais) infrasarkanais (SWIR⁴) diapazons – λ ir no 1,4 μm līdz 3,0 μm , f ir no 100 THz līdz 214 THz.

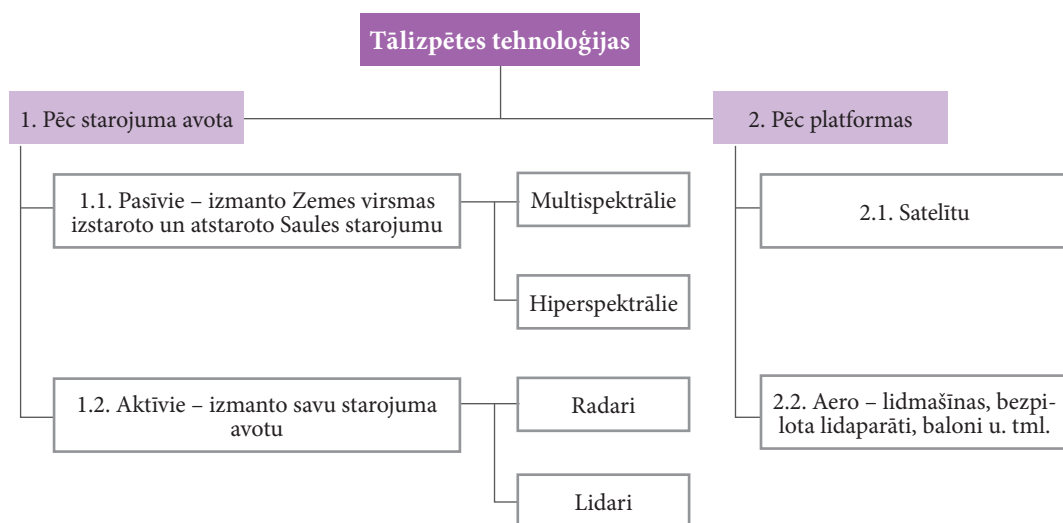
Izmantojamajiem pusvadītāju sensoriem ir apmierinoša jutība visos trīs minētajos EMS diapazonos, tāpēc MSS tehnoloģijas sekmīgi izmanto to kopīgajā t. s. *VIR* diapazonā ar λ no 0,4 μm līdz 3,0 μm un f no 100 THz līdz 770 THz. Zemāku frekvenču infrasarkanā starojumu parasti attiecina uz t. s. *TIR*⁵ jeb termisko infrasarkanā diapazonu, un tā reģistrēšanai izmanto cita tipa (bolometriskos) sensorus. Tālīzpētē EMS *TIR* diapazonu izmanto ievērojami retāk nekā *VIR* diapazonu. Jāatzīmē, ka gan *VIR*, gan *TIR* diapazonu sensoru mērījumus un to izmantošanas efektivitāti ļoti ietekmē (proti, ierobežo) mākoņi un citi atmosfēras apstākļi.

Tālīzpētes tehnoloģijas nereti klasificē ne tikai pēc tajās izmantotā EMS frekvenču diapazona, bet arī pēc šī starojuma avota un izmantotā sensora veida vai arī datu ieguves platformas tipa (2-2. att.).

Pasīvie tālīzpētes sensori izmanto Saules EMS (hiperspektrālie un multispektrālie sensori) vai pētāmās planētas (Zemes) termisko starojumu (termālie sensori). Savukārt aktīvie sensori strādā ar mākslīgo apstarojumu gan *VIR* (lidari), gan mikroviļņu (radari) EMS diapazonos.

2.1.3. Spektrālās signatūras (hiperspektrālais koncepts)

VIR diapazonā izmantotie pusvadītāju sensori reģistrē savu pikseļu spožumu (skat. 1.2.5. sadaļu). Taču šādi iegūtas spožuma vērtības ir grūti ne tikai interpretēt, bet pat reprezentēt. Gaisma, kas nonāk sensorā, kombinējas no dažādiem stariem, kuri tur nonākuši pa dažādiem ceļiem un kuru EMS mijiedarbojies gan ar Zemes virsmu, gan tās atmosfēru (2-3. att.).



2-2. att. Tālīzpētes tehnoloģiju klasifikācija.

4 SWIR – *Short Wave Infrared*.

5 TIR – *Thermal Infrared*.

2-3. att. AD ir tiešā refleksija, B – izkliedētais fons, kas pastiprina laukumiņa ΔS apgaismojumu, C – turp/atpakaļ izkliede, F – difūzā izkliede sensorā, E – sekundārā izkliede. Šīs dažādās EMS komponentes ir jāatdala, jo ģeoinformāciju satur tikai tā starojuma daļa, kas ir mijiedarbojusies ar Zemes virsmu. Turklāt arī šo starojuma daļu ir ietekmējusi mijiedarbība ar Zemes atmosfēru (kas ir traucējoši, ja vien netiek pētīta pati atmosfēra). Starojuma komponentu atdalīšanas problēmu risina dažādos veidos:

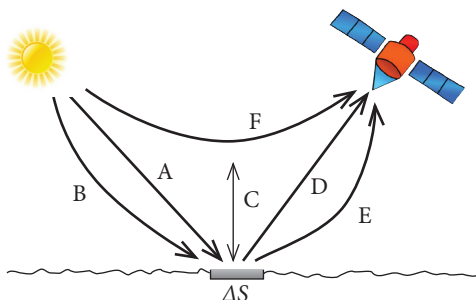
- izmantojot starojuma matemātisko modelēšanu (taču šī metode ir sarežģīta un ne vienmēr ļauj iegūt apmierinošas precizitātes rezultātu);
- kalibrējot (t. i., pētāmajā apgabalā uz Zemes virsmas tiek veidoti speciāli kalibrēšanas apgabali ar zināmām radiometriskām īpašībām, ko identificē un analizē iegūtajos tālzipētes attēlos);
- atņemot attēla tumšākā pikseļa vērtību no visu citu attēla pikseļu radiometriskajām vērtībām.

Pēdējā metode ir visvienkāršākā un samērā izplatīta, jo ātri un viegli ļauj iegūt jūtamu attēla uzlabojumu. Tās pamatojums ir pieņēmumā, ka attēlam jāietver kādi pilnīgi melni punkti (pikseļu vērtības), ko veido, piemēram, relatīvi dziļas tīra ūdens krātuves (skat. 2-25. att.). Taču tām atbilstošie pikseļi attēlā nebūs melni, jo tos izgaismojis “parazītiskais” starojums B, C, E un F (skat. 2-3. att.), kas ir sagaismojis arī citus attēla pikseļus. “Parazītiskajam” starojumam atbilstošo radiometrisko vērtību atskaitīšana no visām reģistrēto pikseļu vērtībām ļauj attēlā pastiprināt tā starojuma pienesumu, kas ir mijiedarbojies ar Zemes virsmu. Taču, ja attēlā nav pilnīgi melnu punktu, tad šīs metodes lietošana var nebūt īpaši veiksmīga.

Pēc starojuma komponentu atdalīšanas un tai atbilstošās tālzipētes attēla koriģēšanas attēla pikseļos reģistrētās spožuma vērtības ir galvenokārt atkarīgas no (a) atbilstošo rezeli⁶ apstarojuma vērtībām un (b) EMS mijiedarbības ar Zemes virsmu. Ģeoinformācija ir iekodēta tikai (b) komponentē, tāpēc tās atdalīšanai izmanto bidirekcionālo refleksijas sadalījuma funkciju $BRDF$ (skat. 1.4.3. sadaļu) formā

$$\rho_{\lambda} = \frac{B_R}{A_K} = \frac{(\Delta\Phi_R / \Delta\Omega_R)}{\Delta\Phi_K}$$

turklāt parasti vertikālā virzienā, t. i., pie $\beta_R = \alpha_R = 0$, kur $\Delta\Phi_K$ – uz pikselim atbilstošo rezeli krītošā enerģijas plūsma (skat. 1.2.2. sadaļu), ko iespējams modelēt;



2-3. att. EMS dažādas komponentes, ko reģistrē sensors.

⁶ Par rezeli tālzipētē sauc digitālā attēla pikselim atbilstošo apgabalu uz planētas (Zemes) virsmas.

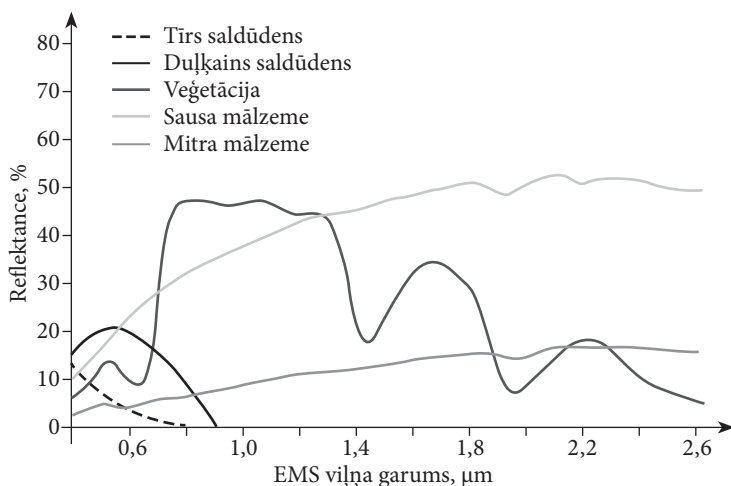
$\Delta\Phi_R$ – no šī režēļa reflektētā starojuma plūsma telpiskajā leņķī $\Delta\Omega_K$, kurā notiek signāla reģistrācija (izmērāma).

Šādi aprēķinātas ρ_λ vērtības ir atkarīgas no EMS viļņa garuma λ , bet gandrīz nav atkarīgas no starojuma krišanas virzienu raksturojošajiem leņķiem (α_K, β_K), jo starojuma krišanas virziena izmaiņas proporcionāli ietekmē gan $\Delta\Phi_R$, gan $\Delta\Phi_K$. Tātad ρ_λ vērtību galvenokārt nosaka tieši EMS mijiedarbība ar Zemes virsmu. Šī mijiedarbība galvenokārt ir atkarīga no (a) Zemes virsmas absorbcijas, ko nosaka tās faktūra (proti, faktūru veidojošo objektu relatīvā dielektriskā caurlaidība ϵ) un (b) refleksijas (vairumā gadījumu – difūzās refleksijas), ko nosaka virsmas tekstūra (proti, tās raupjums horizontālā un vertikālā virzienā).

Šādā traktējumā *BRDF* funkciju ρ_λ sauc par reflektanci (nejaukt ar direkcionalo albedo vai citiem refleksiju raksturojošiem parametriem). Reflektances atkarību no EMS viļņa garuma λ dēvē par spektrālo signatūru (skat. 2-4. att.). To bieži normē kādai fiksētai telpiskā leņķa $\Delta\Omega_K$ vērtībai vai arī izsaka procentos, salīdzinot ar atbilstošu Lamberta izkliedes modeli.

Spektrālo signatūru analīze ir tālīzpētes hiperspektrālā koncepta pamatinstruments, jo spektrālās signatūrās ietverta plaša un vispusīga informācija par pētāmās virsmas faktūras un tekstūras parametriem. No 2-4. att. parādītajām signatūrām ir uzskatāmi redzams, ka tās ir kvalitatīvi atšķirīgas trim galvenajām Zemes virsmas struktūrām: veģetācijai, ūdens virsmām un minerāliežu virsmām. Kļūdīties un sajaukt minēto virsmas struktūru spektrālās signatūras ir praktiski neiespējami. Savukārt rūpīgāka veģetācijas signatūru analīze ļauj noteikt gan veģetācijas tipus, gan lapotnes blīvumu, gan mitrumu tajā, gan arī citus veģetāciju raksturojošus parametrus. Iespējams arī kontrolēt un monitorēt augu (kā bioloģisku objektu) veselības stāvokli (skat. 2-5. att.), attīstības problēmas vai identificēt citas būtiskas situācijas, kas ietekmē spektrālo signatūru formu.

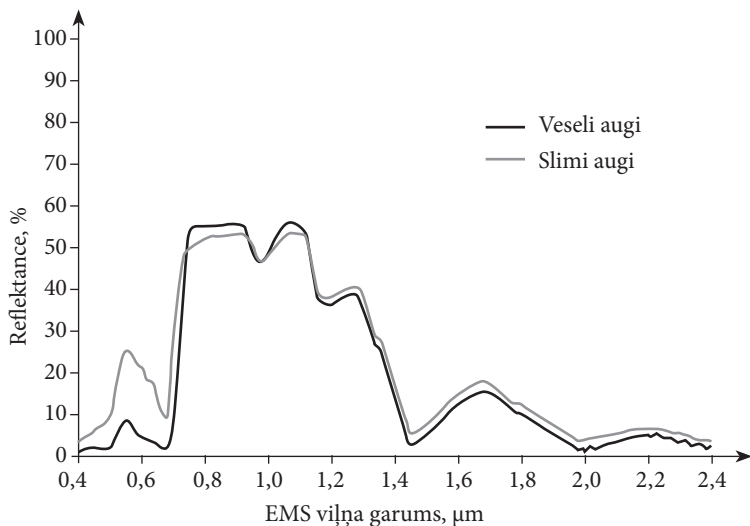
Izprotot spektrālo signatūru formējošos faktoros (2-6. att.), ir izdevies izstrādāt smalkus un efektīvus algoritmus (tostarp t. s. “*red-shift*” metodi u. c.) veģetācijas attīstības un veselības stāvokļa kontrolei, kas ir ļoti būtiski un pieprasīti informācijas produkti lauk-



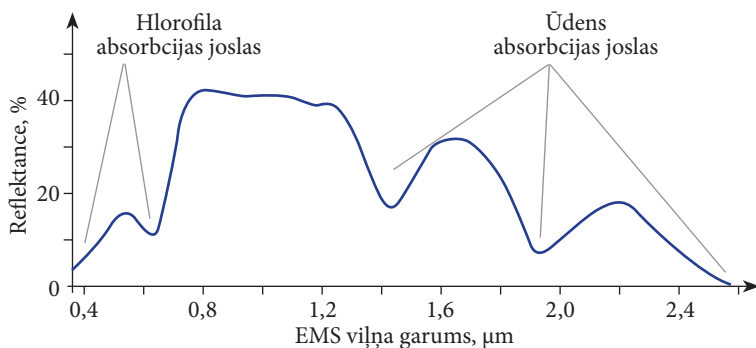
2-4. att. Spektrālo signatūru raksturīgie veidi.

saimnieciskās ražošanas monitoringam un globālai situācijas kontrolei šajā nozarē.

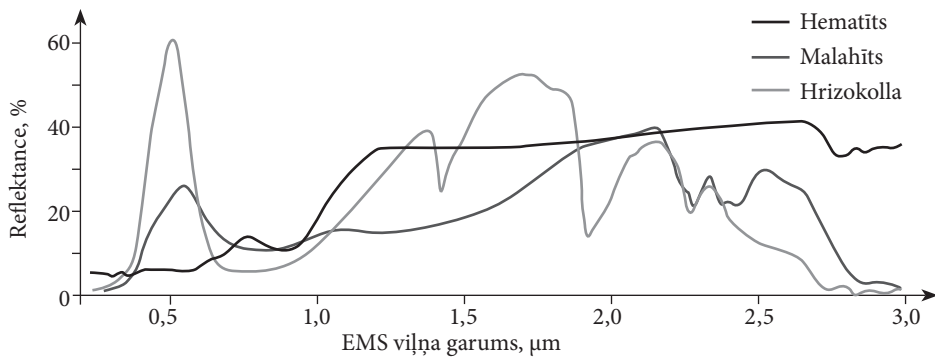
Ūdens virsmu spektrālo signatūru izmaiņas ir efektīgs instruments ūdens piesārņojumu reģistrācijai un kontrolei (2-4. att.), savukārt minerāliežu virsmu spektrālās signatūras ar lielu precizitāti ļauj noteikt pētāmo virsmu mineraloģisko sastāvu (2-7. att.).



2-5. att. Veselu un slimu cukurbiēšu spektrālās signatūras.



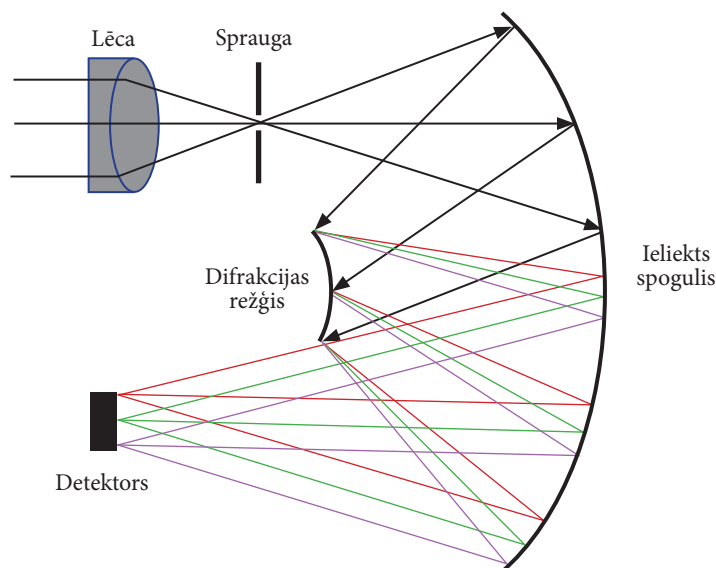
2-6. att. Spektrālo signatūru formējošie faktori.



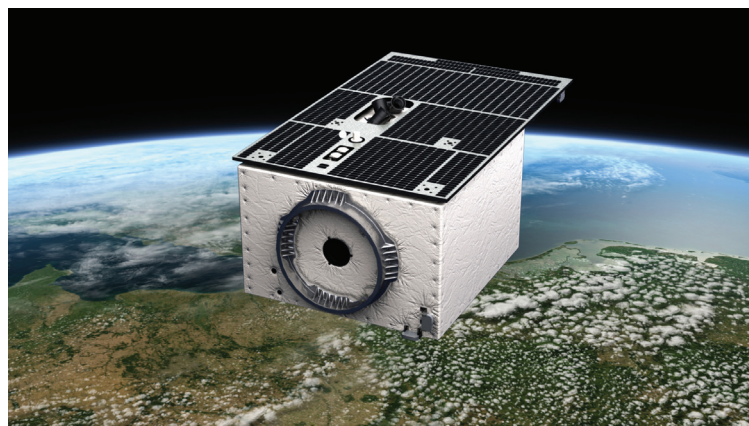
2-7. att. Minerāliežu virsmu spektrālās signatūras.

Spektrālo signatūru reģistrēšana un analīze, kā jau minēts, veido tālīzpētes hiperspektrālo sensoru (HSS) izmantošanas koncepta pamatu. Taču šī tehnoloģija ir gan komplicēta, gan dārga, jo ir saistīta ar ļoti liela apjoma datu ieguvu, uzglabāšanu un pārraidi no satelīta uz Zemi. Hiperspektrālie sensori jau paši par sevi ir sarežģītas, ļoti augstas precizitātes tālīzpētes iekārtas, ko sauc arī par attēlus veidojošajiem spektrogrāfiem un kuros visbiežāk izmanto difrakcijas režģu tehnoloģijas (2-8. att.).

Tikai pavisam nesen (21. gadsimta otrajā desmitgadē) hiperspektrālo tehnoloģiju izmantošana ir kļuvusi ekonomiski pamatota, un orbītā ap Zemi tiek ievadīts arvien vairāk tālīzpētes satelītu, kas aprīkoti ar minētajiem attēlus veidojošajiem spektrogrāfiem. Viens no tādiem ir vācu satelīts “*ENMAP-Erde*”, kura galvenais aprīkojums ir augstas izšķirtspējas hiperspektrālais sensors (2-9. att.).



2-8. att. Hiperspektrālā sensora uzbūves principiālā shēma.



2-9. att. Tālīzpētes satelīts “*ENMAP-Erde*” ar hiperspektrālo sensoru.

2.1.4. Multispektrālie sensori

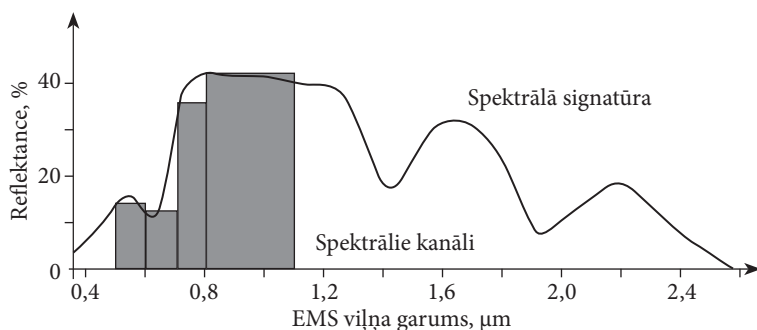
Hiperspektrālie sensori ģenerē ļoti lielu informācijas apjomu, kas ne vienmēr ir nepieciešami un lietderīgi (gan no telekomunikāciju, gan datu apstrādes resursu apjoma viedokļa). Tādēļ tos bieži aizstāj ar 4 līdz 15 kanālu multispektrālajiem sensoriem, kas spektrālo signatūru reprezentē ļoti tuvināti (2-10. att.).

Agrīnajos “LANDSAT 1-3” satelītos spektrālo signatūru reprezentēja četri spektrālie kanāli (trīs RGB redzamās gaismas kanāli un viens infrasarkanais kanāls). Vidējās paaudzes “LANDSAT 4-5” izmantoja jau septiņus spektrālos kanālus, bet, sākot no “LANDSAT-8”, tiek lietoti 11 spektrālie kanāli (no tiem deviņi izvietoti VIR, divi – TIR spektrālajos diapazonos).

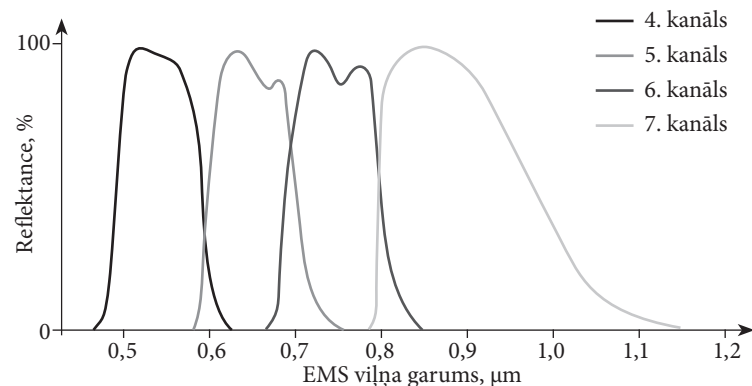
Krāsu attēlu formēšana, izmantojot multispektrālo konceptu, notiek tāpat, kā tas ir krāsu redzes gadījumā. EMS spektru sadala krāsu joslās, kuras kombinējot var iegūt krāsu attēlus.

Parasti izvēlas vizuālās RGB joslas (lai nodrošinātu iespēju formēt attēlus dabīgajās krāsās), kurām pievieno vienu vai vairākas infrasarkanās joslas no NIR vai SWIR diapazoniem. Infrasarkanā diapazona joslu pievienošanas lietderību nosaka tas, ka:

- tālīzpētē izmantojamie pusvadītāju sensori ir jutīgi NIR un SWIR spektrālajos diapazonos;
- infrasarkanā joslu izmantošana ļauj formēt attēlus mākslīgajās jeb pseidokrāsās;



2-10. att. Satelītu “LANDSAT 1-3” četri spektrālie kanāli.



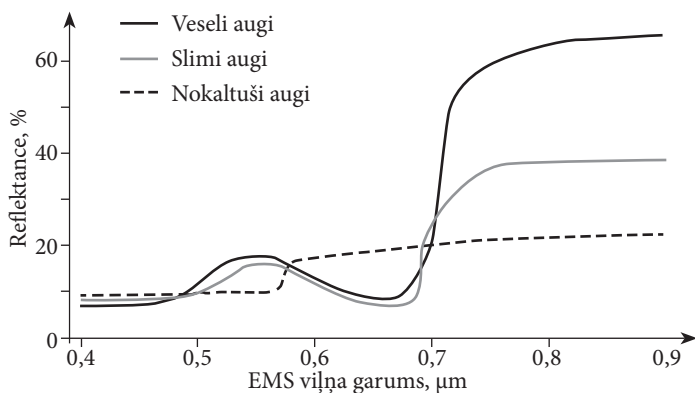
2-11. att. Krāsu joslu formēšanas princips.

- analizējot attēlus infrasarkanajā diapazonā, var reģistrēt daudz būtisku, piemēram, veģetācijas radiometrisku, parametru izmaiņas, kas nav novērojamas redzamajā RGB spektrālajā diapazonā (2-12. att.).

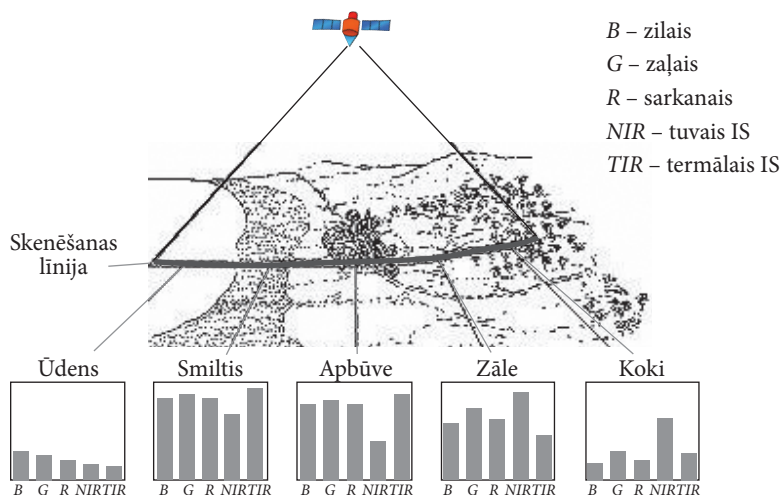
Spektrālās joslas multispektrālajos sensoros (MSS) visbiežāk atdala, izmantojot optiskos filtrus, un MSS attēlu formēšanas vispārīgā shēma ir redzama 2-13. att.

Katram attēla pikselim tiek reģistrētas radiometriskā spožuma vērtības visās izmantotajās spektrālajās joslās. Tādējādi katram attēla pikselim var identificēt spektrālās signatūras tipu (veģetācija, ūdens vai minerāliežu virsma) un tālāk izmantot reģistrētās spožuma vērtības detalizētai atbilstošā rezeļa faktūras un tekstūras parametru analīzei. Informācijas daudzums MSS attēlos ir daudz mazāks nekā HSS attēlos, taču pietiekams ļoti daudzu tālīzpētes uzdevumu sekmīgai risināšanai. No datu apjoma un to apstrādes resursu daudzuma viedokļa MSS tehnoloģijas ir ievērojami ekonomiskākas un lētākas nekā HSS tehnoloģijas, tādēļ tālīzpētē tās izmanto daudz biežāk.

Infrasarkano joslu izmantošana krāsu attēlu formēšanā (aizstājot kādu no RGB joslām ar infrasarkanu joslu) ļauj iegūt t. s. pseidokrāsu attēlus. Šī tehnoloģija ir ļoti produktīva un



2-12. att. Augu slimību spektrālās signatūras.



2-13. att. MSS attēlu formēšana.

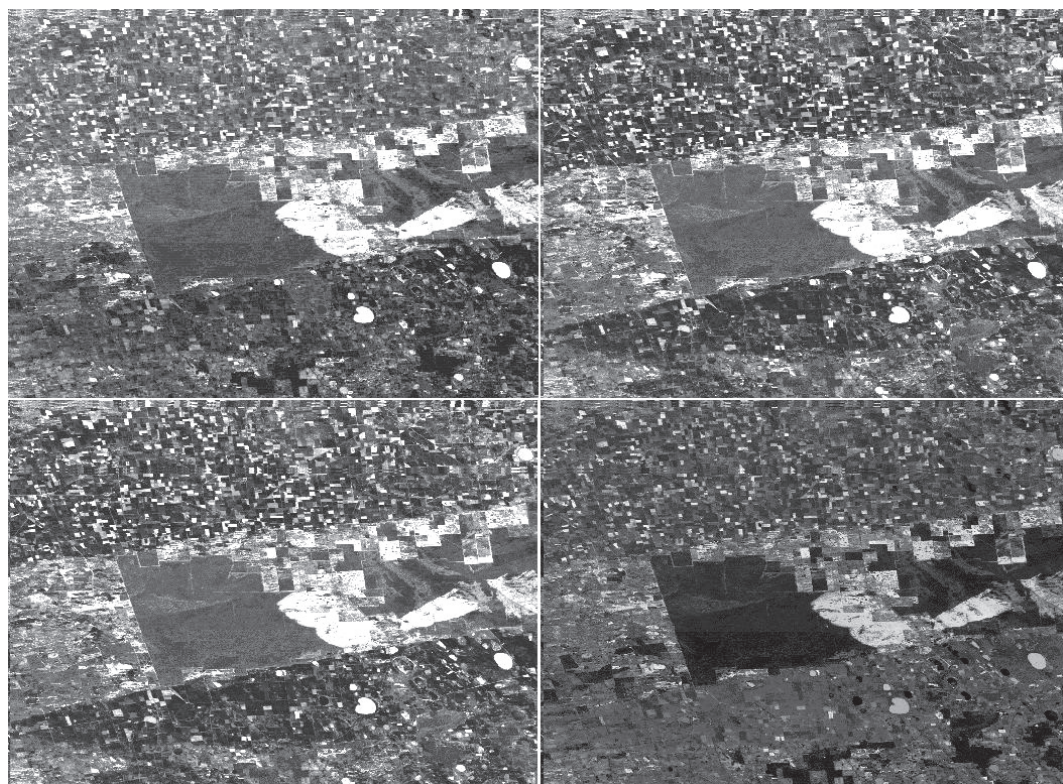
izplatīta, ja tālīzpētes informācijas produkts (attēls) paredzēts vizuālai uztverei un analīzei. Tā ļauj uzskatāmi atdalīt spektrāli tuvas komponentes (piemēram, atšķirt skuju kokus no lapu kokiem u. c.), iekļaut attēlā ar aci citādi neredzamas informatīvas komponentes vai arī citādi vizualizēt no pētāmās problēmas viedokļa būtiskas Zemes virsmas īpašības.

2.1.5. Multispektrālo sensoru konstrukcijas

VIR diapazonā izmantotie attēlus veidojošie multispektrālie sensori (MSS) darbojas vairākos atšķirīgos veidos, un tos parasti iedala trīs kategorijās:

- elektromehāniskie skeneri (t. i., rotējošs spogulītis ar fotoelementu);
- fotoelementu (*CCD* vai *CMOS*) vektori (vienī no izplatītākajiem satelītplatformās);
- fotoelementu (*CCD* vai *CMOS*) matricas (izmanto aeroplatformās un ģeostacionārajos satelītos).

Visu šo sensoru detektori ir pusvadītāju gaismas jutīgas ierīces, kurās visbiežāk izmanto divas tehnoloģijas – *CCD* (*Charge Coupled Device*) vai *CMOS* (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Par *CCD* jeb lādiņsaites fotoelementu izveidi 2009. gadā tika piešķirta Nobela prēmija fizikā (*Willard S. Boyle, George E. Smith*), savukārt *CMOS* tehnoloģijas lēni, bet pārliecinoši kļuvušas par *CCD* ierīču galvenajām konkurentēm arī tālīzpētē. Katrai šai tehnoloģijai ir gan priekšrocības, gan trūkumi, taču daudzos aspektos tās ir visai līdzīgas.



2-14. att. Lauksaimnieciska teritorija VIR diapazona četrās spektrālajās joslās (RGB un NIR).

2.1.5.1. Elektromehāniskie skeneri

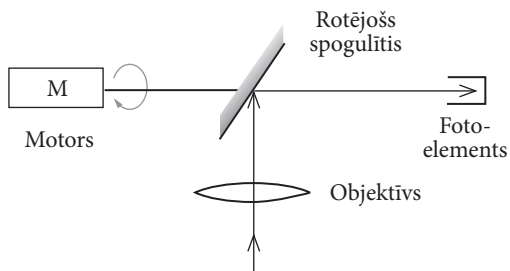
Elektromehāniskie skeneri (dēvēti arī par telefotometriem) vēsturiski bija pirmie attēlus veidojošie sensori, ko izmantoja tālzipētē (ar to palīdzību iegūti arī pirmie Mēness un Marša virsmas attēli). Šo skeneru shematiska uzbūve redzama 2-15. att.

Gaisma, kas ar optiskās sistēmas (objektīva) palīdzību formē attēlu, atstarojas no rotējoša spoguļiņa un nonāk to reģistrējošā fotoelementā. Tādējādi spoguļiņa rotācija īsteno attēla t. s. rindu izvērsi, savukārt platformas kustība – t. s. kadru izvērsi. Kad spoguļītis ir pagriezts uz augšu, tālzipētes attēla reģistrācija nav iespējama, taču šo procesa fāzi nereti izmanto kalibrēšanas attēla reģistrācijai, kas var būt novietots fotometra korpusā objektīvam pretējā pusē.

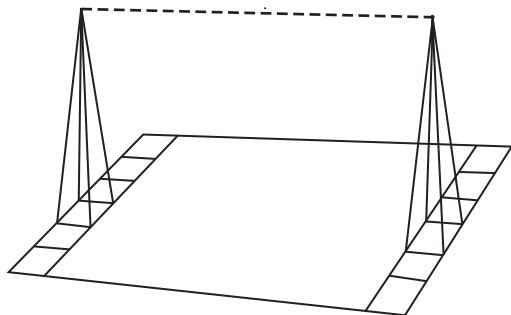
Šī tehnoloģija ļauj skenēt attēlu rindu pa rindai, izmantojot vienu un to pašu fotoelementu. Taču elektromehāniskajiem skeneriem raksturīgas mehāniskās vibrācijas, ko rada elektromotoriņš, kas nodrošina spoguļiņa rotāciju. Lai cik miniatūras nebūtu šīs ierīces, izvairīties no vibrācijām pilnībā nav iespējams. Turklāt, jo ātrāk rotē (vai oscilē) spoguļītis (lai paaugstinātu attēla telpisko izšķirtspēju), jo mazāka gaismas plūsma nonāk sensorā. Tādēļ ar šāda tipa sensoriem grūti vai pat neiespējami strādāt šaurās spektrālās joslās.

2.1.5.2. Fotoelementu vektori

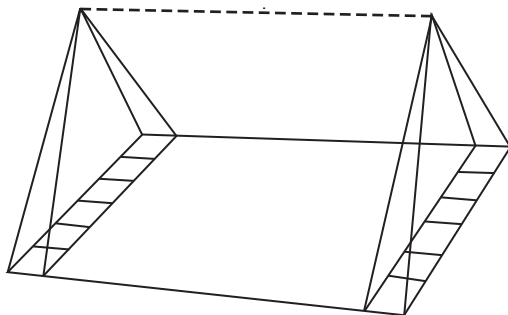
Ievērojami biežāk izmanto attēlu veidojošos sensorus, kuros gaismas jutīgie elementi izkārtoti lineāras struktūras veidā, t. s. fotoelementu vektorus (2-17. att.). Šajā gadījumā attēla rindu izvērsi realizē izmantotais fotoelementu vektors, kadru izvērsi, līdzīgi kā iepriekš, nodrošina platformas kustība.



2-15. att. Elektromehāniskā skenera uzbūve.



2-16. att. Attēla formēšana ar elektromehānisko skeneri.



2-17. att. Attēla formēšana ar fotoelementu vektoru.

Piemēram, tālzipētes satelītu *SPOT* sensors *HRV* izmanto četru fotoelementu vektorus (četrām spektrālajām joslām) ar 1728 detektoriem katrā vektorā. Līdzīgus sensorus lieto arī daudzos citos *VIR* diapazona tālzipētes satelītos.

Galvenās fotoelementu vektoru priekšrocības ir:

- tajos nav kustīgu daļu, kas izraisa vibrācijas, tātad nav arī mehānisko un “skrūvjuveida” distorsiju, kas raksturīgas elektromehāniskajiem skeneriem;
- iespējams īstenot ievērojami ilgāku ekspozīciju katram gaismas jutīgajam detektoram, tātad var strādāt ar daudz šaurākām spektrālajām joslām;
- ierīce ir mazāka, lētāka un vieglāka (svarīgi satelītplatformu izmantošanas gadījumos), ar mazāku elektroenerģijas un telekomunikāciju resursu patēriņu;
- sensoram ir lielāka telpiskā un spektrālā izšķirtspēja (salīdzinot ar elektromehāniskajiem skeneriem).

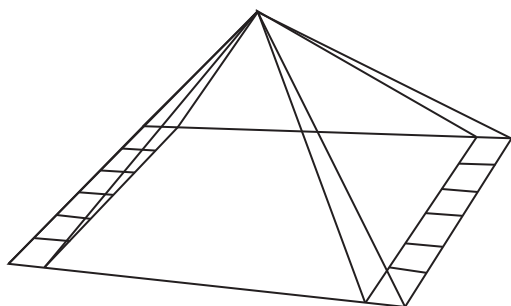
Fotoelementu vektoru galvenie trūkumi ir šādi:

- vektoru formējošos gaismas jutīgos detektorus ir rūpīgi jākalibrē, lai attēls nebūtu strīpains;
- izmantojamo spektrālo joslu skaitu ierobežo nepieciešamība ar visiem vektoriem reģistrēt vienu un to pašu joslu uz Zemes virsmas;
- relatīvi lēns reģistrēto vērtību nolasīšanas laiks (*CCD* tehnoloģiju gadījumā), un spektrālā jutība bieži nesniedzas tālāk par *NIR* diapazonu.

2.1.5.3. Fotoelementu matricas

Fotoelementu jeb detektoru matricas formē centrālās perspektīvas attēlus līdzīgi digitālajiem fotoaparātiem vai TV attēlam (2-18. att.). Taču tālzipētē tās nemaz tik bieži neizmanto, jo iegūtajos attēlos rūpīgi jākorrigē optisko sistēmu daudzveidīgās distorsijas. Matricu sensoros bieži lieto visai komplicētas optiskās sistēmas, lai nodrošinātu labu telpisko izšķirtspēju. Taču tām raksturīgi lieli spektrālie un radiometriskie kropļojumi.

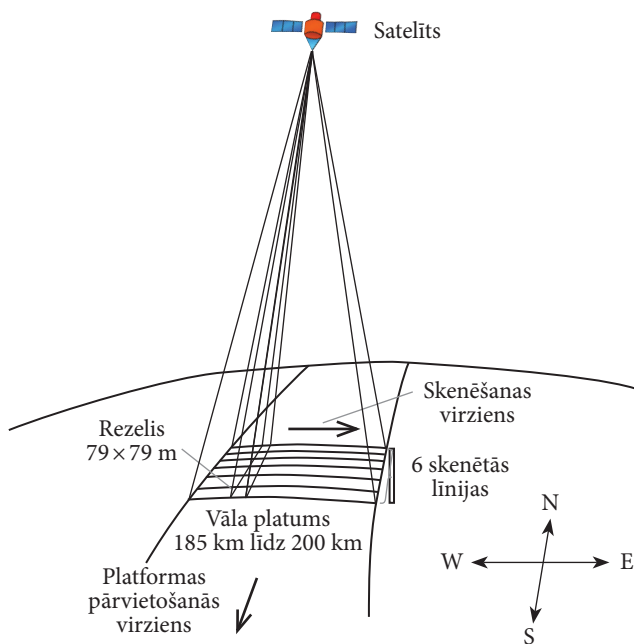
Taču galvenais šo sensoru trūkums ir lēnais *CCD* attēlu reģistrēto vērtību nolasīšanas laiks (*CMOS* tehnoloģijas detektoru izmantošanas gadījumā situācija ir nedaudz labāka). Tādēļ detektoru vektorus (matricu vietā) nereti lieto arī sensoros, kas izvietoti ģeostacionārajā orbītā, jo ģeostacionāros satelītus bieži stabilizē, izmantojot rotāciju (vibrāciju šādā gadījumā nav), bet ar rotējošu vektoru arī var viegli iegūt centrālās perspektīvas attēlus.



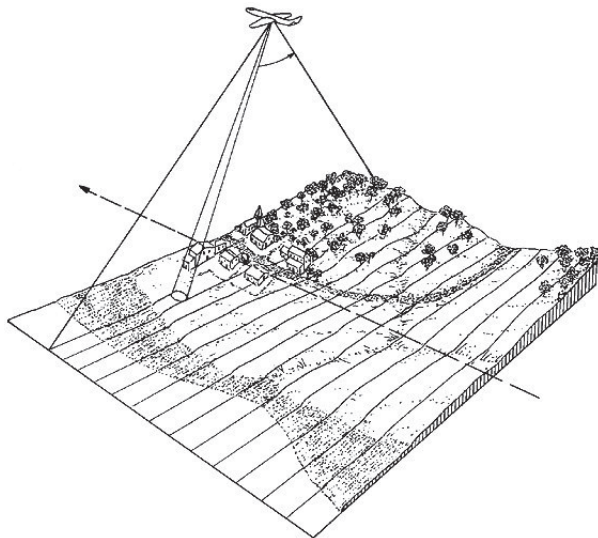
2-18. att. Attēla formēšana ar fotoelementu matricu.

2.1.5.4. Kombinētās metodes

Spektrālo joslu atdalīšana MSS ierīcēs ir visai komplicēta inženiertehniska problēma, tās risinājumi nereti ietver vairāku apskatīto sensoru tipu kopīgu izmantošanu. Visbiežāk kombinē fotoelementu vektorus, kā tas ir virknē “LANDSAT” satelītu (2-19. att.), tiem vektoram ir tikai seši detektori (katrs savai spektrālajai joslai) ar elektromehānisko skeneru tehnoloģijām attēla formēšanai.



2-19. att. Spektrālo joslu atdalīšana “LANDSAT” satelītos.



2-20. att. Elektromehāniskā skenera darbība.

Rotējot elektromehāniskā skenera spogulītīm, tiek skenētas sešas viena otrai sekojošas attēla rindas dažādās spektrālajās joslās. Viena spoguļiša apgrieziena laikā satelītplatforma pārvietojas precīzi par vienas rindas platumu, un rindu skenēšana turpinās citās spektrālajās joslās. Šādi katra attēla rinda tiek skenēta sešas reizes ar atšķirīgu spektrālo joslu detektoriem kvazisinchronajā režīmā. Lai nodrošinātu augstu spektrālo izšķirtspēju, visi izmantotie detektori ir rūpīgi jākalibrē, savukārt telpiskās izšķirtspējas uzlabošanai attēlos jākompensē skrūvjeveida distorsijas.

Par **rezeli** (*resolution element*) sauc attēla pikselim (*picture element*) atbilstošo laukumiņu uz Zemes virsmas. Ja tā izmērs ir Δx , tad elektromehāniskajos skeneros (kā arī kombinētajās sistēmās) jābūt spēkā nosacījumam

$$\Delta T \leq \frac{\Delta x}{v}$$

kur ΔT – spoguļiša rotācijas periods, v – platformas ātrums. Pretējā gadījumā starp attēla rindām veidosies nenoskenētas (melnas) joslas (2-20. att.). “LANDSAT” satelītiem $\Delta x = 30$ m, $v = 6,5$ km/s, tātad $\Delta T = 4,6$ ms, kas nozīmē, ka skenera spoguļītīm ir jārotē ar leņķisko ātrumu 250 reizes sekundē.

2.1.6. MSS satelītprogrammas

Tālizpētes attēlu ieguve, izmantojot satelītus, dod iespēju uzkrāt regulāru informāciju par plašām teritorijām. Datu ieguve no satelītiem daudzos gadījumos notiek praktiski nepārtraukti, nodrošinot liela apjoma informāciju visdažādākajām izmantojumu jomām. MSS satelītplatformas pieder gan valsts pārvaldes un pētniecības organizācijām, gan privātām kompānijām. Valstisku satelītprogrammu dati (LANDSAT, SENTINEL u. c.) lielā apjomā un par brīvu pieejami katram interesentam, taču privātām kompānijām piederošu satelītu dati ir komercializēti un iegūstami par samaksu, kas atkarīga no datu kvalitātes un to pirmapstrādes līmeņa.



2-21. att. Viens no LANDSAT satelītiem montāžas fāzē.

2.1.6.1. LANDSAT programma

LANDSAT programma (ASV) nodrošina visilgāk veidoto un apjomīgāko satelītattēlu datubāzi pasaulē. Dati no tās (izņemot visjaunākos) nekomerciālai izmantošanai bez maksas ir pieejami par četrām desmitgadēm. *LANDSAT* programma ir *USGS* (*US Geological Survey*) un *NASA* kopīga iniciatīva.

“*LANDSAT-1*” satelītu ievadīja orbītā 1972. gadā. Tam sekoja vēl četri veiksmīgi satelīti, no kuriem “*LANDSAT-5*” darbojas īpaši ilgi – gandrīz 30 gadu. “*LANDSAT-6*” (neveiksmīgs) orbītu nesasniedza nesējraķetes bojājuma dēļ. “*LANDSAT-7*” sekmīgi funkcionēja četrus gadus, taču 2003. gadā tā iegūtajos attēlos parādījās informācijas zudumi (melnas joslās). Jaunākais no programmas satelītiem – “*LANDSAT-8*” – nodrošina MSS attēlus 11 spektrālajās joslās *VIR* un *TIR* diapazonā. To telpiskā izšķirtspēja sasniedz 15 m (panhromatiskajiem attēliem) un 30 m (multispektrālajiem attēliem).

2.1.6.2. SENTINEL programma

SENTINEL programma ir Eiropas Kosmosa aģentūras (*ESA*) iniciatīva, kuras ietvaros paredzēta sešu tālizpētes instrumentu komplektu izvietošana orbītās ap Zemi. “*Sentinel-1A*” (2014) un “*Sentinel-1B*” (2016) ir radarsatelīti, bet “*Sentinel-2A*” (2015) un “*Sentinel-2B*” (2017) ir MSS satelīti.



2-22. att. Satelīts “Sentinel-2B”.



2-23. att. Satelīts “Sentinel-1A”.



2-24. att. Viens no kompānijas “Digital Globe” satelītiem.



2-25. att. Satelīta “World View-3” MSS attēls.

“Sentinel-2” satelītu MSS strādā 12 spektrālajās joslās ar 10 m, 20 m un 60 m telpisko izšķirtspēju. Temporālā izšķirtspēja abu “Sentinel-2” satelītu konstelācijai ir piecas dienas. Šie rādītāji nodrošina Zemes virsmas monitoringa iespējas plašam lietotāju lokam.

MSS instrumenti izvietoti arī “Sentinel-3A” (2016) satelītā, taču zemās telpiskās izšķirtspējas dēļ (ap 300 m) tā primārais uzdevums ir jūru un okeānu monitorings.

2.1.6.3. “Digital Globe” tālizpētes kompānija

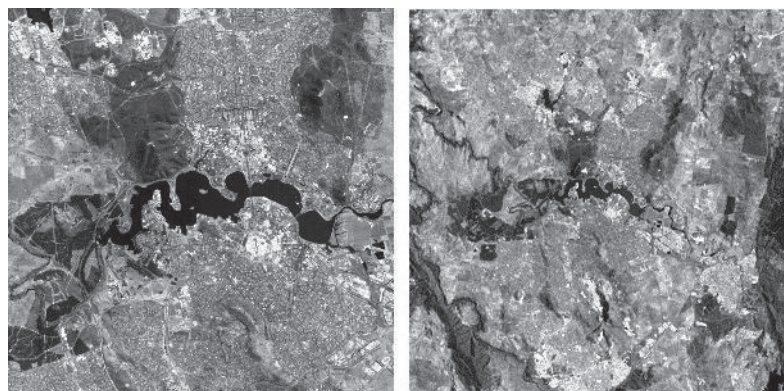
Tālizpētes kompānijai “Digital Globe” pieder vairāki satelīti, kuru MSS un panhromatiskie attēli izceļas ar ļoti augstu telpisko izšķirtspēju.

Kompānija “Digital Globe” par atbilstošu samaksu piedāvā iegādāties satelīta “World View-3” panhromatisko attēlu datnes, kuru telpiskā izšķirtspēja ir no 0,31 m līdz 0,34 m (rezeļu izmēri). VIR diapazona MSS attēliem ir tikai nedaudz mazāka telpiskā izšķirtspēja, un tie ir pieejami 16 spektrālajām joslām (2-25. att.).

2.2. Multispektrālo attēlu interpretācija (10. lekcija)

2.2.1. Interpretācijas mērķis

Jebkuras interpretācijas mērķis ir reģistrēt objektu un noteikt tā struktūru (parametrus). Lai to varētu izdarīt, attēlam jābūt ar pietiekamu pārklājumu (reģistrācijas nodrošināšanai) un pietiekamu izšķirtspēju (struktūras noteikšanai). Ja pārklājums ir nepietiekams, attēls vispār var neietvert interesējošo objektu, savukārt nepietiekamas izšķirtspējas gadījumā tā struktūra nebūs saskatāma. Taču nav pareizi censties izmantot attēlus ar maksimāli lielu pārklājumu un maksimāli augstu izšķirtspēju, jo no resursu taupīšanas viedokļa (gan finansiālo, gan datorresursu) vislabāk strādāt ar optimāla (pietiekama, bet nepārspīlēta) pārklājuma un izšķirtspējas attēliem. Attēla izmaksas lielā mērā nosaka informācijas daudzums tajā, bet tas ir proporcionāls gan attēla pārklājumam, gan izšķirtspējai.

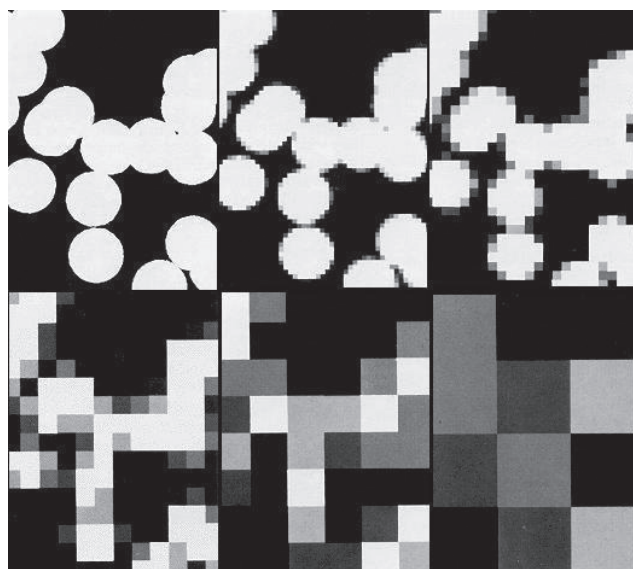


2-26. att. Kanberas satelītattēli ar atšķirīgu izšķirtspēju.

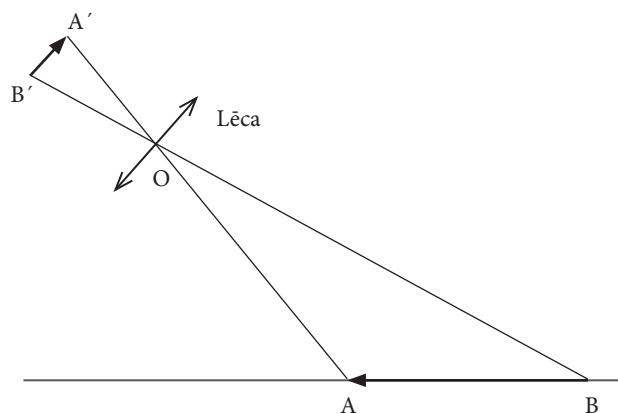
2.2.2. Telpiskā izšķirtspēja un pārklājums

2-26. att. redzami Austrālijas pilsētas Kanberas divi satelītattēli ar atšķirīgu izšķirtspēju un pārklājumu. Kuru no šiem attēliem izvēlēties, ņemot vērā, ka informācijas daudzums abos attēlos ir praktiski vienāds (t. i., to izmaksas būtiski neatšķiras), ir atkarīgs no risināmās problēmas un ar to saistīto objektu interpretācijas. Ja risināma, piemēram, piepilsētas zaļās zonas attīstība un tās labiekārtošana, jāizvēlas 2-26. att. labās puses attēls, jo kreisās puses attēls tam nenodrošina pietiekamu pārklājumu (tajā nav piepilsētas apgabalu). Savukārt, ja interese ir saistīta ar pilsētas centra transporta plūsmas iespējamu pārkārtošanu, jāizvēlas kreisās puses attēls, kura izšķirtspēja nodrošina ielu tīkla saskatāmību.

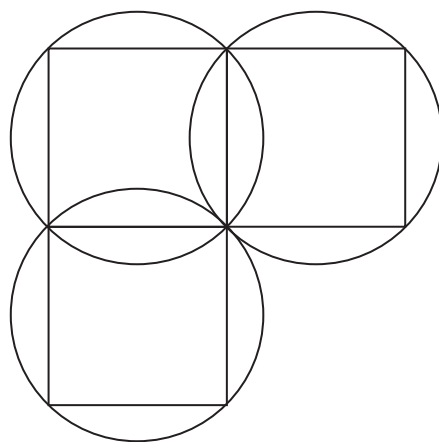
Attēla telpisko izšķirtspēju raksturo vismazākais objekts, ko var saskatīt attēlā, un pa-



2-27. att. Koku vainagu modelēšanas piemērs.



2-28. att. Slīpo staru attēlu ģeometrija.



2-29. att. Pikseļu un rezeļu projekciju superpozīcija.

rasti tā izmērs atbilst rezeļa⁷ izmēram. Taču objekta reģistrējamību attēlā nosaka ne tikai tā telpiskā izšķirtspēja, bet arī virkne citu faktoru. Piemēram, mazi, bet spoži (parasti spektra infrasarkanajā diapazonā) ugunsgrēki izgaismo pikseli pat tad, ja to ģeometriskie izmēri ir daudz mazāki par rezeļa izmēriem. Taču kāds rezeļa izmēra objekts var daļēji projicēties uz vairākiem attēla pikseļiem un netikt reģistrēts ne uz viena no tiem. Cits būtisks objektu reģistrējamības faktors ir virsmas tekstūra šī objekta apkārtnē. Sīku objektu daudz vieglāk reģistrēt (saskatīt) uz gludas, nevis raupjas virsmas.

Lai noteiktu un izvēlētos analizējamajai problēmai optimālo telpisko izšķirtspēju, ir lietderīgi veikt priekšizpēti, piemēram, veicot problēmas tuvinātu matemātisko modelēšanu. Apskatīsim vienu šādu piemēru.

2-27. att. augšējā kreisajā attēlā redzami 6 m diametra koku vainagu matemātiskās modelēšanas rezultāti ar 10 cm izšķirtspēju. Pārējos augšējās rindas attēlos izšķirtspēja samazināta līdz 50 cm un 1 m rezeļa izmēriem. Apakšējā rindā attēlu izšķirtspēju raksturo 2 m, 4 m un 8 m lieli rezeļi. Tādējādi iespējams uzskatāmi novērtēt, ka, analizējot 6 m diametra koku vainagus, optimālā izšķirtspēja ir ap 50 cm, jo jau pie rezeļu izmēra 1 m interesējošie objekti saplūst un to attēls sāk izzust. Līdzīgā veidā iespējams novērtēt optimālo telpisko izšķirtspēju arī citos tālīzpētes lietojumos.

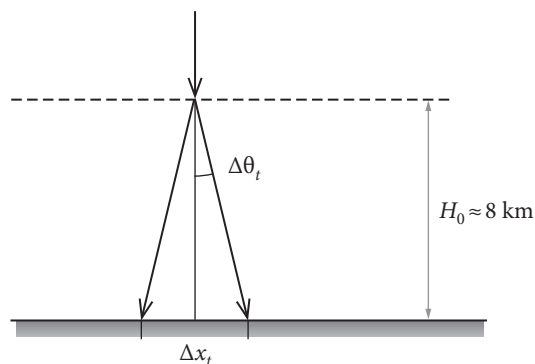
Slīpiem attēliem (2-28. att.) savukārt pārklājums ir lielāks nekā vertikāliem attēliem, bet izšķirtspēja attēlā ir mainīga. Tādēļ slīpo attēlu apstrāde ir komplicētāka.

Telpisko izšķirtspēju ietekmē arī fakts, ka, sasniedzot attēlā difrakcijas izšķirtspēju, punktveida objekts uz Zemes virsmas (par kādu var uzskatīt rezeli) uz detektora (pikseļa) projicējas kā centrālais difrakcijas maksimums (skat. 1.1.7. sadaļu), tā forma atkārto apertūras (t. i., objektīva) formu (gandrīz vienmēr ir apaļa). Pikseļi savukārt visbiežāk ir kvadrātiski (2-29. att.).

Tādējādi rezeļu riņķveida projekcijas tiek uzklātas (superpozētas) uz kvadrātiskiem pikseļiem, kas izraisa rezeļu projekciju daļēju pārklāšanos. Tas samazina attēla telpisko izšķirtspēju un ietekmē arī citas izšķirtspējas formas (radiometrisku un spektrālo).

2.2.3. Telpiskās izšķirtspējas robeža

MSS sistēmu telpisko izšķirtspēju ietekmē vairāki faktori. Kā pirmais no tiem minama



2-30. att. Turbulences ietekme uz vertikālu gaismas staru.

⁷ Par rezeli tālīzpētē sauc digitālā attēla pikselim atbilstošo apgabalu uz planētas (Zemes) virsmas.

atmosfēras turbulence, kas ir ļoti spēcīga troposfērā, aptuveni 8 km biezā atmosfēras slānī Zemes virsmas tuvumā. No ģeofizikāliem mērījumiem ir zināms, ka turbulences dēļ vertikāli krītošs gaismas stars tiek transformēts aptuveni koniskā staru kūlī ar centrālo leņķi $\Delta\Theta_t \approx 1''$ (skat. 2-30. att.).

Tas ļauj aprēķināt minimālā rezeļa izmēru, ko iespējams reģistrēt ar tālzipētes sistēmām bez turbulences efektu novēršanas⁸

$$\Delta x_t \cong 2H_0 \Delta\Theta_t \cong 5 \text{ cm}$$

Otrs tālzipētes sistēmu telpisko izšķirtspēju ierobežojošs faktors ir EMS difrakcija. Saskaņā ar teoriju (skat. 1.1.7. sadaļu) punktveida objekts uz Zemes virsmas (par kādu var uzskatīt rezeli) uz detektora projicējas kā centrālais difrakcijas maksimums ar leņķiskajiem izmēriem

$$\Delta\Theta_d = \frac{\lambda}{D}$$

kur λ – EMS viļņa garums, D – apertūras (t. i., izmantotās optiskās sistēmas objektīva) diametrs. Tādējādi difrakcijas dēļ minimālā rezeļa izmēri ir

$$\Delta x_d \cong H \Delta\Theta_d = H \frac{\lambda}{D}$$

kur H – platformas (satelīta) augstums virs Zemes virsmas.

Trešo būtisko telpiskās izšķirtspējas ierobežojumu nosaka sensora detektora (pikseļa) lineārais izmērs a , jo no tā ir atkarīgs atbilstošā rezeļa izmērs ģeometriskā nozīmē, proti

$$\Delta x_a = a \frac{H}{f}$$

kur f – izmantotās optiskās sistēmas efektīvais fokusa attālums.

Tālzipētes sistēmas reālo telpisko izšķirtspēju noteiks sliktākais no apskatītajiem faktoriem, tāpēc izmantojamās optiskās sistēmas fokusa attālumu ir lietderīgi izvēlēties tā, lai

$$\Delta x_d = \Delta x_a$$

t. i.,

$$H \frac{\lambda}{D} = a \frac{H}{f}$$

jeb

$$f = \frac{aD}{\lambda}$$

kā to arī parasti dara, projektējot tālzipētes MSS sistēmas. Maksimāli iespējamo telpisko izšķirtspēju Δx_t savukārt var sasniegt pie nosacījuma

$$\Delta x_t = \Delta x_d$$

t. i.,

$$2H_0 \Delta\Theta_t = H \frac{\lambda}{D}$$

jeb

⁸ Tos iespējams novērst, izmantojot adaptīvās optikas tehnoloģijas.

$$D = \frac{H\lambda}{2H_0\Delta\Theta_t}$$

Pēdējā formula ļauj aprēķināt sensora optiskās sistēmas optimālo apertūru. Lielāka diametra objektīvu izmantot nav jēgas, jo attēla telpisko izšķirtspēju tas neuzlabos, tikai nevajadzīgi palielinās MSS sistēmas izmēru, masu un izmaksas.

Laī kvantitatīvi raksturotu MSS tālīzpētes attēlu mērogu, telpisko pārklājumu un izšķirtspēju, apskatīsim 2-31. att., kurā redzams objekts uz Zemes virsmas un tā attēls uz augstumā H izvietotas tālīzpētes platformas sensora.

Par MSS attēla mērogu sauc attiecību

$$s = \frac{f}{H}$$

kur f – izmantotās optiskās sistēmas efektīvais fokusa attālums. Ja sensora detektoru vektora (vai matricas) lineārais izmērs ir w , tad par attēla telpisko pārklājumu sauc lielumu

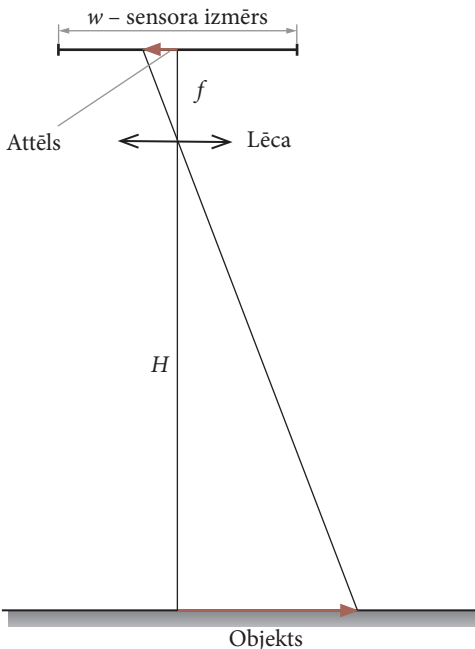
$$p = \frac{w}{s} = w \frac{H}{f}$$

Telpisko izšķirtspēju savukārt raksturo ar minimālā rezeļa izmēru

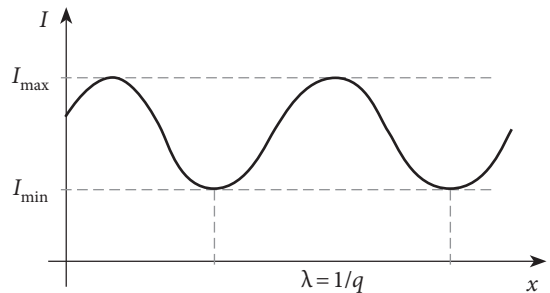
$$\Delta x_a = a \frac{H}{f}$$

Jo lielāks fokusa attālums f , jo labāka izšķirtspēja (mazāks Δx_a), bet mazāks telpiskais pārklājums p .

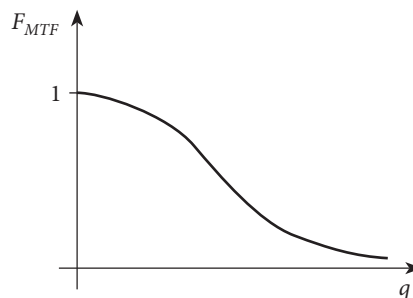
Nereti telpiskās izšķirtspējas raksturošanai lieto arī *MTF (modulation transfer function)* funkciju. Gan attēlam, gan (nosacīti) objektam (t. i., ideālam attēlam) var aprēķi-



2-31. att. Attēla veidošanās MSS tālīzpētes sistēmā.



2-32. att. Attēla (vai objekta) spektrālā komponente.



2-33. att. *MTF* funkcijas raksturīgs grafiks.

nāt Furjē spektrus, kuru komponentes ir sinusoīdas ar noteiktu modulācijas pakāpi (skat. 2-32. att.)

$$m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

tāpēc izšķirtspējas raksturošanai izmanto šādu *MTF* funkciju

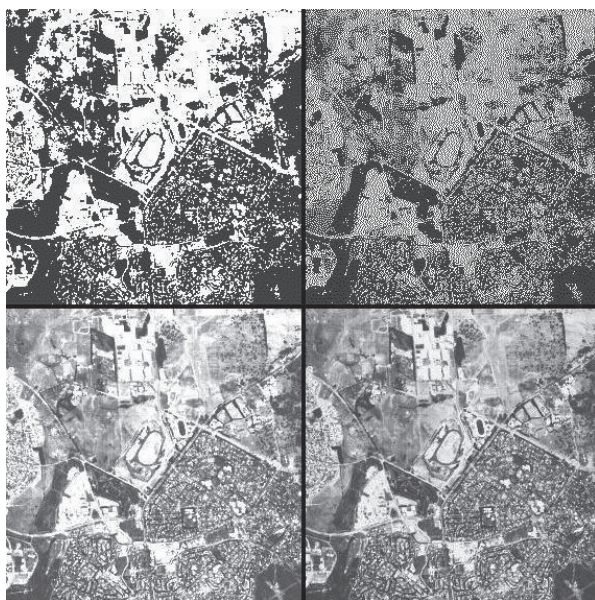
$$F_{MTF}(q) = \frac{m_{\text{att}}}{m_{\text{obj}}}$$

kas ir atkarīga gan no sensora detektoru matricas (vektora), gan izmantotās optiskās sistēmas īpašībām.

Kā *MTF* funkcijas argumentu parasti izmanto lielumu $q = 1/\lambda$, ko sauc par telpisko frekvenci. *MTF* funkcija ļauj noteikt ne tikai rezeļa minimālos izmērus, bet arī vairākus citus attēla telpisko izšķirtspēju rakturojošus lielumus.

2.2.4. Radiometriskā izšķirtspēja un pārklājums

Izšķirtspējas un pārklājuma attiecības var analizēt ne tikai telpiskā (t. i., rezeļu ģeometriskā izmēru) nozīmē, bet arī radiometriskā (t. i., pikseļa intensitātes pelēko vērtību) nozīmē. Šādā gadījumā pārklājumu raksturo intensitātes diskriminācijas līmeņu skaits, bet izšķirtspēju – šo diskriminācijas līmeņu radiometriskais platums. Ļoti bieži lieto 256 pelēko vērtību diskriminācijas līmeņus (jo tie ērti kodējami vienā baitā) starp melno (0) un balto (255) intensitātes vērtību. Taču jāņem vērā, ka cilvēka acs izšķir tikai 20 līdz 30 intensitātes pelēko vērtību līmeņus. Par to var pārliecināties, aplūkojot 2-34. attēlu, kura augšējā rindā redzami attēli ar diviem (binārais attēls) un četriem diskriminācijas līmeņiem. Apakšējā rindā savukārt redzami tie paši attēli ar 16 un 32 intensitāšu diskriminācijas līmeņiem. Ar



2-34. att. Attēli ar atšķirīgu radiometrisku izšķirtspēju.

aci nav saskatāmas būtiskas atšķirības apakšējās rindas attēlos, lai arī informācijas daudzums tajos atšķiras pat divas reizes. Tādējādi, ja attēls paredzēts vizuālai interpretācijai, tā radiometrisko diskriminācijas līmeņu skaitu var izvēlēties ievērojami mazāku par 256. Taču parasti tā nerīkojas, jo, strādājot ar krāsu attēliem, kurus formē trīs pamatkrāsām (zils, zaļš, sarkans) atbilstoši melnbaltie (pelēkie) attēli, jāreķinās ar faktu, ka cilvēka acs krāsu toņu izšķirtspēja ir tūkstošiem reižu smalkāka nekā interpretējot pelēkos līmeņus.

Ja attēls paredzēts vizuālai interpretācijai, tad tā skatāmības optimizēšanai pelēko vērtību līmeņi ir vienmērīgi jāsadala starp balto un melno intensitātes līmeni, t. i., jāizlīdzina tā histogramma (skat. 3.1.4. sadaļu). To tehniski bieži īsteno, izmantojot ekspozīcijas automātiskās kontroles sistēmas. Taču attēla skatāmības uzlabošana nepalielina informācijas daudzumu tajā, bet tikai uzskatāmāk to vizualizē.

Pavisam cita pieeja izmantojama gadījumos, kad attēls paredzēts datorizētai objekta interpretācijai un ir jāveic tā struktūras elementu (parametru) mērīšana. Tad radiometriskie diskriminācijas līmeņi ir rūpīgi jākalibrē, lai attēla pikseļu intensitātes vērtības varētu izmantot mērījumu rezultātu precīzai aprēķināšanai.

Piemēram, ESA tālzipētes satelīta “Sentinel-2A” MSS izmanto 4095 radiometriskās diskriminācijas līmeņus (12 bitu reprezentācija). Ja attēlam ir n spektrālās joslas un N bitu reprezentācijas radiometriskā izšķirtspēja, tad pavisam iespējams izveidot $(2^N)^n$ krāsu toņu kombinācijas.

Redzamās gaismas diapazonā (trīs spektrālās joslas) ar 256 radiometriskās diskriminācijas līmeņiem ($N=8$) iespējamās $(2^8)^3 = 16777216$ kombinācijas. Šī ir t. s. 16 miljonu krāsu toņu sistēma, kas labi atbilst cilvēka acu krāsu izšķirtspējas īpatnībām.

2.2.5. Spektrālā izšķirtspēja un pārklājums

Spektrālo izšķirtspēju nosaka multispektrālā sensora spektrālo joslu platums – jo tās šaurākas, jo spektrālā izšķirtspēja augstāka. Spektrālo pārklājumu savukārt nosaka sensora spektrālo joslu skaits vai to platumu summa, vai arī noklātais EMS spektra diapazons.

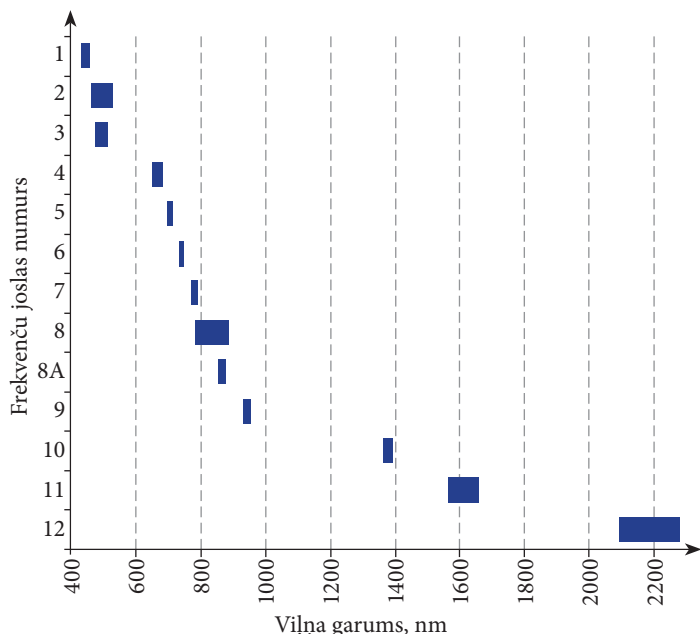
Praksē, kā tas redzams 2-35. att., izmanto atšķirīga platuma spektrālās joslas (t. i., spektrālā izšķirtspēja nav viendabīga), un EMS spektra diapazona pārklājums nav nepārtraukts. Šādu reālo situāciju nosaka dažādi praktisko lietojumu īpatnību un inženiertehniskās izcelsmes nosacījumi.

Tālāk iepazīsimies ar biežāk izmantotajām MSS frekvenču joslām.

- **Panhromatiskā josla** – plata EMS frekvenču josla (faktiski – diapazons), kas ietver vairākas starojuma apakšjoslas, piemēram, visu redzamās gaismas RGB diapazonu. Jo platāka frekvenču josla, jo stiprāks signāls un labāka signāla/troksņa attiecība. Tādēļ panhromatiskajiem attēliem parasti ir augstāka telpiskā izšķirtspēja nekā citās MSS joslās.
- **Aerosolu josla** (0,43 līdz 0,45) μm . Šajā spektrālajā joslā ūdens absorbcija ir vāja, tādēļ to izmanto ar ūdeni klātu teritoriju izpētē (ūdens piesārņojuma monitorings u. c.). Izmanto arī atmosfēras korekcijas algoritmos un mākoņu ietekmes mazināšanai tālzipētes attēlos.
- **Zilā (B) starojuma josla** (0,45 līdz 0,51) μm . Šī spektrālā josla ir īpaši noderīga ūdens

teritoriju izpētei (turbulenču, sedimentu, aļģu koncentrācijas novērtēšanai), kā arī mākoņu, dūmu, miglas un sniega analīzei.

- **Zaļā (G) starojuma josla** (0,53 līdz 0,59) μm . Šo spektrālo joslu izmanto zaļās veģetācijas analīzei un pētniecībai.
- **Sarkanā (R) starojuma josla** (0,64 līdz 0,67) μm . Hlorofila sarkanā starojuma absorbcijas dēļ (R) josla ļauj viegli atšķirt veģetāciju no citiem pētāmās virsmas materiāliem (apbūves, augsnes vai citām faktūras komponentēm). To izmanto arī augsnes parametru novērtēšanai (lietojumos lauksaimniecībā).
- **Sarkanā starojuma (RE⁹) robežjosla** (0,705 līdz 0,745) μm . Veģetācija intensīvi absorbē sarkano EMS, taču atstaro tuvu infrasarkanā starojumu, tādēļ RE spektrālo joslu bieži izmanto veģetācijas veselības stāvokļa novērtēšanai, jo tajā tiek reģistrētas izmaiņas augu slimību gadījumos.
- **Tuvā infrasarkanā (NIR) josla** (0,76 līdz 1,04) μm ir plata josla, tādēļ to nereti dala vairākās NIR apakšjoslās. Jo lielāks EMS viļņa garums λ , jo mazāk izpaužas atmosfēras ietekme. NIR spektrālo joslu izmanto veģetācijas un biomasas apjomu novērtēšanai, un tā ļauj efektīvi identificēt ūdens teritorijas.
- **Spalvmākoņu josla** (1,36 līdz 1,38) μm ļauj novērot dažādas atmosfēras struktūras (kas attēlos izskatās līdzīgas spalvu mākoņiem), kamēr Zemes virsma saskatāma vāji. Šo spektrālo joslu izmanto atmosfēras korekcijas algoritmos un mākoņu ietekmes mazināšanai attēlos.
- **Vidējā (jeb īsviļņu) infrasarkanā (SWIR) josla** (1,75 līdz 2,35) μm – arī šo relatīvi plato joslu nereti dala apakšjoslās. To izmanto minerāliežu un augsnes parametru noteikšanai, kā arī veģetācijas parametru un mitruma daudzuma novērtēšanai.



2-35. att. Satelīta "Sentinel-2B" spektrālās joslas.

9 RE – Red Edge.

- **Termālā infrasarkanā (TIR) josla** (3,0 līdz 20,0) μm . Šajā spektrālajā joslā lieto cita tipa (t. s. bolometriskos) sensorus, kuru telpiskā izšķirtspēja ir zemāka nekā pusvadītāju sensoriem. Taču TIR josla ir noderīga vulkānisko aktivitāšu reģistrēšanai, urbāno teritoriju izpētei, kā arī Zemes virsmas termiskās inerces mērījumu veikšanai.

2.2.6. Jaukto pikseļu ietekme

Kā minēts iepriekš (skat. 2.1.3. sadaļu), hiperspektrālā koncepta izmantošanas gadījumos spektrālo signatūru reprezentē nepārtraukta EMS viļņa garuma λ funkcija. Multi-spektrālā koncepta izmantošanas gadījumos katrai spektrālajai joslai atbilst diskrēta refleksijas vērtība, un šo vērtību kopu ir loģiski reprezentēt ar n -dimensionālu spektrālo vektoru

$$\underline{s} = \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_n \end{Bmatrix}$$

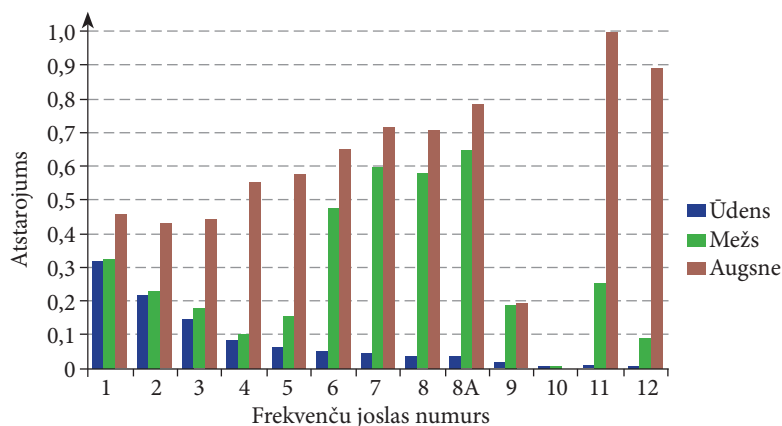
kur ρ_j – reflektances vidējā vērtība katrā spektrālajā joslā (kanālā), n – spektrālo joslu skaits.

2-36. att. redzamas satelīta “Sentinel-2B” MSS reģistrētās reflektances vērtības (spektrālie vektori) trim atšķirīgiem pikseļiem tālīzpētes attēlā, kam atbilst trīs atšķirīgi Zemes pārseguma tipi: ūdens, mežs un atklāta augsne. Līdzīgi kā spektrālās signatūras (skat. 2-4. att.), arī spektrālie vektori šiem faktūras elementiem ir visai atšķirīgi.

Spektrālos vektorus $\underline{s}$ sekmīgi lieto n -dimensionālos vadītās vai nevadītās klasifikācijas algoritmos (skat. 3.5. nodaļu), kas izmanto objektu krāsas (toņa) interpretācijas atslēgas. Šie algoritmi ļauj efektīvi atdalīt attēlu formālās klases un, izmantojot atbalsta datus, pakārtot tās pētāmā zemes apgabala faktiskajām klasēm. Taču šo klasifikāciju būtiski apgrūtina t. s. jauktie pikseļi un to kopas.

Tālīzpētes attēlos jauktie pikseļi parasti veidojas šādos gadījumos:

- (a) pikselim atbilstošais rezelis ietver lineāru struktūru, kas ir mazāka par rezeļa izmēriem;



2-36. att. Spektrālo signatūru vektorālā reprezentācija.

- (b) rezeli notiek pakāpeniska pāreja starp diviem vai vairākiem zemes virsmas pārseguma tiptiem;
- (c) rezelis ietver robežu starp diviem vai vairākiem zemes virsmas pārseguma tiptiem;
- (d) rezelis ietver dažādu atšķirīgu objektu kopu.

Jaukto pikseļu stingrā klasifikācija (kad tiek interpretēts, ka pikselis pieder vienai noteiktai klasei) var radīt nepareizu priekšstatu par pētāmo zemes virsmas apgabalu. Problēmas risināšanai ir izstrādātas vairākas metodes¹⁰, gan iekļaujot ticamības rādītājus stingrās klasifikācijas rezultātos (tos aprēķina ar tuvāko kaimiņu metodi), gan izmantojot t. s. “fazi-klasifikācijas” algoritmus (balstīti “izplūdušo kopu” teorijas metodēs), gan arī analizējot pikselim atbilstošo spektrālo vektoru. Pēdējo no šīm metodēm sauc par pikseļa spektra modelēšanu, un ar to iepazīsimies mazliet detalizētāk.

Lineārā tuvinājumā pikseļa spektrālo vektoru var uzrakstīt formā

$$\underline{s} = \underline{M}\underline{f} + \underline{\varepsilon}$$

kur $\underline{M}$ – matrica, kuras kolonnas veido kāda tirā zemes pārseguma tipa spektrālie vektori, $\underline{f}$ – vektors, kas parāda katra zemes pārseguma tipa relatīvo klātbūtni pikselim atbilstošajā rezeli, $\underline{\varepsilon}$ – vektors, kas raksturo to spektra daļu, kas nav modelējama apskatāmā lineārā modeļa ietvaros. Ja šī pēdējā vektora ietekme (t. i., tā moduļa vērtība) nav liela, tad tuvināti

$$\underline{s} \cong \underline{M}\underline{f}$$

un varam aprēķināt katra zemes pārseguma tipa relatīvo klātbūtni pikselim atbilstošajā rezeli

$$\underline{f} \cong \underline{M}^{-1}\underline{s}$$

Šī lineārā modeļa vienādojumu skaitu nosaka spektrālo joslu skaits, tāpēc vienādojumu sistēma ir atrisināma, ja zemes pārseguma tipu skaits ir mazāks vai vienāds ar spektrālo joslu skaitu. Ja etalonspektri, kas formē matricas $\underline{M}$ kolonnas, ir līdzīgi, piemēram, nedaudz atšķirīgi veģetācijas tipi, metode strādā slikti. Taču iespējami dažādi metodes uzlabojumi, tostarp etalonspektru kopu (t. s. bibliotēku) izmantošana, vai arī mazāko kvadrātu metodes izmantošana gadījumos, kad spektrālo joslu skaits ir liels.

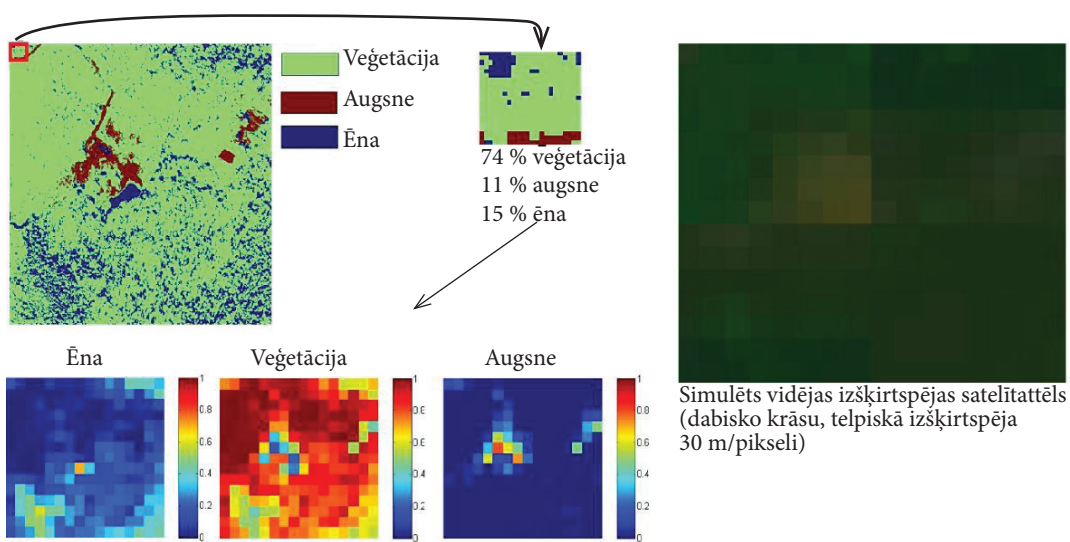
2-38. att. labajā pusē redzams simulēts dabisko krāsu vidējas izšķirtspējas (rezeļu izmēri 30 m) attēls, kas aprēķināts, izmantojot kreisajā pusē attēlotos atbalsta datus (augstas izšķirtspējas klasificēti¹¹ aerofotogrāfiju dati) un to apakškopas. Nedaudzu spektrālo joslu pieejamības gadījumos visbiežāk izmanto tieši šīs trīs zemes virsmas pārseguma grupas: ēnas, veģetāciju un augsni (kā arī ūdeni), jo tās ir spektrāli viegli atdalāmas.

¹⁰ Sauktas par nestingrās klasifikācijas metodēm.

¹¹ Par klasifikāciju skat. 19. lekciju.



2-37. att. Jaukto pikselu veidošanās piemēri.



2-38. att. Spektra modelēšanas izmantošanas piemērs.

2.2.7. Temporālā izšķirtspēja un pārklājums

Temporālo izšķirtspēju un pārklājumu izmanto gadījumos, kad ir jāseko parādību izmaiņām. Lai tās adekvāti reģistrētu, jāseko pētāmo parādību izmaiņu tempam, kā arī rūpīgi jānovāc dažādu blakusapstākļu ietekme. Izmaiņu detektēšana ir sarežģīta, jo attēlu biežas atkārtotamības cikli parasti nav saprātīgi izmantojami, jo tādos vairāk mainās blakusapstākļi, nevis pētāmā parādība.

2-39. att. redzams viens un tas pats zemes virsmas apgabals četros gadalaikos (ziemā, pavasarī, vasarā un rudenī). Lai arī būtiskas (t. i., reģistrējamas) izmaiņas nav notikušas, tālīzpētes attēli ir ļoti atšķirīgi, ko nosaka blakusapstākļu (sniega segas, veģetācijas u. c. faktoru) ietekme. Lai salīdzinātu un novērtētu, piemēram, veģetācijas izmaiņas, atkārtotamības ciklu ir saprātīgi izvēlēties viena gada garumā, kas atbilst augu attīstības fenoloģiskajām fāzēm. Taču gada jēdziens šādā gadījumā parasti neatbilst kalendārajam gadam, jāņem vērā arī klimatiskās korekcijas (agrs vai vēls pavasaris u. c.). Tādējādi problēma ir daudz komplicētāka, nekā var šķist sākumā.

Cits blakus faktors, kurš ietekmē izmaiņu detektēšanu un kura ietekmi pārvērtēt nav iespējams, ir ēnas. Lai ēnu blakusefektus iespējami mazinātu, izmanto Saules sinhronās precīzās atkārtotamības orbītas (skat. 3.6. nodaļu). Cits izplatīts paņēmieni ēnu un citu apgaismojuma izmaiņu blakusefektu mazināšanai ir t. s. spektrālo attiecību izmantošana.

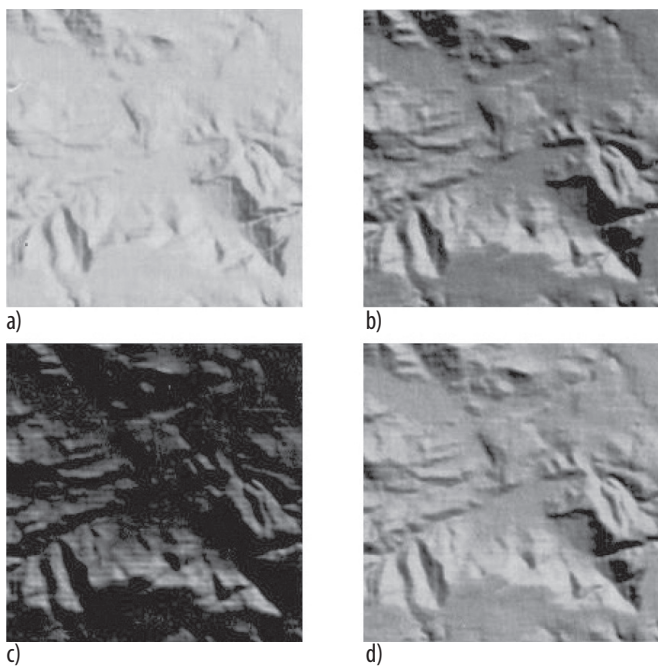
Apskatām 2-40. att. redzamo situāciju, un dalām sensora vienas spektrālās joslas reģistrēto vērtību DN^{12} (konkrētām mērvienībām te vairs nav nozīmes, jo spektrālās attiecības ir bezdimensionālas) ar citas spektrālās joslas atbilstošo DN . Šīs spektrālās attiecības praktiski nav atkarīgas no apgaismojuma maiņām (tostarp ēnām). Kā spektrālo attiecību izmantošanas piemēru novērtēsim iespēju atšķirt lapu kokus no skuju kokiem (rezultāti apkopoti 2-1. tabulā).

Ja izmanto n spektrālās joslas, ir iespējams aprēķināt un izmantot $n(n-1)/2$ neatkarīgas spektrālās attiecības. Metode ir efektīva, un tai ir izstrādāta virkne modifikāciju. Piemēram, lai izvairītos no ļoti lielām spektrālo attiecību skaitliskajām vērtībām, kas veidojas, ja to saucējos ir nullei tuvas DN vērtības, nereti izmanto formulu

$$a_{A/B} = R \arctan \frac{DN_A}{DN_B}$$

kurā ar R apzīmēts t. s. mēroga faktors.

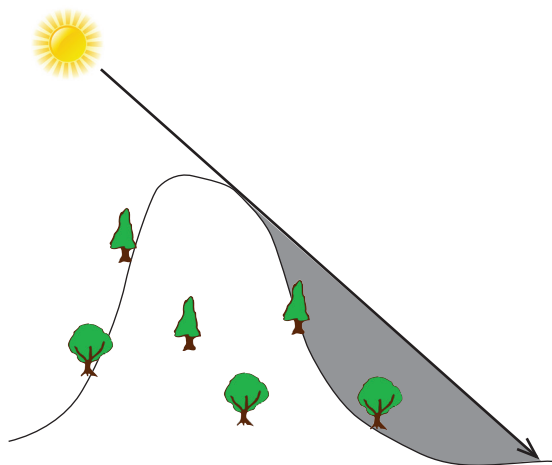
¹² DN – Digital Number.



2-39. att. Apgabals bez būtiskām izmaiņām dažādos gadalaikos.

2-1. tab. Spektrālo attiecību izmantošana lapu koku un skuju koku nošķiršanā.

Koki	Apstākļi	A josla (DN)	B josla (DN)	Attiecība A/B
Lapu koki	saulē	48	50	0,96
	ēnā	18	19	0,95
Skuju koki	saulē	31	45	0,69
	ēnā	11	16	0,69



2-40. att. Spektrālo attiecību formēšanas piemērs.

2.3. Lidaru tehnoloģijas (11. lekcija)

2.3.1. Kopsavilkums

Lidaru veiktie mērījumi ļauj efektīvi analizēt Zemes virsmu un tās objektu trīsdimensionālo struktūru. Lāzermērījumos iegūtie dati ir nevis tālzipētē pierastajā attēla formā, bet gan punktu mākoņa veidā. Iepazīsimies ar lidaru tehnoloģiju pamatprincipiem, iegūto datu interpretācijas metodēm un šo tehnoloģiju svarīgāko informācijas produktu – digitālo augstuma modeļu izveides pamatiem. Nobeigumā īss ieskats arī citās lidartehnoloģiju lietošanas jomās.

2.3.2. Ievads un vēsture

Lidari (*LIDAR – Light Detecting And Ranging*) ir tālzipētes ierīces, kas funkcionē, izmantojot lāzeru starojumu. Tās, līdzīgi radariem (skat. 2.4. nodaļu), ir tālzipētes aktīvās ierīces, kas pašas apstaro pētāmo planētas (Zemes) virsmu ar EMS tā optiskajā (*VIR*) diapazonā. Sākotnēji optisko lāzeru (lidaru) tehnoloģijas ģeofizikālai izpētei tika izveidotas un attīstītas 20. gadsimta 80. gados, atmosfēras zondēšanai izmantojot uz Zemes virsmas izvietotas mēriekārtas. Analizējot lāzera stara EMS difūzo izkliedi, bija iespējams izmērīt izkļiedzošo objektu (gāzu molekulu, aerosolu, šķidrums pilieniņu, ledus kristāliņu u. c.) parametrus un to koncentrāciju atmosfērā. Veicot izkļiedētā starojuma Doplera mērījumus, parādījās iespēja mērīt arī vēja ātrumu dažādos augstumos.

20. gadsimta 90. gados ģeofizikālo lidartehnoloģiju grupu papildināja lāzertālmēru tehnoloģijas, kuras līdz tam izmantoja citās pietuvinātās jomās, piemēram, satelītu lāzerlokācijai. Tas bija iespējams, jo parādījās iespēja nodrošināt lidaru aeroplatformu¹³ precīzu telpisko lokalizāciju, izmantojot globālo pozicionēšanas sistēmu GPS. Mūsdienās pieejamais GPS un citu GNSS¹⁴ sistēmu pakalpojumu līmenis (lietojot relatīvo pozicionēšanu [13] kopā ar IMU¹⁵, t. i., inerciālo mērījumu piesaisti) nodrošina tālzipētes platformu telpisko lokalizāciju ar aptuveni ±10 cm precizitāti. Tas ļauj veikt precīzus lāzertālmēru mērījumus no platformas līdz Zemes virsmai, izmantojot vienkāršu formulu

$$l = c \frac{\Delta t}{2}$$

kur Δt – lāzerimpulsu izplatīšanās laiks (turp un atpakaļ), c – EMS (gaismas) izplatīšanās ātrums. Tālzipētes (lidaru) datu sekmīgai ieguvei nepieciešams arī precīzs atompulkstēnis Δt mērījumu veikšanai, kā arī droša un ietilpīga datu glabātuve.

2.3.3. Dati un to raksturlielumi

Lidaru datus iegūst, izmantojot impulsu lāzerus ar takts frekvenci no 20 Hz līdz 75 kHz. Visbiežāk lietotie EMS viļņu garumi tālzipētes lidaros ir:

¹³ Lidartehnoloģijas lieto arī, izmantojot satelītplatformas, taču retāk.

¹⁴ GNSS – *Global Navigation Satellite System*.

¹⁵ IMU – *Inertial Measurement Unit*.

- $\lambda = (1040 \text{ līdz } 1060) \text{ nm}$ (IR diapazons) – mērīšanai virs cietzemes;
- $\lambda = 532 \text{ nm}$ (zaļā gaisma) – mērīšanai virs ūdenstilpēm (batimetriskie lidari).

Vēsturiski pirmie bija tieši batimetriskie lidari, ko izmantoja ūdenstilpju gultņu mērījumiem.

Mērījumu veikšanas vispārīgā shēma lidartechnoloģiju gadījumos ir līdzīga citiem tālizpētes datu ieguves veidiem (2-41. att.).

Tipiski skenēšanas leņķi (2-41. attēlā 2z) ir no 1° līdz 75° , un tiek lietotas dažādas skenēšanas shēmas (2-42. att.).

Vieglāk apstrādāt datus, kas iegūti no mērījumiem ar mazu skenēšanas leņķi 2z, taču šādos gadījumos grūti nodrošināt adekvātu telpisko pārklājumu. Tādēļ nereti strādā, izmantojot lielus skenēšanas leņķus. Datus uzkrāj koordinātu formā (bieži kā ASCII vai ".las" formāta datnes) darbam izvēlētajā koordinātu sistēmā (Latvijā lieto koordinātu sistēmu LKS-92).

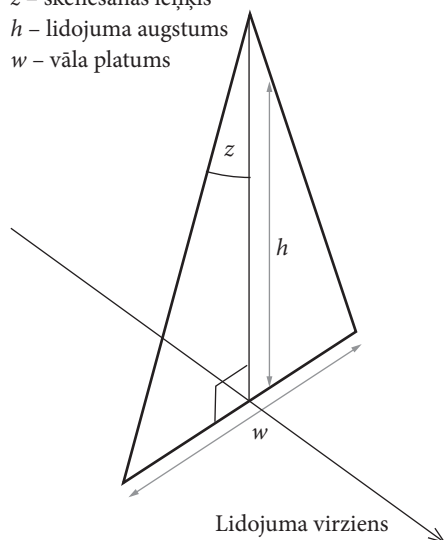
2-2. tab. Lidarmērījumu datnes piemērs.

X	Y	Z	I	N	R	C
597847,589	7336016,990	329,020	1	3	1	3
597847,290	7336017,230	325,050	1	3	3	1
597846,979	7336017,490	320,780	1	3	3	1
597845,609	7336017,429	319,820	14	1	1	1
597842,969	7336017,230	319,330	18	1	1	2
597840,359	7336017,009	319,060	17	1	1	2
597838,520	7336016,200	328,500	8	1	1	1
597836,849	7336016,370	323,710	5	2	1	3
597836,469	7336016,660	318,960	0	2	2	2

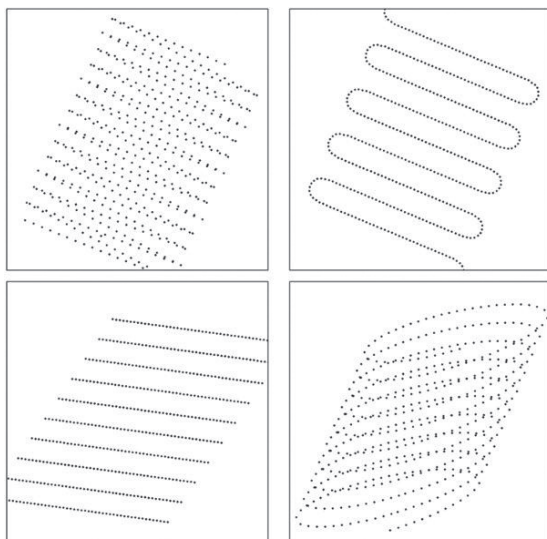
z – skenēšanas leņķis

h – lidojuma augstums

w – vāla platums



2-41. att. Lidarmērījumu veikšanas vispārīgā shēma.



2-42. att. Lidarskenēšanas shēmas uz Zemes virsmas.

Mērījumu punktu koordinātas X un Y tiek izteiktas metros attiecībā pret Zemes masas centru, koordināta Z – metros virs referencilipsoīda. Nereti punkta koordinātām pievieno arī papildinformāciju, kā tas ir 2-2. tab., kur:

- I – atstarotā lāzerimpulsa intensitāte;
- N – reģistrēto atstarojumu skaits;
- R – kuram no atstarojumiem atbilst reģistrētās koordinātas;
- C – atstarojošās virsmas klasifikators.

Iegūstot un apstrādājot lidarmērījumu, ir jārēķinās ar to, ka atstarojumi bieži ir vairāki. Tie veidojas, lāzerimpulsam reflektējot no koku zariem, pameža, zemes virsmas u. tml. Atstarojumu intensitāte savukārt ir atkarīga no virsmu veidojošo objektu faktūras un tekstūras, tādējādi to var interpretēt līdzīgi kā MSS gadījumos.

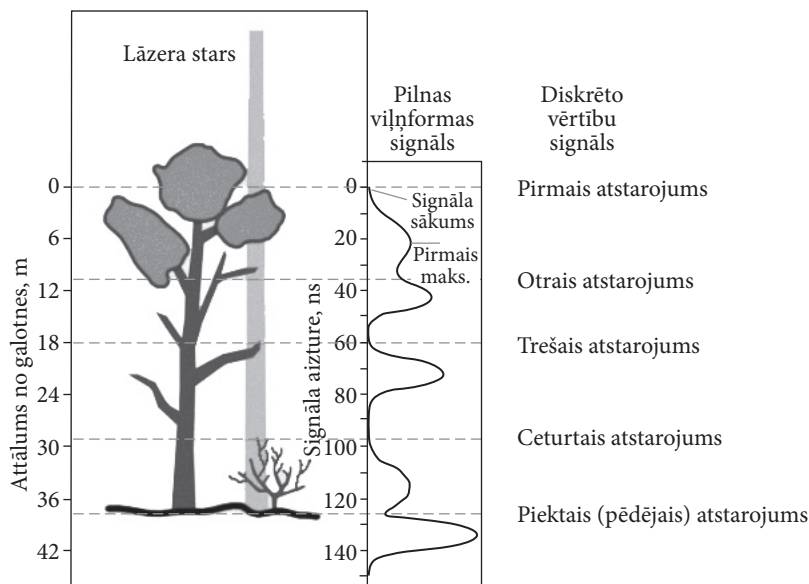
Reflektēto signālu var reģistrēt divos atšķirīgos veidos:

- kā diskreto vērtību (atstarojumu punktu koordinātu) kopu jeb vektoru;
- kā nepārtrauktu funkciju jeb t. s. pilnas viļņformas signālu (2-43. att.).

Izmanto abas pieejas, un tās idejiski atbilst tālīzpētes MSS tehnoloģiju multispektrālajam un hiperspektrālajam gadījumam.

Cits svarīgs lidarmērījumu datu parametrs ir punktu blīvums, ko raksturo mērījumu punktu skaits uz pētāmās virsmas kvadrātmētru. Jo lielāks ir punktu blīvums, jo plašākas ir datu interpretācijas iespējas, kā arī informācijas produktu izveides iespējas, izmantojot šos datus. Piemēram, ja punktu blīvums ir:

- < 2 punkti/ m^2 – dati izmantojami liela mēroga digitālo augstuma modeļu (DEM^{16}) izstrādei;
- 2 līdz 5 punkti/ m^2 – dati izmantojami, lai atdalītu zemes virsmas modeļus no reljefa modeļiem, kā arī mežsaimniecībā;
- > 10 punkti/ m^2 – dati izmantojami precīzai būvju un ēku modelēšanai pilsētvidē.



2-43. att. Reģistrācijas formu salīdzinājums.

¹⁶ DEM – Digital Elevation Model.

Punktu blīvuma vizuālizācija $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ (proti, 100 m^2) lieliem zemes virsmas laukumiem redzama 2-44. att.

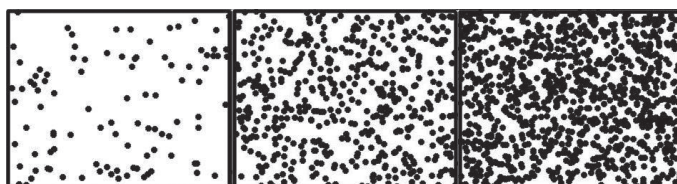
Latvijas Republikas Aizsardzības ministrijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra (LĢIA) no 2014. gada veic mūsu valsts teritorijas apgabalu lidarskenēšanu ar punktu blīvumu vidēji 4 punkti/ m^2 (turklāt vidēji 1,5 punkti/ m^2 no tiem ir refleksijas no zemes virsmas).

2.3.4. Vertikālā un horizontālā precizitāte

Nemot vērā augsto mērījumu punktu blīvumu, lidaru datus var reprezentēt attēlu formā (kodējot intensitātes līmeņus pēc punktu augstuma virs referencilipsoīda, pēc atstarojumu skaita vai kā citādi).

Ja kodēti punktu augstumi virs referencilipsoīda, tad vertikālo izšķirtspēju reprezentē šo attēlu radiometriskā izšķirtspēja, ko nosaka galvenokārt sensora telpiskās lokalizācijas precizitāte (aptuveni robežās 10 cm līdz 20 cm). Horizontālo izšķirtspēju savukārt reprezentē šo attēlu telpiskā izšķirtspēja, ko nosaka mērījumu punktu blīvums. Horizontālo izšķirtspēju ierobežo ar lāzeru apstarotā laukuma diametrs uz zemes virsmas, kas parasti ir 30 cm līdz 50 cm robežās. Taču jebkurā gadījumā lidarmērījumu precizitāte (gan vertikālā, gan horizontālā) ir par kārtu augstāka nekā digitālajiem augstuma modeļiem (*DEM*), kas iegūti ar citām metodēm (radaraltimetrijas vai fotogrammetriskajām tehnoloģijām).

Tas labi redzams 2-46. att. un 2-47. att. Pirmajā no tiem attēlots digitālais augstuma mo-



2-44. att. Punktu blīvuma vizuālizācija (1; 5; 10 punkti/ m^2) lidarmērījumu mākonī.



2-45. att. Lidaru datu reprezentācija attēla formā.

delis (viens no precīzākajiem) ar 10 metru horizontālo izšķirtspēju, otrajā – tā paša zemes virsmas apgabala lidarattēls ar 2 metru horizontālo izšķirtspēju.

2.3.5. Digitālie augstuma modeļi

Lāzera impulsu vairākkārtīgās refleksijas no zemes virsmas objektiem ļauj reģistrēt dažādus virsmas reljefa slāņus.

Augšējā līmeņa refleksijas 2-48. att. ir no koku galotnēm, vidējā līmeņa refleksijas – no pameža, bet zemākā līmeņa refleksijas – no zemes virsmas.

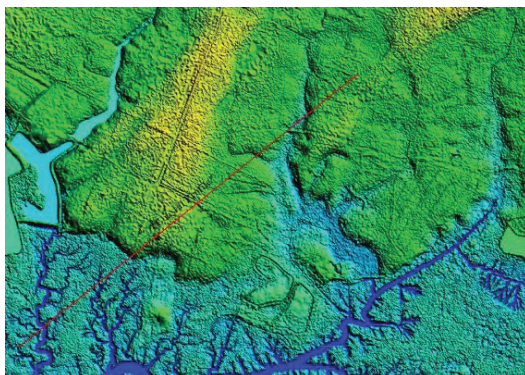
Vairākkārtīgās refleksijas ļauj strukturēt DEM divās grupās:

- digitālajos virsmas modeļos (DVM jeb DSM^{17}), t. i., zemes virsmas trīsdimensionālās (3D) reprezentācijās, kas ietver arī objektus uz tās (kokus, ēkas u. c.);
- digitālajos reljefa modeļos (DRM jeb DTM^{18}), t. i., zemes virsmas trīsdimensionālās (3D) reprezentācijās, kas attēlo virsmas reljefu bez objektiem uz tā (skat. 2-49. att.).

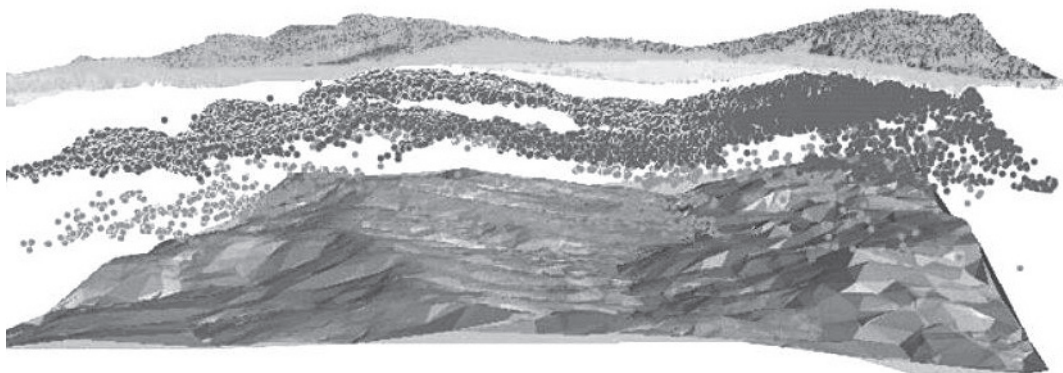
Digitālajam virsmas modelim (DVM) atbilst lāzera impulsu pirmās refleksijas, digitāl-



2.46. att. DEM ar 10 m horizontālo izšķirtspēju.



2.47. att. Lidarattēls ar 2 m horizontālo izšķirtspēju.



2-48. att. Refleksijas no dažādiem virsmas reljefa slāņiem.

17 DSM – Digital Surface Model.

18 DTM – Digital Terrain Model.

lajam reljefa modelim (DRM) – pēdējās refleksijas. Turklāt zemes virsmu ar lāzerimpulsu refleksijām var “uztaustīt” pat relatīvi blīvā mežā, kad ar citām metodēm to praktiski izdarīt nav iespējams (2-50. att.).

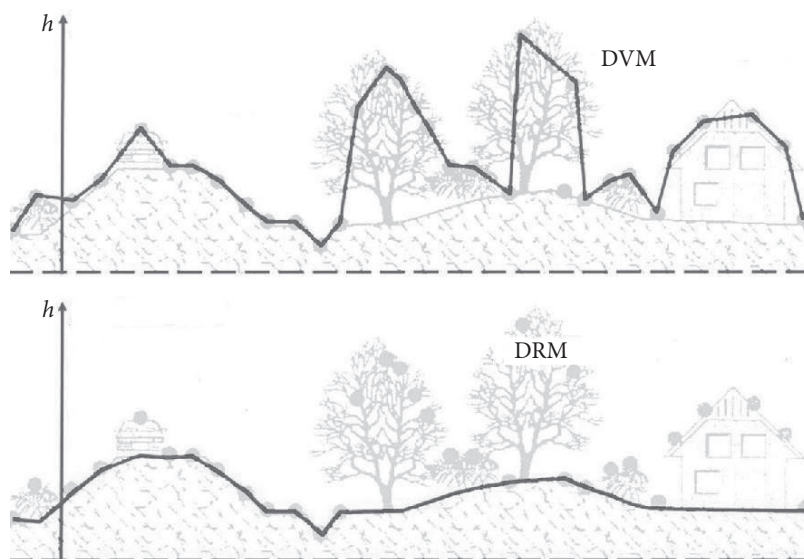
Bez DVM un DRM lieto arī to kombinācijas, piemēram, t. s. normalizēto virsmas modeli (nDVM jeb nDSM), ko definē sakarība

$$nDVM = DVM - DRM$$

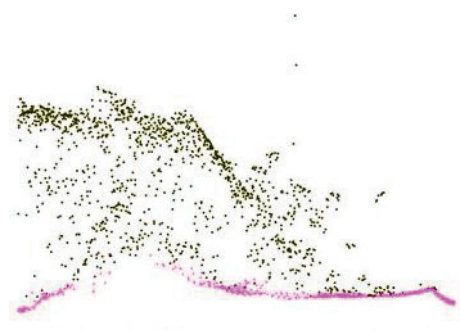
Normalizētais virsmas modelis raksturo tikai virsmas objektu telpisko struktūru bez virsmas reljefa klātbūtnes.

Digitālos virsmas modeļus veido, projicējot uz modeļa režģa lidarattēla punktu mākonī un ar tuvākā kaimiņa metodi aprēķinot režģa šūnu vērtības. Ja modeļa režģa struktūra ir smalkāka nekā attēla punktu mākoņa telpiskā izšķirtspēja, tad atsevišķas režģa šūnas paliks neaizpildītas. Šādos gadījumos visbiežāk vai nu palielina režģa šūnu izmēru, vai arī ar interpolāciju aprēķina neaizpildīto šūnu vērtības.

Digitālos reljefa modeļus bieži veido, izmantojot Krausa un Feifera 1998. gadā piedāvāto



2-49. att. Digitālā virsmas modeļa (DVM) un digitālā reljefa modeļa (DRM) piemērs [33].



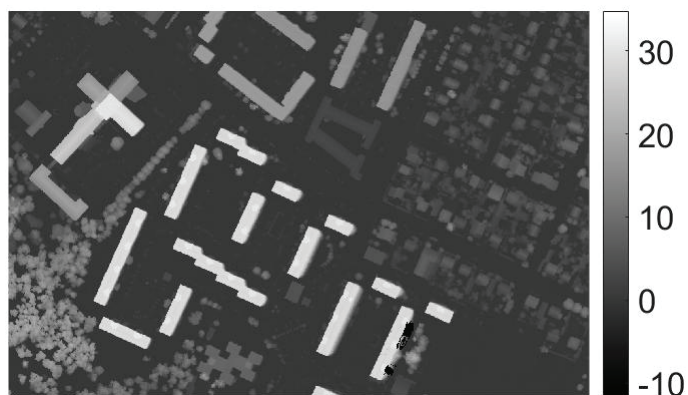
2-50. att. Vairākkārtējo refleksiju punktu mākonis.



2-51. att. Pilsētvides kvartāla DVM (lidarattēls).



2-52. att. Tā paša kvartāla DRM.



2-53. att. Tā paša kvartāla nDVM.

metodi, kuras būtība ir šāda:

- vispirms caur punktu mākoņa zemākajiem punktiem ar mazāko kvadrātu metodi izvelk aproksimējošu virsmu, kas visticamāk atradīsies virs zemes virsmas reljefa virsmas;
- tiem punktu mākoņa punktiem, kas atrodas zem šīs virsmas (tie, visticamāk, atbilst patiesajai reljefa virsmai) piešķir svaru vērtības $p_i = 1$;
- punktiem virs šīs virsmas, kas atrodas ievērojami augstāk (t. i., kuru augstums virs aprēķinātās virsmas pārsniedz kritisko vērtību $h_{\max}$), piešķir svaru vērtības $p_j = 0$;
- punktiem virs šīs virsmas, kas atrodas tai ievērojami tuvāk, t. i., to augstums nepārsniedz kritisko vērtību $h_{\max}$, piešķir svaru vērtības

$$p_k = \frac{1}{1 + ah_k^b}$$

kur $h_k < h_{\max}$ – punkta augstums virs aproksimējošās virsmas, a un b – modeļa parametri.

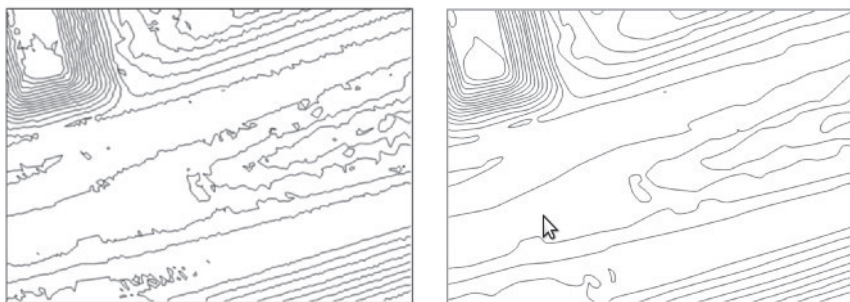
Procesu ieciklo un turpina tik ilgi, kamēr aproksimējošā virsma vairs būtiski nemainās. Šādi aprēķināto virsmu uzskata par atbilstošu DRM. Arī to bieži, izmantojot interpolāciju, reprezentē kā rastra attēlu vai arī attēlo izolīniju (kontūru) formā (2-54. att.).

2.3.6. Informācijas produktu veidošana

Digitālie augstuma (DEM), virsmas (DVM) un reljefa (DRM) modeļi nav vienīgie informācijas produkti, ko iespējams veidot, izmantojot lidaru datus. Rastra līmenī tam var izmantot arī citu ar lidariem reģistrētu informāciju, piemēram, lāzerpulsu atstarojuma intensitāti (2-55. att.), atstarojumu skaitu (2-56. att.) vai arī dažādas šīs informācijas un augstuma mērījumu kombinācijas.

Izmantojot minēto papildinformāciju, iespējams padziļināti analizēt pētāmā zemes virsmas apgabala faktūras un tekstūras īpašības un parametrus. Samērā bieži rastra attēlus, kas iegūti ar lidartehnoloģijām, pārveido vektorialā formā, izmantojot dažādus ģeometriskus modeļus, lai padarītu ērtāku analizējamo objektu apstrādi ar specifiskām lietotnēm (programmatūrām).

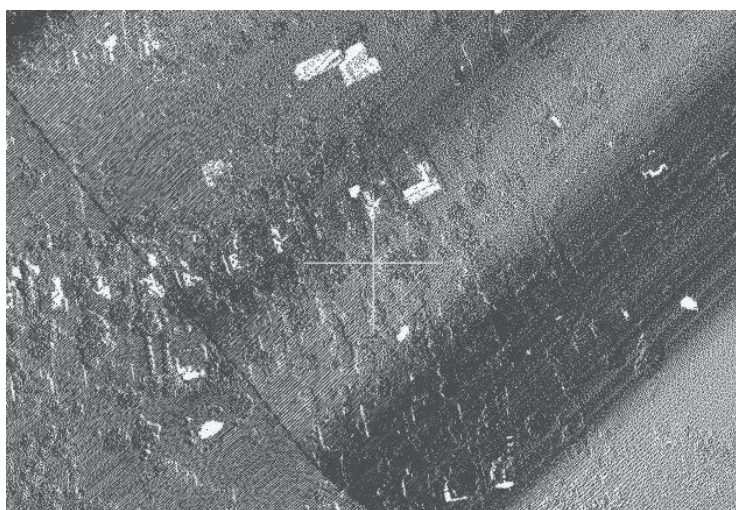
Strādājot ar pilsētvides lidarattēliem, izplatīta ir objektu reprezentēšana ar trijstūriem,



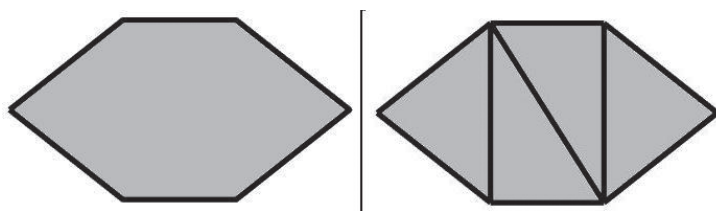
2-54. att. DRM reprezentācija kontūru formā ar dažādu izšķirtspēju.



2-55. att. Lāzerimpulsu atstarojumu intensitātes vizualizācija.



2-56. att. Lāzerimpulsu atstarojumu skaita vizualizācija.



2-57. att. Plakana objekta reprezentēšana ar trijstūriem.

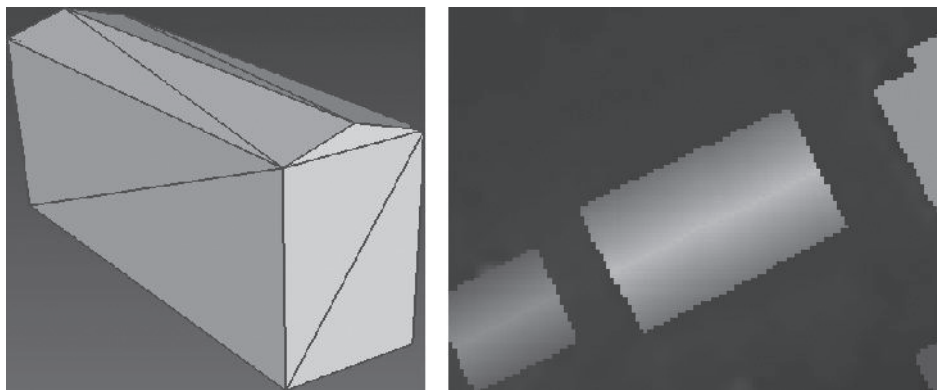
populāra šo trijstūru formēšanas metode ir Delonē triangulācija [58].

Reprezentējot objektus ar ģeometriskām struktūrām (piemēram, trijstūriem), jāņem vērā, kas tie ir par objektiem. Modelējot ēkas, parasti var rēķināties ar faktu, ka ēkas visbiežāk veido plaknes ar taisniem leņķiem ēku stūros (bet ne vienmēr). Šiem modeļiem bieži pievieno papildinformāciju (piemēram, krāsu formā) par objektu faktūras, tekstūras vai citiem parametriem.

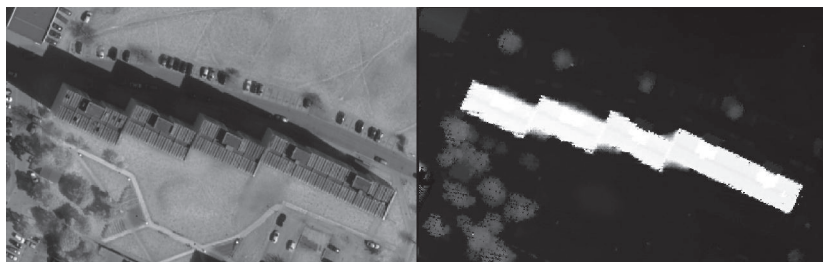
Taču pirms rastra attēlu pārformēšanas vektoriālā formā, t. i., izmantojot ģeometriskus modeļus, jāveic šo attēlu regularizācija. Tā nepieciešama tādēļ, ka lidaru attēli ietver trokšņus, kas deformē patiesās ģeometriskās struktūras (skat. 2-59. att.) un tieša triangulācijas (vai citu ģeometrisku struktūru) lietošana var dot neprecīzu rezultātu. Bieži kā regularizācijas metodi lidardatu rastra attēliem izmanto nogludinošos mediānas filtrus (skat. 3.1.6. sadaļu).

Izstrādājot reālus informācijas produktus, kopīgai apstrādei tiek kombinēti dažādu avotu dati. Lidaru dati ietver vispilnīgāko informāciju par virsmas formu un reljefu, multispektrālo sensoru dati – savukārt informāciju par virsmas tekstūru un faktūru utt. Lai dažāda tipa datus varētu sekmīgi apvienot, ir jānodrošina to ģeotelpiskā atbilstība. Starp datu kopām nedrīkst būt ievērojamas ģeometriskas nobīdes. To visvieglāk nodrošināt jau datu ieguves procesā, ja tālīzpētes sensoru komplekts ir izvietots uz vienas un tās pašas platformas. Ja tas tā nav un dati iegūti, izmantojot dažādas platformas, jāveic rūpīga datu ģeoreferencēšana un ģeotransformēšana (skat. 3.8. nodaļu).

Ģeotelpiskās atbilstības nodrošināšanai nereti izmanto precīzi identificējamus atbalsta



2-58. att. Telpiska objekta (ēkas) reprezentēšana ar trijstūriem.



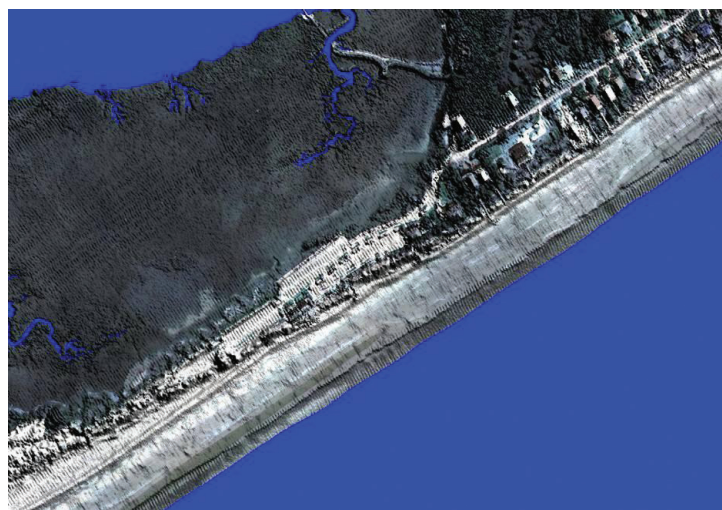
2-59. att. Ēku grupas MSS (panhromatiskais) attēls un lidardatu rastra attēls.

punktus. Pilsētvidē to izdarīt ir samērā vienkārši (ielu un ēku stūri kā atbalsta punkti), bet citos gadījumos, piemēram, mežaudzēs, tas var izrādīties pat neiespējami, ja vien netiek ieguldīts liels roku darbs.

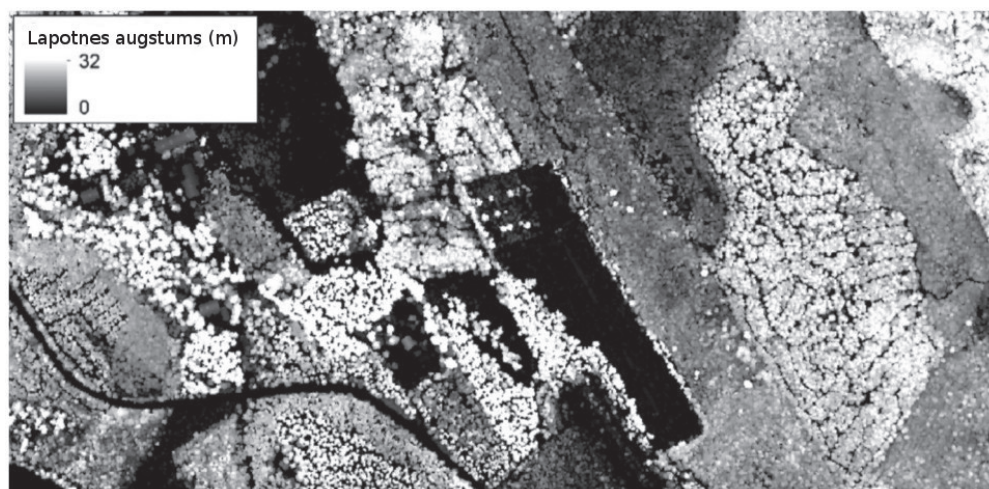
Parasti, veidojot tālīzpētes informācijas produktus, izmanto šādus galvenos datu kombinēšanas avotus:

- dažādu sensoru datus;
- datus no atšķirīgiem laika posmiem;
- dažādu izšķirtspējas līmeņu un mērogu datus;
- dažādu avotu datus (tostarp atbalsta datus).

Vienkāršs, bet uzskatāms multispektrālo sensoru un lidardatu apvienojuma piemērs redzams 2-60. att. krasta zonas attēlā.



2-60. att. MSS un lidardatu apvienojuma piemērs.



2-61. att. Mežaudzes lidarattēls.

2.3.7. Lidaru izmantošanas jomas

Iepazīsimies ar dažiem lidartechnoloģiju veiksmīgas izmantošanas piemēriem.

2.3.7.1. Mežsaimniecība

Mežsaimniecībā lidaru mērījumus sekmīgi izmanto mežu inventarizācijai, jo tie ietver samērā viegli interpretējamu telpisku informāciju, kas ļauj izmērīt gan atsevišķu koku, gan mežaudzes augstumu (2-61. att.). Atkarībā no izmantoto algoritmu sarežģītības iespējams iegūt dažādu precizitātes līmeņu novērtējumus.

Lidaru dati ļauj novērtēt gan mežaudzes blīvumu, gan arī koku vainagu noseģuma pakāpi. Apvienojot šos novērtējumus ar papildinformāciju par koku sugām un augšanas apstākļiem, iespējams reāli novērtēt arī krājas apjomu.

Vides aizsardzības mērķiem nereti aprēķina dažādus veģetācijas indeksus, tādus kā:

- lapu laukuma noseģuma indekss, kas raksturo apgaismojuma apstākļus mežaudzē;
- lapotnes degmateriāla metrikas, lai identificētu potenciāli bīstamas mežaudzes, kurās iespējama strauja mežu ugunsgrēku izplatība u. c.

Lai gan tālīzpētes datiem mežsaimniecībā nav tik augsta precizitāte kā augstas kvalitātes lauka mērījumu rezultātiem, taču tiem ir daudz lielāks pārklājums un tie ir ievērojami lētāki par roku darba rezultātiem. Šī iemesla dēļ tos izmanto ļoti plaši. Jāpiezīmē tikai, ka arī mežsaimniecībā lidarinformācijas jēgpilnai interpretācijai nepieciešami precīzi un saprātīgi izvēlēti atbalsta dati.

2.3.7.2. Pilsētvides izpēte

Lidartechnoloģiju izmantošana pilsētvides analizē, izpētē, modelēšanā un plānošanā ir ļoti plaša un aptver daudz jomu:

- noēnojuma vai apsaulošanas modelēšana, tostarp saules bateriju paneļu izvietojuma efektivitātes novērtējumi;



2-62. att. Daudzstāvu māju grupas noēnojuma modelis.

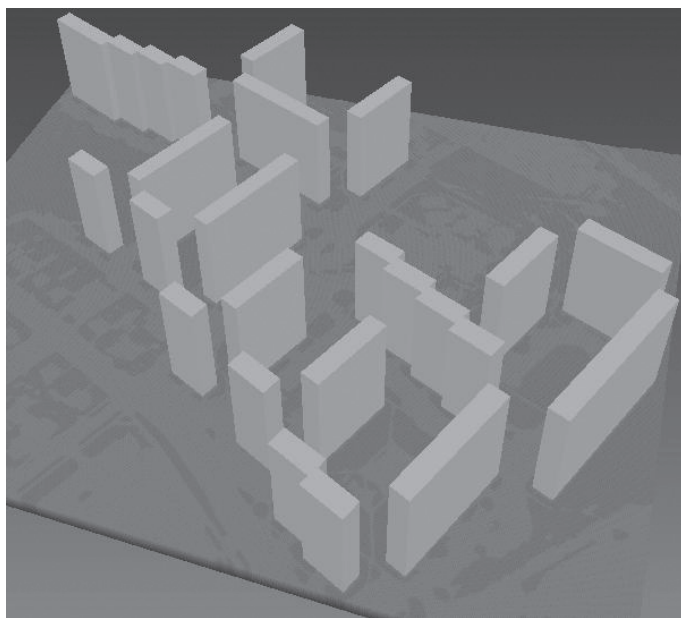
- nekustamo īpašumu un apstādījumu apstākļu izvērtēšana;
- vēja plūsmu modelēšana pilsētvidē;
- skaņu slāpējošo sistēmu novērtējums

un daudzas citas praktisko lietojumu jomas.

Pilsētvides modelēšanā un lietojumos bieži izmanto t. s. trīsdimensionālo (3D) reprezentāciju, jo tā sniedz vizuālās uztveres priekšrocības.

2.3.7.3. Citas lietojumu jomas

Lidartechnoloģijas ir samērā jaunas. Tām ir raksturīgi ļoti lieli datu apjomi un ar to saistītās informācijas ieguves, uzglabāšanas un apstrādes problēmas. Taču lidardati ir arī ļoti precīzi un informatīvi, tāpēc tiem ir liela izmantošanas vērtība un potenciāls. Tos sekmīgi izmanto, izstrādājot precīzas lauksaimniecības metodes un algoritmus (kombinējot ar GNSS un MSS datiem). Unikāli lietojumi izstrādāti arheoloģijas jomā, kur tie ļauj identificēt senas pazemes būves un to ansambļus (maiņu pilskalni Centrālamerikā, arī Straupes vēsturiskais centrs Latvijā). Lidartechnoloģijas sevi pozitīvi apliecinājušas gan ūdensšķirtņu modelēšanā, gan plūdu prognozēšanas metožu pilnveidošanā, gan krastu erozijas monitoringā, kā arī daudzās citās jomās.



2-63. att. Daudzstāvu māju grupas 3D reprezentācija.

2.4. Mikroviļņu tehnoloģijas (12. lekcija)

2.4.1. Kopsavilkums

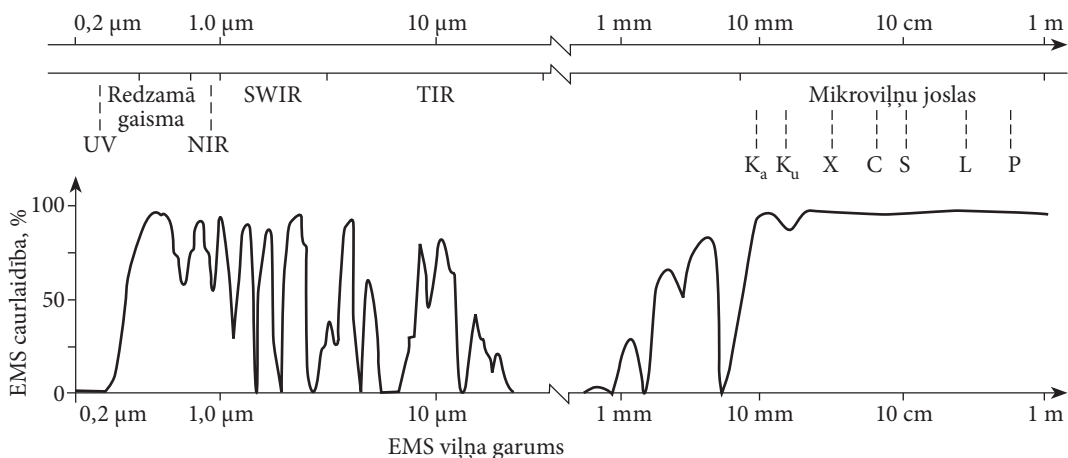
Mikroviļņu diapazona izmantošanu tālīzpētē nosaka atmosfēras caurlaidības “logi” elektromagnētiskajam starojumam. Iepazīsimies ar antenu ģeometrijas galvenajiem parametriem, antenu difrakcijas izšķirtspēju un tās paaugstināšanas iespējām, kā arī radaru sistēmām raksturīgajām distorsijām. Tiks apskatīts spekls un tā filtrēšanas galvenie paņēmieni, kā arī mikroviļņu mijiedarbības ar Zemes virsmu svarīgākie veidi.

2.4.2. Mikroviļņu izmantošana tālīzpētē

Elektromagnētiskā starojuma (EMS) mikroviļņu diapazona izmantošana tālīzpētē ir pamatojama ar to, ka absorbcija Zemes atmosfērā ir ļoti atkarīga no EMS viļņu garuma (frekvences) un faktiski nodrošina tikai divus raksturīgus caurlaidības apgabalus (t. s. “logus”) [43]. Viens no tiem ir redzamās gaismas un infrasarkanajā (ar daļēju ierobežotu caurlaidību) spektra diapazonā (t. s. *VIR* diapazons), otrs – EMS mikroviļņu diapazonā (skat. 2-64. att.).

Pirmo no šiem EMS caurlaidības logiem (parasti λ ir no 0,4 μm līdz 3,0 μm) izmanto multispektrālo sensoru jeb MSS tehnoloģijas, bet otru (parasti λ ir no 1 cm līdz 100 cm) – radari un citas mikroviļņu diapazona tālīzpētes ierīces (skaterometri, radaraltimetri u. c.).

Saules EMS mikroviļņu diapazonā nav tik intensīvs, kā *VIR* diapazonā, tādēļ mikroviļņu diapazona tālīzpētes ierīces darbojas galvenokārt aktīvajā režīmā (izņemot relatīvi reti lietotos pasīvos radiometrus), t. i., pašas apstaro Zemes virsmu ar mikroviļņu starojumu un uztver Zemes virsmas difūzi izkliedēto šī starojuma komponenti. Šādai pieejai ir vairākas priekšrocības, proti, mikroviļņu tehnoloģijas ir sekmīgi lietojamas arī diennakts tum-



2-64. att. EMS caurlaidības “logi” Zemes atmosfērā.

2-3. tab. EMS *MW* diapazona apakšjoslas (jeb t. s. burtu joslas).

IEEE Standard Radar Band Nomenclature

(*IEEE Std. 521-2002, IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands)

Josla	Frekvence	Viļņa garums
HF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m
VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m
P josla	0.3 GHz – 1 GHz	100 cm – 30 cm
L josla	1 GHz – 2 GHz	30 cm – 15 cm
S josla	2 GHz – 4 GHz	15 cm – 7.5 cm
C josla	4 GHz – 8 GHz	7,5 cm – 3,75 cm
X josla	8 GHz – 12 GHz	3,75 cm – 2,50 cm
Ku josla	12 GHz – 18 GHz	2,50 cm – 1,67 cm
K josla	18 GHz – 27 GHz	1,67 cm – 1,11 cm
Ka josla	27 GHz – 40 GHz	1,11 cm – 0,75 cm
V josla	40 GHz – 75 GHz	7,5 mm – 4,0 mm
W josla	75 GHz – 110 GHz	4,0 mm – 2,7 mm
mm josla	110 GHz – 300 GHz	2,7 mm – 1.0 mm

2-4. tab. Galvenās tālīzpētē izmantotās *MW* diapazona apakšjoslas un to lietojumi.

Josla	Frekvence	Viļņa garums	Galvenie lietojumi
P josla	0,3 GHz – 1 GHz	100 cm – 30 cm	Galvenokārt izmanto eksperimentālās pētniecības nolūkos. Starojums viegli iespiežas veģetācijā, to var izmantot biomasas noteikšanai, kā arī citur (augšne, ledāji u. c.)
L josla	1 GHz – 2 GHz	30 cm – 15 cm	Starojums iespiežas veģetācijā, to izmanto lauksaimniecības aplikācijās, kā arī ledāju dinamikas novērojumiem
S josla	2 GHz – 4 GHz	15 cm – 7.5 cm	Piemērota vidējas izšķirtspējas meteoroloģiskiem lietojumiem, lietus radariem, lidostu apkārtnes novērojumiem
C josla	4 GHz – 8 GHz	7,5 cm – 3,75 cm	EMS iespēšanās iezos un veģetācijā ierobežota, refleksija tikai no virsējā līmeņa. Izmanto ūdens un ledus virsmu novērošanai (<i>RADAR-SAT</i> , <i>ERS-1</i>)
X josla	8 GHz – 12 GHz	3,75 cm – 2,50 cm	Militārā izlūkošana, kartogrāfija un novērošana (<i>TerraSAR-X</i> , <i>TanDEM-X</i> , <i>COSMO-SkyMed</i> u. c.)

šajā laikā, kā arī var izvēlēties tādus izmantojamo mikroviļņu frekvenču apakšdiapazonus, kas “redz” cauri mākoņiem (t. i., nav atkarības no meteoroloģiskajiem apstākļiem). Tam ir būtiska nozīme tālīzpētes militārajos, ekoloģiskajos, lauksaimniecības u. c. lietojumos. Minētās īpatnības kā priekšrocības sekmīgi izmanto arī planētu fizikā, veicot tādu planētu kā Veneras vai Saturna pavadoņa Titāna (abus šos kosmiskos objektus klāj bieza EMS VIR diapazonu intensīvi absorbējoša atmosfēra) izpēti ar tālīzpētes kosmiskajām zondēm.

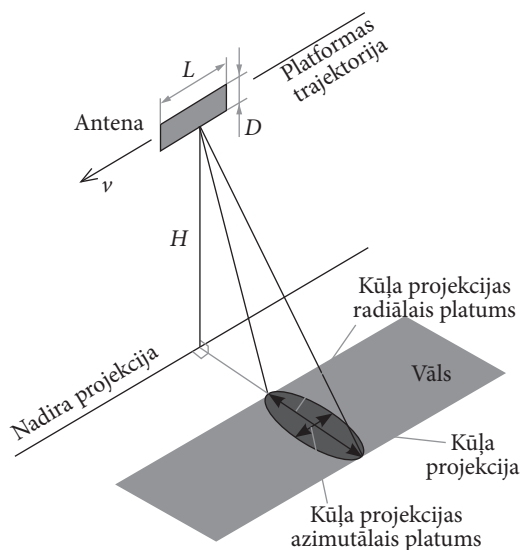
EMS mikroviļņu diapazonu iedala apakšdiapazonos, tos pieņemts raksturot, izmantojot t. s. burtu joslas (jeb apakšjoslas), kas izskaidrotas 2-3. tabulā.

Ne visas no šīm joslām atbilst EMS caurlaidības “logiem” Zemes atmosfērā, tādēļ tālīzpētē populārākās ir X, C, S, L un P joslas (2-4. tab.).

Skaidras debess gadījumā neliela absorbcija Zemes atmosfērā sākas pie $\lambda < 3$ cm, un tā strauji pieaug, samazinoties starojuma viļņa garumam λ . Lietus pilieni savukārt spēcīgi izkliedē EMS ar $\lambda < 1$ cm, tādēļ K joslu izmanto lietus radaros, kas izvietoti gan satelītos, gan uz Zemes.

2.4.3. Radaru ģeometrija un difrakcijas izšķirtspēja

Pirmie aeroplatformu tālīzpētes radari tika izstrādāti 20. gadsimta 50. gados militāriem mērķiem. Tie neizmantoja rotējošas antenas, kā uz zemes vai jūrā bāzētie radari, bet pie aeroplatformas nekustīgi fiksētu taisnstūra antenu, kuras garums L bija stipri lielāks par tās platumu $D \ll L$. Citādas ģeometrijas pietiekami lielu antenu pie lidmašīnas vienkārši nebija iespējams stabili nostiprināt. Līdzīgas ģeometrijas antenas izmanto arī satelītplatformās (2-65. att.).



2-65. att. Tālīzpētes radara ģeometrija (attēls adaptēts no [45]).

Tālizpētes radara antena atrodas augstumā H virs Zemes virsmas un kopā ar platformu pārvietojas tās kustības virzienā. EMS kūlis no radara antenas tiek izstarots tam perpendikulāri (slīpi virzienā uz Zemes virsmu), ko dēvē par attāluma virzienu, un apstaro Zemes virsmu eliptiskā (ovālā) apgabalā, ko sauc par kūļa projekciju jeb apstaroto laukumu. Atbilstoši difrakcijas teorijai (skat. 1.1.7. sadaļu) kūļa leņķiskie izmēri ir $\psi_a = \lambda/L$ un $\psi_r = \lambda/D$, un varam aprēķināt apstarotā laukuma ģeometriskos izmērus. Saskaņā ar 2-66. att., kurā kūļa projekcija uz Zemes virsmas attēlota ar ietonēto laukumu gan skatā no augšas, gan skatā no sāniem, iegūstam

$$r = \frac{H}{\cos \beta}, \quad R_a \cong r \psi_a = \frac{\lambda H}{L \cos \beta}, \quad R_r \cong \frac{r \psi_r}{\cos \beta} = \frac{\lambda H}{D \cos^2 \beta} \quad (2.1.)$$

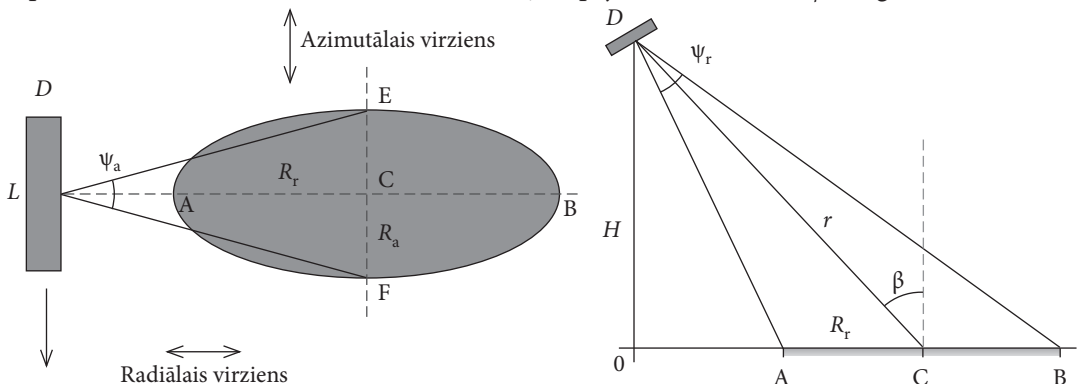
kur β , līdzīgi kā agrāk, sauc par starojuma krišanas leņķi, bet radaru gadījumā to dēvē arī par apstarošanas leņķi. Kūļa projekcija platformas kustības dēļ pārvietojas pa Zemes virsmu, formējot vālu (2-65. att.). Projekcijas (t. i., attēla) plaknē (2-66. att.) definē divus galvenos virzienus – azimutālo virzienu, kas ir paralēls platformas kustības virzienam, un radiālo virzienu, kas ir perpendikulārs platformas kustības virzienam. Ņemot vērā, ka $D \ll L$, varam secināt, ka $R_r \gg R_a$.

No difrakcijas teorijas viedokļa kūļa projekcijas (t. i., apstarotā laukuma) izmēri nosaka izmantotās radara iekārtas izšķirtspēju (azimutālo un radiālo). Taču, ja R_a vērtības (parasti daži desmiti vai simti metru) vēl nosacīti atbilst attēlu veidojošās sistēmas pieļaujamai izšķirtspējai, tad ievērojami lielākās R_r vērtības par tādām uzskatīt nevar. Tādēļ tālizpētes radaru iekārtās izmanto impulsu radarus, to radiālo izšķirtspēju nosaka nevis difrakcija, bet precizitāte, kādu iespējams sasniegt, strādājot ar īsiem, bet jaudīgiem EMS impulsiem.

2.4.4. Impulsu radari, to īpatnības

Impulsu radari apstaro pētāmo Zemes virsmas apgabalu ar īsiem jaudīgiem EMS impulsiem (2-67. att.) un reģistrē atpakaļizkļiedēto starojumu (2-68. att.). Attālumu no platformas līdz EMS atstarojošajiem objektiem aprēķina, reizinot reflektēto impulsu aiztures laiku ar gaismas ātrumu.

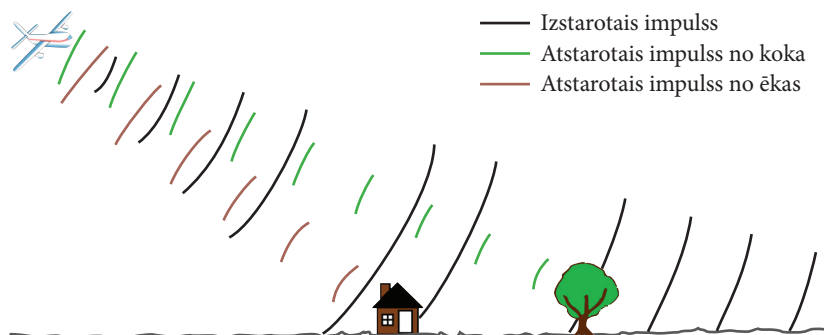
Izmantojot impulsu radarus, pēc impulsu aiztures laika var ievērojami precizēt attālu līdz objektam, no kura notikusi šo impulsu atstarošanās. Šādā gadījumā iespējams viegli pārliecināties, ka radariekārtas radiālo izšķirtspēju nosaka nevis R_r , bet gan formula



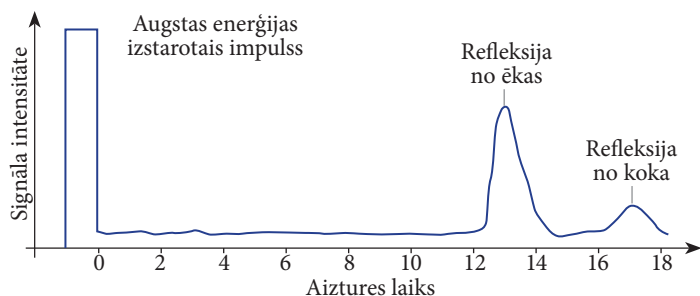
2-66. att. Radara ģeometrija (skats no augšas un no sāniem).

$$\delta x_r = \frac{c\tau_p}{2\sin\beta} \quad (2.2.)$$

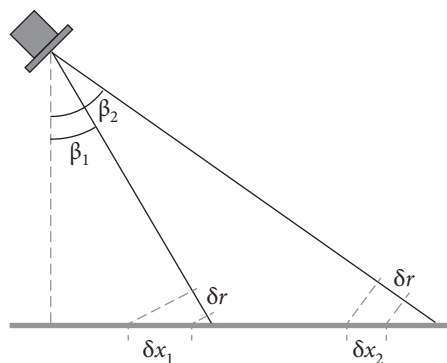
kur c – EMS izplatīšanās (gaismas) ātrums, τ_p – izmantoto impulsu garums, β – EMS kūļa krišanas (jeb apstarošanas) leņķis. Azimutālo izšķirtspēju reālās apertūras radariem (RAR) savukārt joprojām nosaka difrakcija, un tā ir $\delta y_a = R_a$. Jāņem vērā, ka impulsu radaru sistēmās pastāv divu veidu attāluma izšķirtspējas: δr – attāluma (jeb t. s. slīpā attāluma)¹⁹ virzienā un δx – radiālajā (t. i., uz Zemes virsmas)²⁰ virzienā. Vienai un tai pašai attāluma izšķirtspējas δr vērtībai var atbilst dažādas radiālās izšķirtspējas δx vērtības pie dažādiem apstarošanas leņķiem β (2-69. att.).



2-67. att. Impulsa radara darbības princips [32].



2-68. Impulsa radara registrētie signāli [32].



2-69. att. Impulsa radara ģeometrija, skats no sāniem.

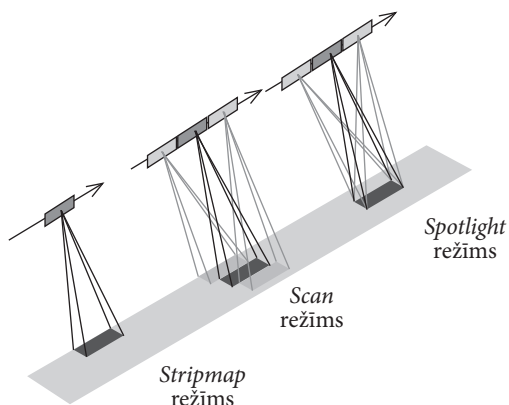
¹⁹ Angļu val. – *slant range*.

²⁰ Angļu val. – *ground range*.

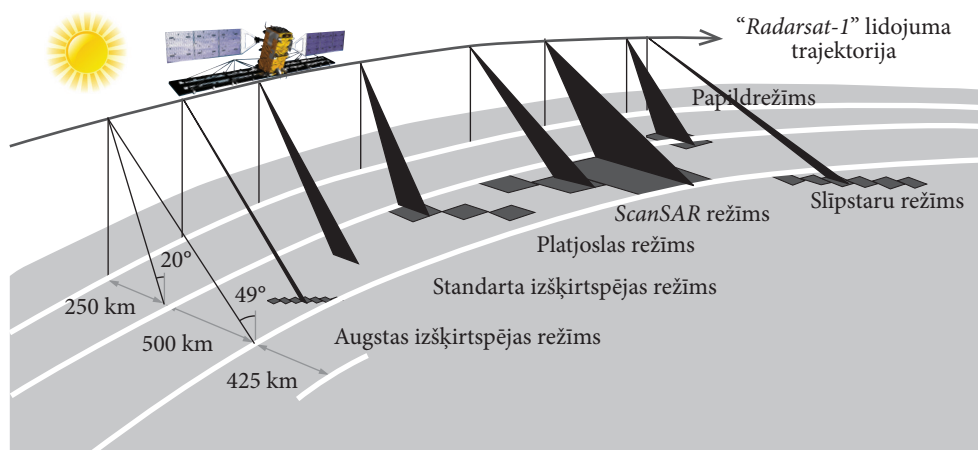
Nobeigumā atzīmēsim trīs galvenos tālzipētes impulsu radaru darbības pamatrežīmus (skat. 2-70. att.).

- “*Stripmap*” režīms – antenas orientācija netiek mainīta, platformai pārvietojoties. Šis ir visbiežāk izmantotais tālzipētes radaru izmantošanas režīms.
- “*Scan*” režīms – antenas apstarošanas leņķis β tiek secīgi mainīts, lai nodrošinātu lielāku vāla platumu un attēla pārklājumu. Šajā režīmā attēla izšķirtspēja ir zemāka nekā “*stripmap*” režīmā.
- “*Spotlight*” režīms – antenas orientācija tiek mainīta tā, lai, platformai pārvietojoties, tiktu apstarots viens un tas pats laukums uz Zemes virsmas. Šajā režīmā attēla izšķirtspēja ir augstāka, bet pārklājums mazāks nekā iepriekšējos divos režīmos.

Bez apskatītajiem trim tālzipētes radaru darbības pamatrežīmiem lieto arī dažādus citus režīmus, tostarp režīmu kombinācijas (2-71. att.).



2-70. att. Trīs tālzipētes impulsu radaru darbības pamatrežīmi.



2-71. att. Tālzipētes satelīta “*Radarsat-1*” darbības režīmi.

2.4.5. Impulsu pārklāšanās novēršana

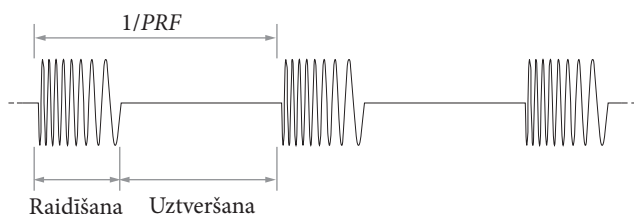
Impulsu radaru cits svarīgs raksturlielums ir to takts frekvence jeb PRF^{21} , jo tā pati antena tiek izmantota gan impulsu raidīšanai, gan arī to uztveršanai. Impulsi tiek raidīti pēc laika intervāliem, kas vienādi ar $1/PRF$ un ļauj daļu šī laika, proti, $1/PRF - \tau_p$, kur τ_p – impulsa garums, izmantot radara antenu atstaroto impulsu uztveršanas režīmā (2-72. att.).

Impulsu radara takts frekvence jāizvēlas pietiekami augsta, lai attēlā neveidotos spraugas starp atsevišķām EMS kūļa projekcijām, taču bieži nav vēlams impulsu vai to pakešu pārklāšanās, t. i., šī takts frekvence nedrīkst būt pārāk augsta. Lai novērtētu optimālas takts frekvences izvēles nosacījumus [3], apskatām 2-73. att., kurā radars S augstumā H virs Zemes virsmas formē vālu 1-2 ar platumu w . Signāls no vāla tuvākā galapunkta (1) atgriezīsies radarā pēc laika

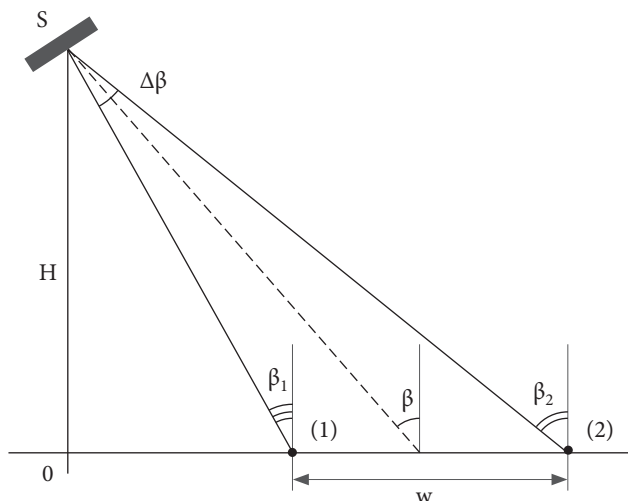
$$t_1 = \frac{2H}{c} \sec \beta_1$$

bet no vāla tālākā galapunkta (2) pēc laika

$$t_2 = \frac{2H}{c} \sec \beta_2$$



2-72. att. Impulsu radara takts frekvences skaidrojums (adaptēts no [44]).



2-73. att. Impulsu nepārklāšanās iespējas novērtējums.

²¹ PRF – Pulse Repetition Frequency.

Lai nenotiktu impulsu (vai to pakešu) pārklāšanās, laika intervālam $p = 1/PRF$ starp tiem jāapmierina nosacījums

$$p > \frac{2H}{c} (\sec \beta_2 - \sec \beta_1) \quad (2.3.)$$

Vienlaikus impulsi nedrīkst sekot viens otram pārāk reti, jo tad attēlā veidosies spraugas starp atsevišķām kūļa projekcijām. Lai tas nenotiktu, jāizpildās nosacījumam

$$p < \frac{\delta y_a}{v} \quad (2.4.)$$

kur δy_a – radara azimutālā izšķirtspēja²², v – platformas pārvietošanās ātrums. Nevienādību sistēmai (2.3.), (2.4.) reāls atrisinājums iespējams tikai ar nosacījumu, ka

$$\frac{2H}{c} (\sec \beta_2 - \sec \beta_1) < \frac{\delta y_a}{v}$$

jeb

$$\frac{\sec \beta_2 - \sec \beta_1}{\delta y_a} < \frac{c}{2Hv} \quad (2.5.)$$

Ja leņķis $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ ir uzskatāms par mazu, tad tuvināti $\beta_2 \approx \beta_1 \approx \beta$ un

$$W \cong H \sec^2 \beta \cdot \Delta\beta$$

jeb

$$\Delta\beta = \frac{W}{H} \sec^{-2} \beta \quad (2.6.)$$

Savukārt

$$\sec \beta_2 - \sec \beta_1 \cong (\sec \beta)' \Delta\beta = \sin \beta \sec^2 \beta \cdot \Delta\beta \quad (2.7.)$$

Ievietojot (2.7.) un (2.6.) nosacījumā (2.5.), iegūstam

$$W < \frac{\delta y_a c}{2v \sin \beta} \quad (2.8.)$$

Sakarība (2.8.) ierobežo maksimālo vāla platumu, pie kura iespējams nodrošināt impulsu nepārklāšanos radara signālā. Satelītplatformām tipiski $v = 7$ km/s, $\beta \approx 30^\circ$, un ja $\delta y_a \sim 10$ m, tad maksimālais vāla platums $W \cong 400$ km. Taču tas nav nemaz tik maz.

2.4.6. Radarattēlu distorsijas

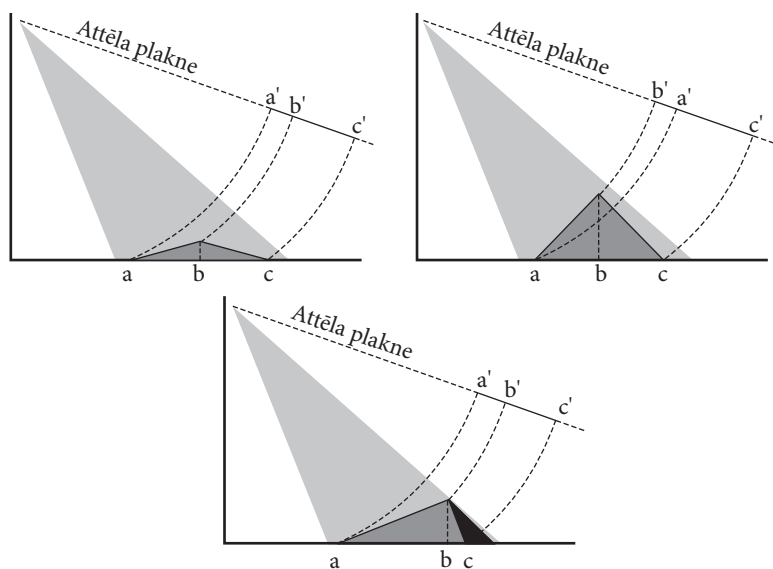
Radarattēlu formēšana balstās uz trilaterācijas principiem, atšķirībā no optiskajiem attēliem, kuru veidošanos nosaka triangulācijas likumsakarības [13]. Citiem vārdiem, optiskie attēli pareizi reprezentē leņķus, radarattēli – attālumu līdz objektiem. Cilvēku vizuālā uztvere psiholoģiski ir saistīta ar optiskajiem attēliem, tādēļ, interpretējot un apstrādājot radarattēlus, jāņem vērā to īpatnības un iespēju robežās jānovērš vairāki to specifiski kropļojumi, ko sauc par distorsijām.

Vispirms iepazīsimies ar radarattēlu ģeometriskajām distorsijām, kas shematiski attēlotas 2-74. att. Augšējais kreisais attēls ilustrē t. s. saīsināšanas distorsiju²³, kad objekta

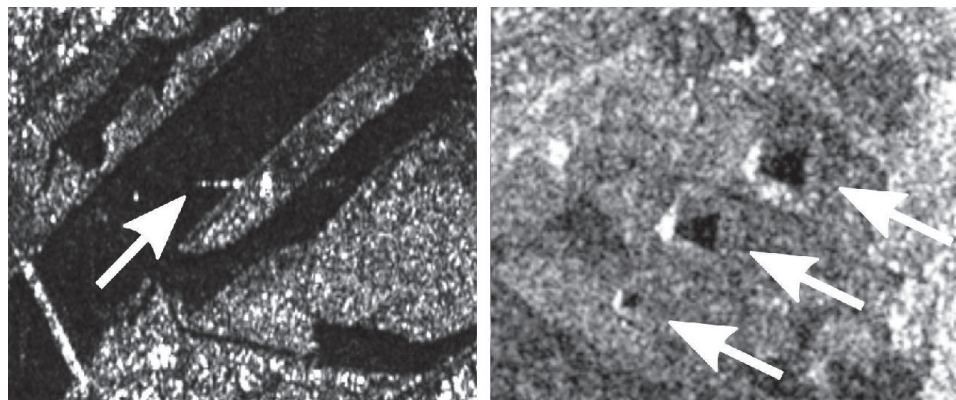
²² Reālās apertūras radariem (RAR) $\delta y_a = R_a$.

²³ Angļu val. – *foreshortening*.

skaldne (ab), kas orientēta sensora virzienā attēla plaknē, redzama isāka (a'b'), nekā tā ir īstenībā, savukārt skaldne (bc), kas orientēta uz pretējo no sensora pusi, attēla plaknē var izrādīties garāka (b'c'), nekā tā ir īstenībā. Augstākām virsmas reljefa struktūrām (2-74. att. augšējais labais attēls) iespējama pat attēla pārklāšanās²⁴ pašam ar sevi, kad objekta skaldne (ab), kas orientēta sensora virzienā, attēlā projicējas pretējā virzienā (b'a'). Abos šajos gadījumos novērojams, ka reljefa struktūras nekoriģētos radarattēlos ir it kā noliekušās sensora virzienā. Šīs ģeometriskās distorsijas, dēvētas arī par panorāmiskajām distorsijām, ir matemātiski koriģējamas (t. i., novēršamas), ja ir zināms un pieejams attēlotā apgabala DEM (detalizētāk skat. 2.3.5. sadaļu) ar adekvātu precizitāti. Iespējamās situācijas, kad daļa no virsmas reljefa objekta atrodas apstarojuma ēnā un no tās vispār netiek saņemti radara



2-74. att. Radarattēlu ģeometriskās distorsijas.



2-75. att. Radarattēlu ģeometrisko un radiometrisku distorsiju piemēri.

²⁴ Angļu val. – layover.

impulsu atstarojumi (2-74. att. apakšējais attēls). Šādā gadījumā, ko sauc par aizēnošanu²⁵, protams, nav iespējams iegūt nekādu informāciju par virsmas reljefa objekta aizēnoto daļu, un šī distorsija nav kompensējama.

Radarattēlu ģeometriskās distorsijas ir cēlonis vairākām radiometriskām distorsijām, pie kurām var pieskaitīt arī aizēnošanas efektu. Taču jebkurā gadījumā no objekta skaldnes (ab), kas orientēta sensora virzienā, uz radara antenu tiek atstarots daudz spēcīgāks reflektētais signāls nekā no skaldnes (bc), kas orientēta uz sensoram pretējo pusi. Sensora virzienā orientētās reljefa objektu skaldnes tādējādi ir “pārgaismotas”, pretēji orientētās – “vāji eksponētas”. Turklāt jāņem arī vērā, ka Releja raupjuma kritēriji (skat. 1.4.2. sadaļu) ir atkarīgi no tālzipētes sistēmā izmantotā EMS viļņa garuma λ un radarattēlos virsmas refleksijas īpašības ļoti atšķiras no tām, kas novērojamas optiskajā diapazonā.

Kā ilustrāciju teiktajam piedāvājam 2-75. att. Tā kreisajā attēlā redzams, ka Rīgas TV tornis ir izteiksmīgi “noliecies” satelīta virzienā (pa kreisi), attēlā labajā pusē redzamo Gīzas piramīdu sensora virzienā orientētās skaldnes ir saīsinātas un pārgaismotas, savukārt pretējās skaldnes (uz kurām norāda bultas) – aizēnotas.

2.4.7. Spekls un tā filtrēšana

Par speklu sauc specifisku trokšņu fonu, kas izpaužas kā radarattēlu “graudainums”, jo mikroviļņu diapazonā izmantotā EMS viļņu garums λ ir samērojams ar virsmas tekstūras izmaiņām (tekstūras “graudiem”), ko var raksturot ar tekstūras funkciju $z(x)$ (skat. 1.4.6. sadaļu un 1-34. att.). EMS izkliedes īpašības stipri mainās gadījumos, kad $\lambda \sim z(x)$ un radarattēlu rezeli ir relatīvi lieli (t. i., tajos ir atšķirīgi tekstūras elementi), tāpēc blakus esošu pikseļu izgaismojums var izrādīties visai atšķirīgs pat pie līdzīgiem tekstūras parametriem. Atceramies formulu (1.109.)

$$E = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iks_{\beta}x} e^{ikc_{\beta}z(x)} dx \quad (2.9.)$$

kas nosaka starojuma ar viļņu skaitli $k = 2\pi/\lambda$ pārnese no virziena ar krišanas leņķi β_0 kādā citā virzienā, ko raksturo leņķis β_1 , ja starojuma izkliede notiek uz viendimensionālas tekstūras $z(x)$. Koeficientus s_{β} un c_{β} nosaka formulas (1.107.), kas monostatiskajā gadījumā (kad izmanto vienu radara antenu gan raidīšanai, gan uztveršanai) vienkāršojas formā

$$s_{\beta} = 2 \sin \beta, \quad c_{\beta} = 2 \cos \beta$$

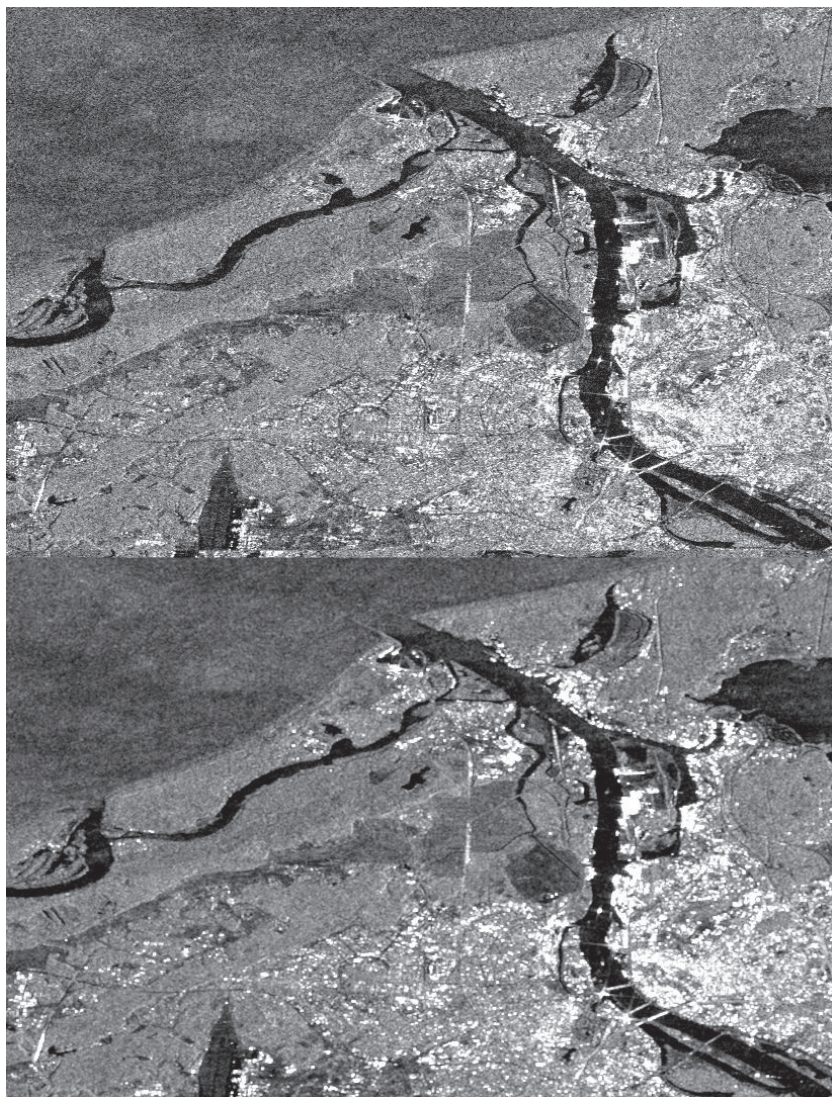
kur β – apstarošanas leņķis. Formula (2.9.) ir funkcijas $\Phi(x) = \exp(i2\pi c_{\beta}z(x)/\lambda)$ Furjē transformācija (turklāt tuvināta, jo integrēšana veicama pa rezeli, nevis bezgalīgu intervālu). Taču tekstūras funkciju $z(x)$ var uzskatīt par stohastisku, tādējādi pie $\lambda \sim z(x)$ stohastiska ir arī funkcija $\Phi(x)$, bet stohastiskas funkcijas Furjē transformācija fiksētai viļņa garuma (vai viļņu skaitļa) vērtībai var būt ar jebkādu gadījuma vērtību, t. i., tā arī ir stohastiska blakus esošiem pikseļiem un nav atkarīga no krītošā starojuma amplitūdas. Tādēļ radarattēlu fons vienmēr ir graudains (skat. 2-75. att.), turklāt šīs graudainības statistika atbilst Releja (nevis Gausa) sadalījuma funkcijai, jo to ir formējusi Furjē transformācija.

Spekla samazināšanas vienkāršākais paņēmieni ir nogludinošu telpisko filtru (skat.

25 Angļu val. – *shadowing*.

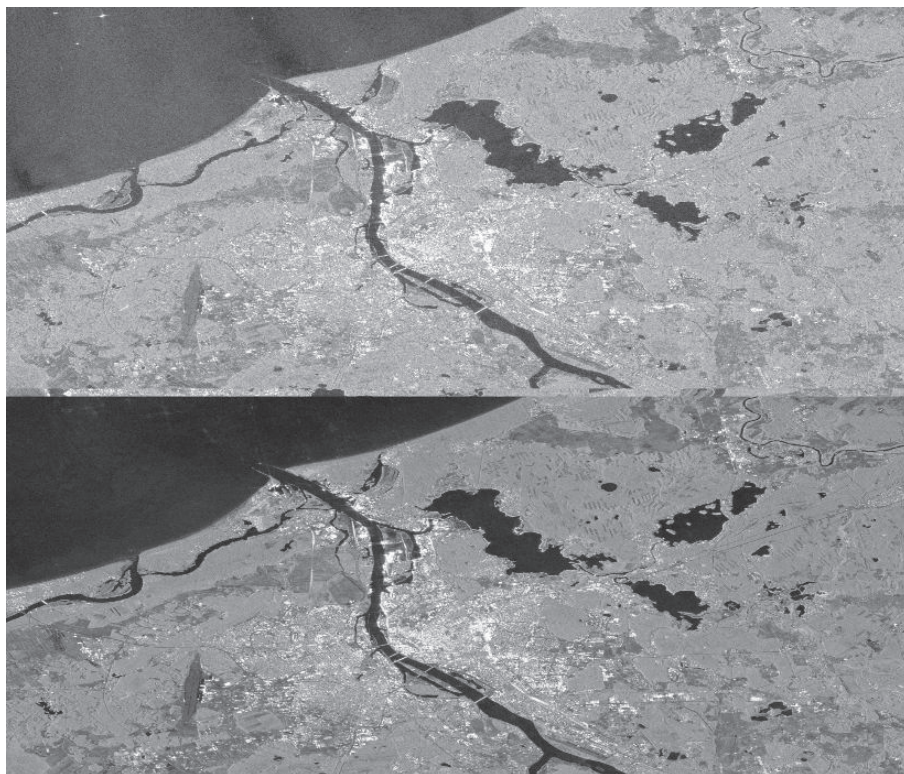
3.1.6. sadaļu) vai spektrālo zemfrekvences filtru (skat. 3.2.4. sadaļu) lietošana (2-76. att.), kas, protams, samazina attēla izšķirtspēju. Taču, neskatoties uz to, radarattēla interpretācijas iespējas uzlabojas, tādēļ šo metodi izmanto bieži. Taču ir izstrādāti arī komplicētāki spekla filtri, kas attēla izšķirtspēju ietekmē mazāk.

Viena no iespējamām pieejām ir pirms nogludināšanas novērtēt attēla fragmentu spektrālās komponentes un gludākiem fragmentiem lietot platākus nogludinošos filtrus, bet mazāk gludiem fragmentiem – šaurākus. Pirms nogludināšanas lietderīgi veikt arī morfoloģisko analīzi, lai noteiktu, vai attēla fragmentā nav divu dažādu objektu. Šādā gadījumā spekla filtrēšanu veic katram objektam atsevišķi, saglabājot robežas un detalizāciju starp tiem.



2-76. att. Spekla samazināšana, izmantojot nogludinošu 7×7 telpisko filtru (masku).

Cita pieeja izmantojama gadījumos, kad ir vairāki viena un tā paša apgabala attēli, kas iegūti atšķirīgos laika momentos. Ja ir pamats uzskatīt, ka šajos attēlos nav lielu sistematisku atšķirību (piemēram, būtiskas veģetācijas izmaiņas), tad tos var savietot, tādējādi samazinot stohastiskās komponentes ietekmi. Šo metodi sauc par multitemporālo filtrēšanu. Attēla sistematiskā komponente multitemporālās filtrēšanas gadījumā tiek pastiprināta, bet tā izšķirtspēja nesamazinās (2-77. att.).



2-77. att. Spekla samazināšana, savietojot vairākus kvaziidentiskus radarattēlus.

2.4.8. Atpakaļizkliedes galvenie veidi

Zemes virsmas objekti visai dažādi mijiedarbojas ar radaru mikroviļņu EMS, taču šo mijiedarbību ir lietderīgi klasificēt četrās galvenajās grupās: (a) izkliede no gludām virsmām, (b) izkliede no raupjām virsmām (skat. 1.4.2. sadaļu), (c) refleksija no divplakņu un trīsplakņu kaktiem un (d) telpiskā izkliede.

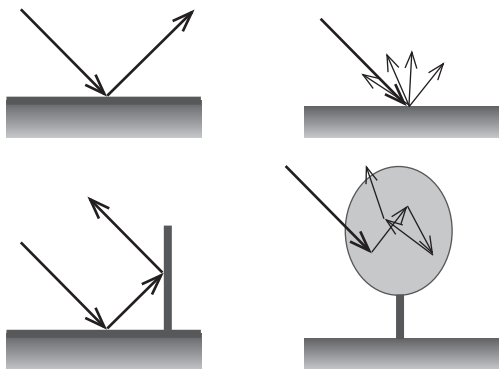
EMS izkliedes no gludām virsmām gadījumos notiek spoguļrefleksija, un bieži tikai neliela daļa reflektētā starojuma atgriežas atpakaļ radara antenā. Tādēļ mierīga ūdens virsmas radarattēlos parasti ir ļoti tumšas. Savukārt māju jumti, kas orientēti pret platformu, eksponējas ļoti gaiši, jo spoguļrefleksija atgriež antenā lielu EMS daļu.

EMS mijiedarbojoties ar raupjām virsmām (piemēram, augsnes virskārtu), dominē difūzā izkliede, un reflektētais starojums ir ievērojami izotropiskāks (skat. 1.4.5. sadaļu).

Refleksija no divplakņu un trīsplakņu kaktiem novērojama urbanizētās vidēs, kur sastopamas mikroviļņiem gludu virsmu veidotas taisnu leņķu konstrukcijas (ēku sienas, ielu segums u. c.), kā arī veģetācijas zonās starojumam atstarojoties no koku stumbriem un zemes virsmas. Refleksiju no trīsplakņu kaktiem sauc par retrorefleksiju, un tā var būt ļoti spoža.

Visbeidzot, telpiskā izkliede visbiežāk novērojama, EMS mijiedarbojoties ar veģetāciju (lapām, zariem, augu stumbriem). Šādā vidē mikroviļņi daudzkārtīgi atstarojas no virsmas elementiem, pirms daļa no EMS tiek reflektēta antenas virzienā. Uzskaitītie mijiedarbības veidi shematiski attēloti 2-78. att.

Realitātē atpakaļizkliedētais signāls veidojas kā dažādu mijiedarbības veidu kombinācija. Lai atdalītu un pareizi interpretētu šīs komponentes, jāveic rūpīga signāla analīze, izmantojot visu pieejamo informāciju. Taču to iespējams veikt, tikai piesaistot polarimetrisko un reģistrēto signālu fāzes informāciju, par ko būs runa turpmākajā izklāstā.



2-78. att. EMS mijiedarbības ar Zemes virsmu galvenie veidi.

2.5. Sintezētās apertūras radari (SAR) (13. lekcija)

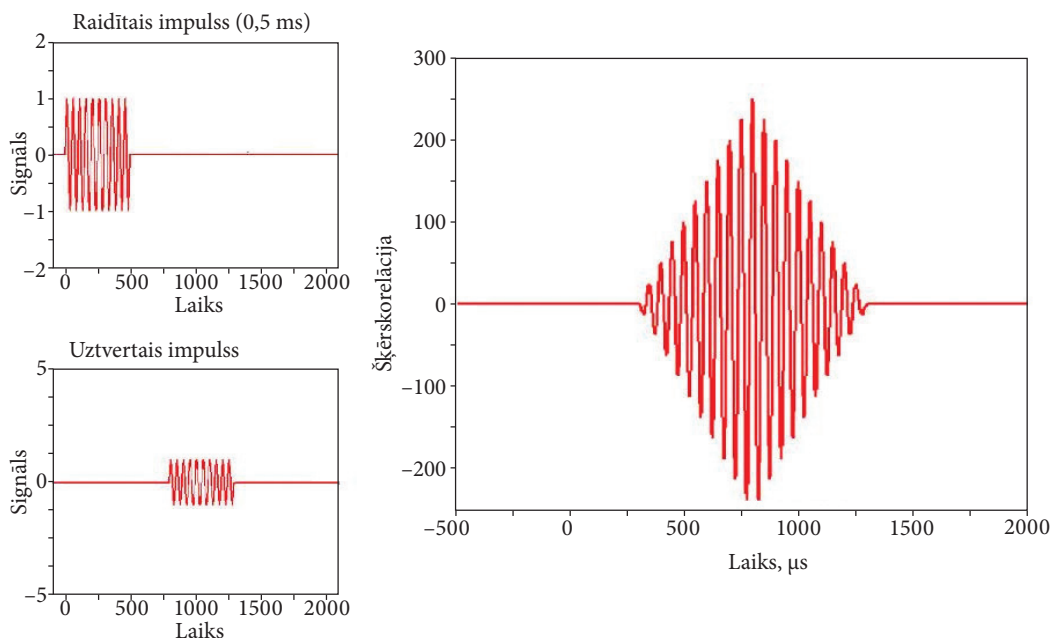
2.5.1. Kopsavilkums

Sintezētās apertūras radaru (SAR) tehnoloģiju pamatā ir korelācijas funkciju izmantošana kopā ar t. s. “čirkstiem” – viļņu formām ar mainīgu frekvenci, ko lieto SAR impulsu modulācijai. SAR izmanto t. s. koherentos mērījumus, ko parasti noformē datu kompleksajā formā. Iepazīsimies ar šīm un citām SAR tehnoloģiju īpatnībām, tostarp kustīgu objektu specifiskajām distorsijām, kā arī SAR kalibrēšanas un fokusēšanas pamatidejām.

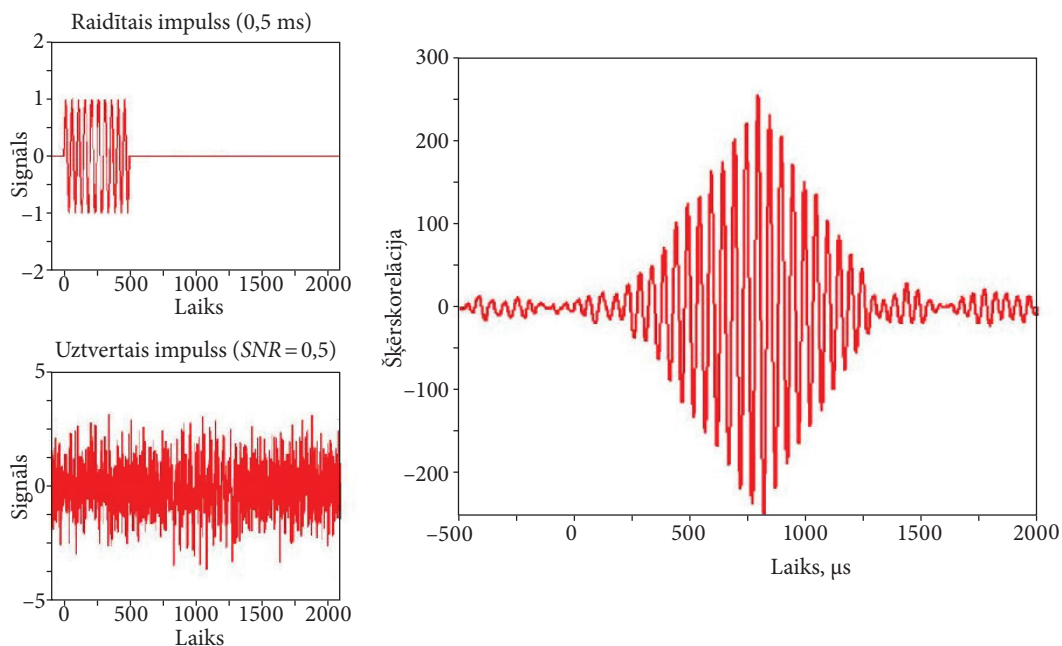
2.5.2. Impulsu lokalizācija, izmantojot korelācijas, čirksti

Izmantojot impulsu lāzerus, nākas saskarties ar vairākām problēmām, lai nodrošinātu iespējami augstu iegūto radarattēlu izšķirtspēju. Pirmā ir nepieciešamība strādāt ar ļoti īsiem un tādējādi ļoti jaudīgiem impulsiem, lai sasniegtu augstu radiālo izšķirtspēju (skat. formulu (2.2.)). Taču raidīto impulsu maksimālo jaudu ierobežo izmantotās antenas izmēri, tādēļ nākas izvēlēties minimālo impulsu garumu τ_p , ko pieļauj izmantojamā antena un impulsu raidītāja tehniskie parametri (jauda). Tomēr izmantotā impulsu pārraides jauda nosaka arī uztverto signālu SNR (signāla/trokšņa attiecību). Jo tā lielāka, jo uztvertais reflektētais signāls vieglāk identificējams un lokalizējams.

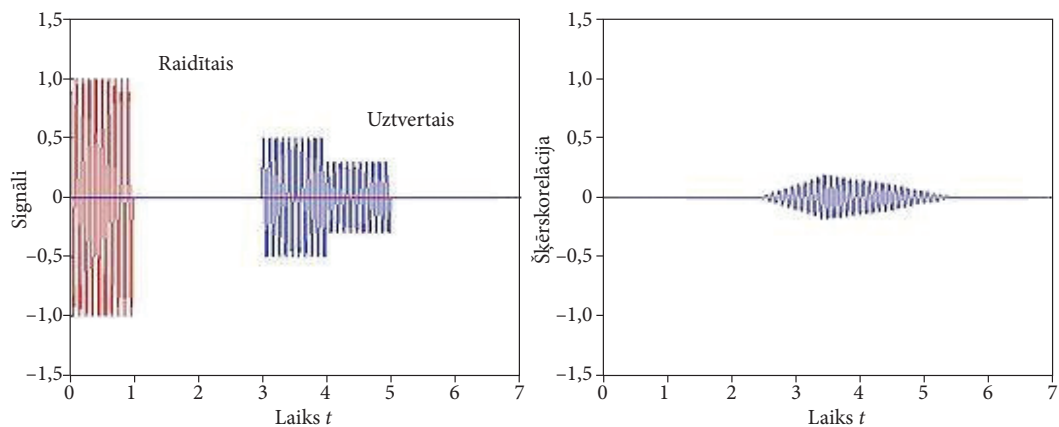
Ideālā (bet ne reālistiskā) gadījumā (bez trokšņu komponentes klātbūtnes) reģistrētā impulsa aizkavēšanas attiecībā pret raidīto impulsu (2-79. att. kreisā puse) ar salīdzināmu



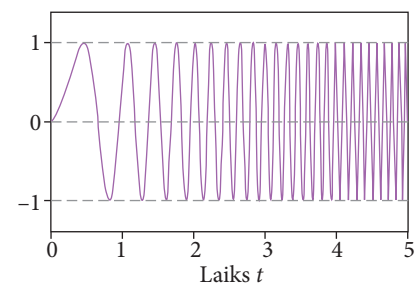
2-79. att. Radara pārraidītais un uztvertais signāls un to korelācijas funkcija gadījumā bez trokšņu komponentes klātbūtnes [49].



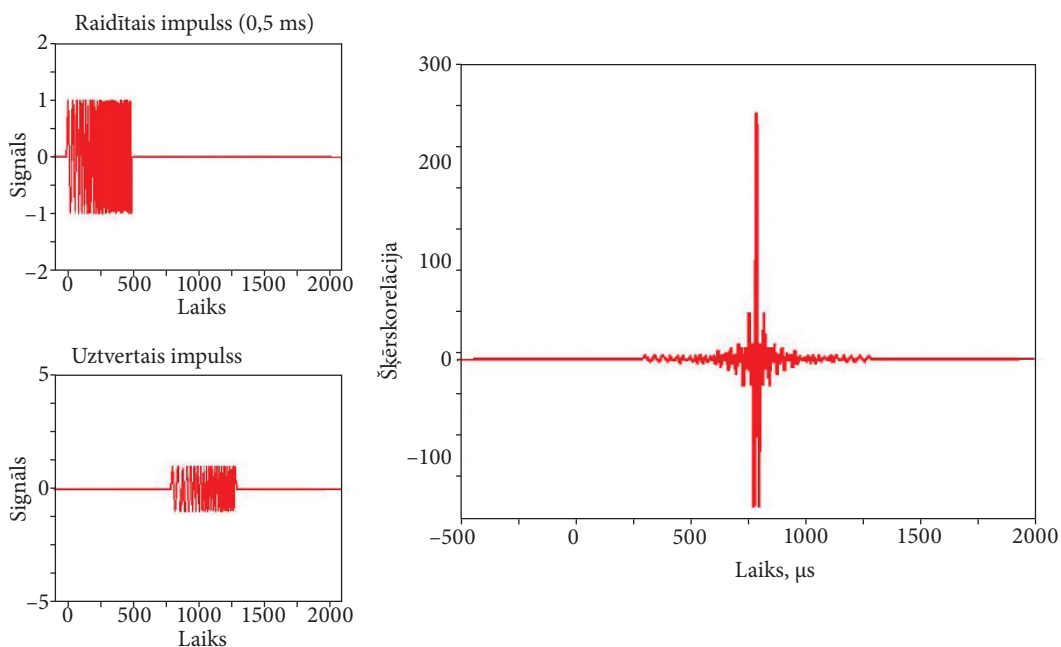
2-80. att. Radara pārraidītais un uztvertais signāls un to korelācijas funkcija gadījumā ar trokšņu komponentes klātbūtni [49].



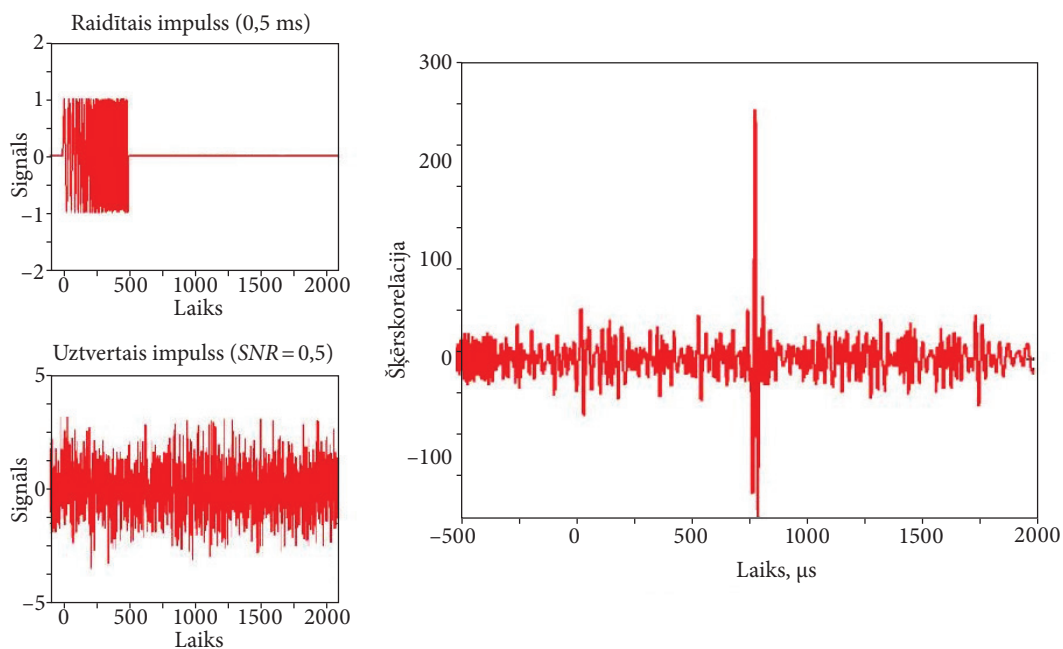
2-81. att. Korelācija reflektēto impulsu pārklāšanās gadījumā [Vikipēdija].



2-82. att. Lineāra čirka signāla atkarība no laika [Vikipēdija].



2-83. att. Ar čirkstu modulēts pārraidītais un uztvertais signāls un to korelācijas funkcija gadījumā bez trokšņu komponentes klātbūtnes [49].



2-84. att. Ar čirkstu modulēts pārraidītais un uztvertais signāls un to korelācijas funkcija gadījumā ar trokšņu komponentes klātbūtni [49].

precizitāti var noteikt, gan izmantojot minēto impulsu priekšējās un aizmugurējās frontes, gan arī šo impulsu korelācijas (šķērkorelācijas) funkcijas maksimumu (2-79. att. labā puse).

Trokšņu komponentes klātbūtnē (t. i., realitātei daudz vairāk atbilstošā gadījumā) situācija izmainās un impulsu frontu izmantošana kļūst neefektīva vai vispār neiespējama, taču joprojām sekmīgi lietojama ir korelācijas funkcija (2-80. att.).

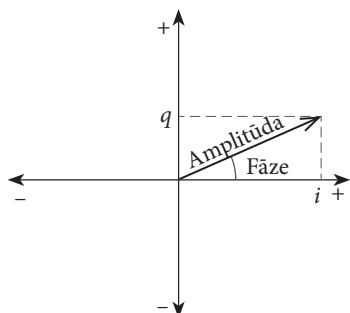
Tādējādi korelācijas funkcijas izmantošana ļauj minimizēt precizitātes zudumus tad, kad reģistrētie radara impulsi satur ievērojamu trokšņu komponenti.

Otra problēma, ar ko nākas saskarties, interpretējot radaru signālus, ir reflektēto impulsu, kas atstaroti no dažādiem zemes virsmas objektiem, pārklāšanās. Šādos gadījumos, kā to rāda 2-81. att. redzamais gadījums, impulsu korelācijas iespējas arī ir izsmeltas, un tās izmantošana nedod pozitīvu rezultātu. Lai pārvarētu šo problēmu, radaru impulsus ir lietderīgi modulēt nevis ar fiksētas frekvences nesējsignālu, bet gan ar t. s. lineārajiem čirkstiem²⁶ – viļņu formām, kuru frekvence lineāri mainās atkarībā no laika (2-82. att.). Šādā gadījumā ir iespējams ne tikai atdalīt pārklājušos impulsus, bet vispār realizēt impulsu lokalizāciju ar ļoti augstu precizitāti, izmantojot korelācijas funkciju (2-83. att.).

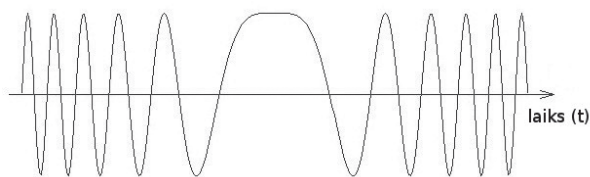
Turklāt čirkstu un korelācijas funkcijas kopīga izmantošana efektīvi darbojas arī reālos gadījumos, t. i., ievērojamas trokšņu komponentes klātbūtnē, kā tas redzams 2-84. att. Šo pieeju sauc par impulsu kompresijas metodi, un ar to paaugstina tālzipētes radaru radiālo izšķirtspēju, jo korelācijas funkcijas maksimums čirkstu modulācijas gadījumā ir ļoti ass un lokalizējams ar daudz augstāku precizitāti nekā izmantoto impulsu frontes.

2.5.3. Datu reģistrācijas kompleksā forma

Lai varētu strādāt ar čirkstiem, t. i., radaru impulsiem, kas modulēti ar mainīgas frekvences nesējsignālu, reflektētajā signālā ir jāreģistrē gan tā amplitūda, gan arī momentānā nesējfrekvences vērtība. Pēdējo ir vieglāk aprēķināt, nevis reģistrēt, ja zināma uztvertā signāla fāžu nobīde attiecībā pret kādu etalonu (stabilu laika skalu, stabilas frekvences ģeneratora signālu vai citiem atbalsta signāliem). Tādējādi katram radarattēla pikselim tiek pakārtotas divas dažādas vērtības – signāla amplitūda un nesējsignāla fāžu nobīde. Praktiski to ir ērti realizēt, izmantojot datu reģistrācijas komplekso formu, kad katram attēla pikselim atbilst komplekss skaitlis (2-85. att.). Reģistrētā reflektētā signāla amplitūda tiek



2-85. att. Reflektētā signāla kompleksā forma.



2-86. att. Čirksta signāla atkarība no laika attiecībā pret harmonisku atbalsta signālu.

²⁶ Angļu val. – *chirp*.

kodēta kā šī kompleksā skaitļa amplitūda z_o , nesējsignāla fāžu nobīde – kā šī kompleksā skaitļa fāze φ . Tiek izmantotas arī šo komplekso skaitļu reālās un imaginārās komponentes, kas formē radarattēla divus reālus slāņus ar nosaukumiem I (reālā daļa) un Q (imaginārā daļa). Minēto komplekso skaitļu raksturlielumus savstarpēji saista labi zināmās algebras likumsakarības [8]

$$z_o = \sqrt{i^2 + q^2}, \quad \varphi = \arctan \frac{q}{i}$$

$$i = z_o \cos \varphi, \quad q = z_o \sin \varphi$$

Ja reflektētajam radara signālam šādi tiek reģistrēta gan amplitūda, gan fāze, tad tādu signālu sauc par koherentu.

Ir jāpievērš uzmanība tam, ka čirksta intensitātes atkarība no laika ir saistīta ar izmantoto atbalsta signālu. 2-82. att. redzamajā formā tā ir tikai tad, ja kā atbalsta signāls tiek izmantota stabila laika skala, t. i., atbalsta signālu kompleksajā formā reprezentē konstants vektors. Taču, izmantojot augstu frekvenču signālu, daudz precīzāk var nomērīt fāžu nobīdi starp tuvu frekvenču signāliem, tādēļ parasti kā atbalsta signālu izmanto stabila augstas frekvences harmonisku signālu (rotējošu vektoru), attiecībā pret kuru čirksta intensitātes atkarība no laika ir citāda (2-86. att.). Tomēr jāatceras, ka neatkarīgi no grafiskās reprezentācijas tas ir viens un tas pats čirksts.

Centrālajam maksimumam 2-86. att. atbilst čirksta momentānās frekvences sakrišana ar atbalsta signāla frekvences vērtību.

2.5.4. Precizitātes paaugstināšana azimutālajā virzienā, SAR

Platformai pārvietojoties ar ātrumu v , tās kustības virzienā (skat. 2-65. un 2-66. att.) radara antena uztver reflektētos signālus no visiem starojuma kūļa projekcijas (apstarotā laukuma) punktiem. Kā piemēru apskatīsim punktu uz zemes virsmas pozīcijā F (2-66. att.), kas platformas kustības dēļ pārvietosies pa apstaroto laukumu caur stāvokli C uz stāvokli E²⁷. Attālums r no antenas S līdz šim punktam mainās atkarībā no laika

$$r = \sqrt{H^2 + x^2 + y^2}$$

kur $x = OC = x_C = \text{const}$, $y = v(t - t_C)$, t_C – laika moments, kurā apskatāmais punkts atrodas stāvoklī C, kad attālums r ir minimāls. Tādējādi

$$r = \sqrt{H^2 + x_C^2 + v^2(t - t_C)^2}$$

un

$$\dot{r} = \frac{dr}{dt} = \frac{v^2(t - t_C)}{\sqrt{H^2 + x_C^2 + v^2(t - t_C)^2}} = \frac{v^2(t - t_C)}{r} \quad (2.10.)$$

Taču, ja radiālais ātrums $\dot{r}$ starp radara antenu un starojumu reflektējošo punktu (objektu) nav vienāds ar nulli, tad ir novērojams Doplera efekts (skat. 1.3.6. sadaļu), kas izraisa reflektētā starojuma papildu frekvences izmaiņu un reģistrētā signāla fāzes nobīdi. Lai novērtētu frekvences izmaiņu, izmantojam formulu (1.98.), saskaņā ar kuru reģistrētā signāla

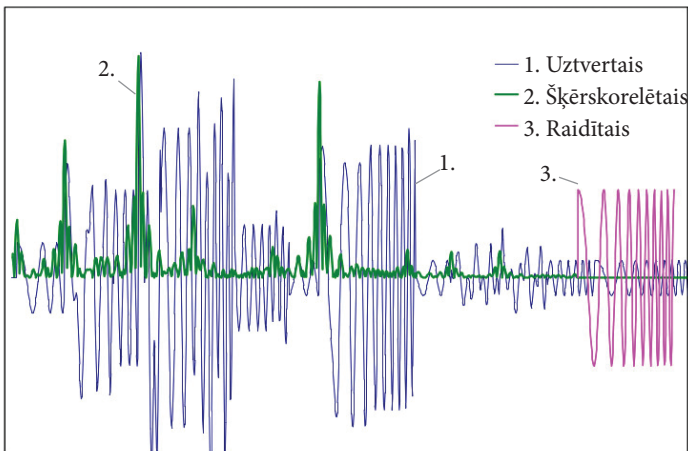
²⁷ Īstenībā, protams, minētais punkts ir nekustīgs attiecībā pret zemi, bet pārvietojas apstarotais laukums.

frekvence f_R ir

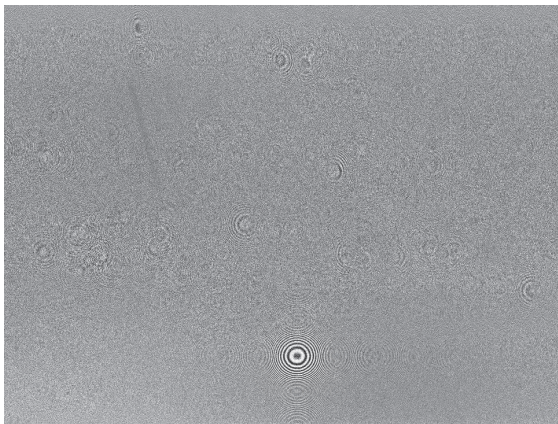
$$f_R = f_C \left(1 + \frac{2\dot{r}}{c} \right) = f_C \left(1 + \frac{2v^2 (t - t_C)}{cr} \right) \quad (2.11.)$$

kur c – gaismas ātrums, f_C – reflektētā signāla frekvence no stāvokļa C (2-66. att.). Formula (2.11.) liecina, ka Doplera efekts radara signāla azimutālajā komponentē formē čirktu ar lineāru frekvences izmaiņu²⁸. Šim secinājumam ir fundamentāla nozīme, jo tas liecina, ka arī azimutālajā virzienā var izmantot reģistrētā signāla un atbilstošā Doplera čirka korelācijas rezultātus, lai precīzi lokalizētu EMS reflektējošā objekta atrašanās vietu (2-87. att.). Pirmais šo rezultātu ar formulējumu “Impulsu radara Doplera metode un iekārta” 1954. gadā ieguva inženieris no ASV Karls Vilejs (1918–1985). Tagad metode un tās lietojumi ir pazīstami kā sintezētās apertūras radari jeb SAR.

Ar radariekārtu, kas reģistrē koherento starojumu (t. i., gan reflektētā starojuma intensitāti, gan fāzi), tieši iegūtais attēls ir EMS interferences aina (skat. 1.1.6. sadaļu) no visiem apstarotā laukuma reflektētajiem signāliem, un identificēt tajā zemes virsmas objektus ir gandrīz neiespējami (2-88. att.).



2-87. att. Reflektējošo objektu lokalizācija, izmantojot signālu šķērskorelāciju [46].



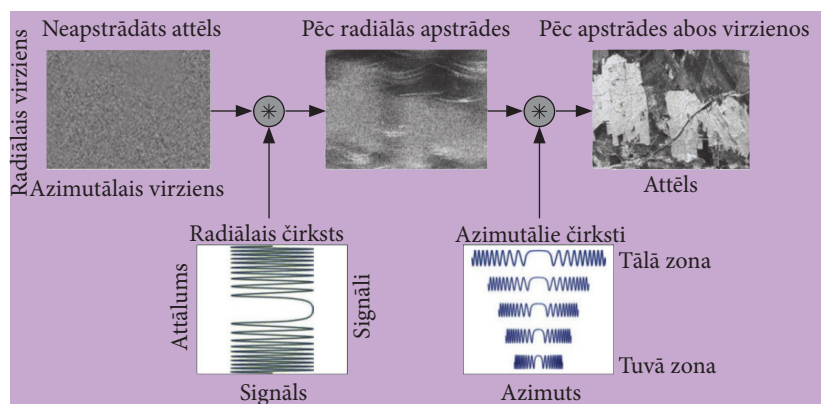
2-88. att. Neapstrādāts sintezētās apertūras radara attēls [48].

²⁸ Ar precizitāti līdz nelielām $r(t)$ izmaiņām apstarotā laukuma ietvaros.

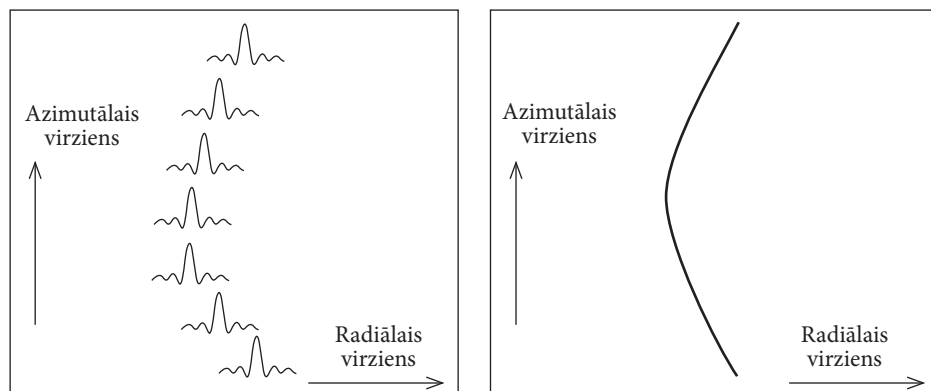
SAR attēlu apstrāde, izmantojot korelācijas, shematiski parādīta 2-89. att. Vispirms korelācijas algoritms tiek realizēts katrai sākotnējā digitālā attēla kolonnai, t. i., radiālajā virzienā, izmantojot pārraidīto čirksu viļņu formas. Tas ļauj lokalizēt reflektējošos objektus attēla vertikālajā (radiālajā) virzienā, iegūstot attēlu ar daudzām horizontāli orientētām švīkām. Pēc tam korelācijas algoritms tiek piemērots šādi iegūtā attēla katrai rindiņai azimutālajā (horizontālajā) virzienā, izmantojot Doplera efekta formēto čirksu viļņu formas (tās ir atšķirīgas katrai attēla rindiņai). Pēc šo divu korelācijas procesu realizācijas attēls ir “parādījies”, un var izmantot dažādus tā uzlabošanas vai pārveidošanas algoritmus, par kuriem būs runa turpmāk.

Taču, runājot par korelācijas algoritmu lietošanu radiālajā un azimutālajā virzienā, ir jāņem vērā viena būtiska SAR attēlu apstrādes īpatnība.

Katram EMS reflektējošam objektam šķērsojot apstaroto laukumu (t. i., tā koherences laikā), nedaudz mainās attālums r no radara antenas līdz šim objektam. Tas notiek ģeometriski viennozīmīgi modelējamā veidā un izpaužas tādejādi, ka pēc radiālās kompresijas objektu attēli formē nevis horizontālas, bet sirpjveida švīkas attēla azimutālajā virzienā (2-90. att.). Šo efektu dēvē par attāluma migrācijas distorsiju un tā korekcijai (novēršanai) ir izstrādāti efektīvi t. s. attāluma migrācijas algoritmi [50], kas minētās sirpjveida struktūras transformē par taisnēm. Attāluma migrācijas distorsiju ir būtiski novērst, pirms tiek realizēts korelācijas algoritms attēla azimutālajā virzienā (t. i., azimutālā kompresija).



2-89. att. SAR attēla apstrāde, izmantojot korelāciju ar radiālajiem un azimutālajiem čirkiem [47].



2-90. att. Attāluma migrācijas distorsijas skaidrojums.

2.5.5. Korelācijas funkcija un tās aprēķināšana

Iepriekšējās sadaļās bieži tika izmantots korelācijas (šķērkorelācijas) jēdziens, neiedziļinoties tā definīcijā un īpašībās. Tagad pakavēsimies pie šīs SAR tik svarīgās operācijas nedaudz detalizētāk. Par divu kompleksu signālu $z(t)$ un $s(t)$ (šajā gadījumā tie ir radara reģistrētais z un pārraidītais s signāls) korelācijas funkciju²⁹ sauc

$$k(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t) s^*(t - \tau) dt \quad (2.12.)$$

kur ar $(*)$ apzīmēta kompleksā saistība, τ raksturo signālu nobīdi (šajā gadījumā laika nozīmē) vienam pret otru. Korelācijas funkcija būs maksimāla pie tādas τ vērtības, pie kuras abi signāli uzrādīs vislielāko līdzību, t. i., tā ir abu sākotnējo funkciju (signālu) līdzības mērs pie dažādām signālu nobīdes vērtībām.

Strādājot ar digitālā attēla rindinām vai kolonnām (kā tas ir, piemēram, SAR radarattēlu gadījumā), formulas (2.12.) vietā, protams, jālieto tuvināta formula

$$k(n) \cong \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} z(m) s^*(m - n) \quad (2.13.)$$

kur M – pikseļu skaits izmantotajā rindiņā vai kolonnā, savukārt n raksturo signālu savstarpējo nobīdi pikseļos. Digitālo attēlu apstrādē (skat. 3.1.5. un 3.2.3. sadaļu) plaši izmanto matemātisku operāciju, ko sauc par konvolūciju ($\otimes$) un ko definē sakarība

$$z(\tau) \otimes s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t) s(\tau - t) dt \quad (2.14.)$$

Salīdzinot formulas (2.12.) un (2.14.), ir viegli ievērot, ka konvolūciju (kā matemātisku darbību) var sekmīgi izmantot arī korelācijas funkcijas aprēķināšanai formā

$$k(\tau) = z(\tau) \otimes s^*(-\tau) \quad (2.15.)$$

Praktiski korelācijas funkciju $k(\tau)$ visbiežāk rēķina, izmantojot Furjē transformācijas un t. s. konvolūcijas teorēmas rezultātus (skat. 3.2.2. un 3.2.3. sadaļu).

2.5.6. SAR attēlu izšķirtspēja, koherences nosacījumi

Izmantojot čirkstus un korelācijas funkciju, iespējams ievērojami paaugstināt izšķirtspēju ar impulsu radariem iegūtajiem tālzipētes attēliem. Noskaidrosim, kādi faktori to nosaka un kāda tā ir, izmantojot SAR tehnoloģijas. Sāksim ar radiālo izšķirtspēju, kas atkarīga no pārraidītajiem čirkstiem un to parametriem. Lineāriem čirkstiem frekvences f atkarību no laika izsaka formula

$$f = f_0 + \frac{a}{2} t, \quad 0 \leq t \leq t_p$$

kur a sauc par frekvences pieauguma koeficientu, savukārt t_p ir čirksta ilgums. Lineāriem čirkstiem ir izteikti taisnstūra formas amplitūdas spektri, kas rakturo to frekvenču joslas (2-91. att.), kuru platumu $B = at_p$ ir viegli aprēķināt, veicot Furjē transformāciju (skat. 3.2.2. sadaļu).

²⁹ To iespējams definēt vairākos formāli nedaudz atšķirīgos, bet faktiski identiskos veidos.

No korelāciju funkciju teorijas izriet, ka tās centrālā maksimuma platums ir apgriezti proporcionāls izmantotā čirksta frekvenču joslas platumam, proti, to iespējams lokalizēt ar precizitāti

$$\tau_p = \frac{1}{B} = \frac{1}{at_p}$$

Ievietojot šo rezultātu formulā (2.2.), iegūstam SAR radiālās izšķirtspējas vērtību formā

$$\delta x_r = \frac{c\tau_p}{2\sin\beta} = \frac{c}{2B\sin\beta} = \frac{c}{2at_p\sin\beta} \quad (2.16.)$$

Tālpētes radariem, kas izmanto SAR tehnoloģijas, radiālā izšķirtspēja var sasniegt vērtības $\delta x_r \sim 1$ m, kas atbilst augstas kvalitātes MSS attēlu izšķirtspējai.

Turpinājumā novērtēsim SAR tehnoloģiju azimutālo izšķirtspēju. Lai saņemtu reflektēto signālu no EMS izkļiedējoša zemes virsmas objekta, tam jāatrodas radara apstarotajā laukumā (kūļa projekcijā), kura azimutālo platumu platformas kustības virzienā (2-65. un 2-66. att.) nosaka difrakcija (2.1.)

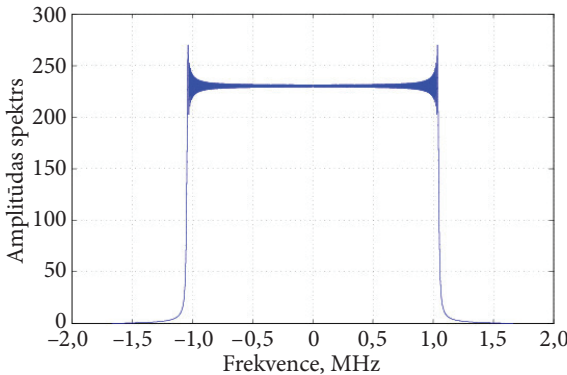
$$R_a = \frac{\lambda H}{L \cos\beta}$$

EMS izkļiedējošais objekts atradīsies radara apstarotajā laukumā laika intervālā

$$T_k \cong \frac{R_a}{v} = \frac{\lambda H}{vL \cos\beta} \quad (2.17.)$$

kur v – platformas kustības ātrums, T_k sauc par koherences laiku, un šajā laika intervālā tiks apstarots ar daudziem radara impulsiem (čirkstiem), jo $T_k \gg p$, kur $p = 1/PRF^{30}$. Šādi tiek iegūta un uzkrāta apskatāmā objekta t. s. “Doplera vēsture”, kas ļauj uzkonstruēt lokalizācijas precizitātes celšanai nepieciešamos azimutālos čirkstus. Laika intervālā T_k tiek reģistrēts koherents signāls (t. i., gan tā amplitūda, gan fāze), un nosacīti varam uzskatīt, ka tiek izmantota virtuāla antena, kuras garums ir vienāds ar $L^{(s)} = vT_k = R_a$, jo objekta “Doplera vēsture” ir pieejama analīzei visu koherences laiku. Šādas virtuālas jeb sintezētas antenas azimutālo difrakcijas izšķirtspēju nosaka (2.1.) un (2.17.) formā

$$R_a^{(s)} = \frac{\lambda H}{vT_k \cos\beta} = L$$



2-91. att. Lineāra čirksta amplitūdas spektrs.

30 Šeit PRF – radara takts frekvence.

kur L – izmantotā radara antenas ģeometriskie izmēri (garums). Īstenībā SAR azimutālā izšķirtspēja ir vēl augstāka

$$\delta y_a = \frac{L}{2} \quad (2.18.)$$

jo radara impulsiem divas reizes (turp un atpakaļ) jāmēro ceļš no antenas līdz zemes virsmas objektam.

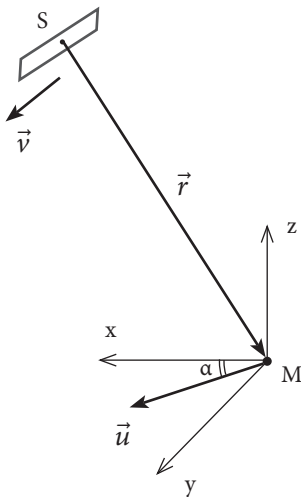
Tādējādi atšķirībā no reālās apertūras radariem (RAR) mazākas antenas izmantošana nodrošina augstāku SAR azimutālo izšķirtspēju. Taču jāņem vērā arī citi faktori, tādi kā pārraidīto impulsu jaudas ierobežojumi, PRF u. c. nosacījumi, kas savukārt ierobežo izmantojamās antenas minimālos izmērus. To visu ievērojot, tālīzpētes radariem, kas izmanto SAR tehnoloģijas, ir izdevies sasniegt azimutālo izšķirtspēju, kas ir salīdzināma ar to radiālo izšķirtspēju, proti, $\delta y_a \sim 1$ m, kas atbilst augstas kvalitātes MSS attēlu izšķirtspējai.

2.5.7. Kustīgu objektu distorsijas

SAR attēlu formēšanai izmanto Doplera efektu, tāpēc tiem piemīt specifiskas distorsijas, ar kurām jārēķinās, lokalizējot kustīgus objektus. Pirmā no tām ir kustīgo objektu nobīdes distorsija, kuras izprašanai apskatām 2-92. att., kurā redzams satelīts S , kas ar radaru novēro kustīgu objektu (mērķi) M uz zemes virsmas.

Ar $\vec{r}$ apzīmēsim vektoru, kas savieno satelītu S ar mērķi M , kurš pārvietojas ar ātrumu $\vec{u}$ pa zemes virsmu (t. i., izmantotās koordinātu sistēmas xy plaknē), un vektors $\vec{u}$ veido leņķi α ar x asi. Satelīts S savukārt augstumā H virs zemes virsmas pārvietojas ar ātrumu $\vec{v}$ paralēli koordinātu sistēmas y asij attālumā X no tās. Tādējādi

$$\vec{r} = - \begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} X \\ vt \\ H \end{Bmatrix}$$



2-92. att. Kustīga objekta nobīdes distorsijas skaidrojums.

un mērķa **relatīvais ātrums** attiecībā pret satelītu ir izsakāms formā

$$\vec{v}' = \vec{u} - \vec{v} = \begin{Bmatrix} u \cos \alpha \\ u \sin \alpha - v \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ja mērķis M būtu nekustīgs, tad Doplera efekts no tā reflektētajam signālam būtu vienāds ar nulli pie $y_s = 0$, kad attālums starp mērķi un satelītu ir minimāls. Taču kustīgam mērķim tas notiks pie nosacījuma $\vec{r} \cdot \vec{v}' = 0$ (nevis pie $y_s = 0$), t. i.,

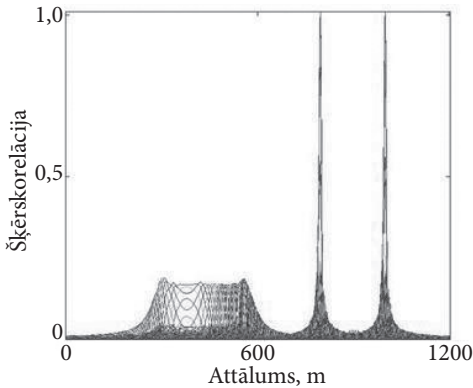
$$-Xu \cos \alpha - y_s (u \sin \alpha - v) = 0$$

jeb

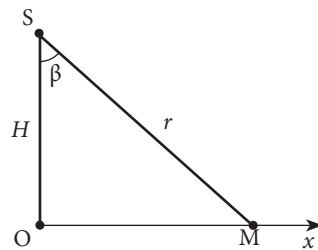
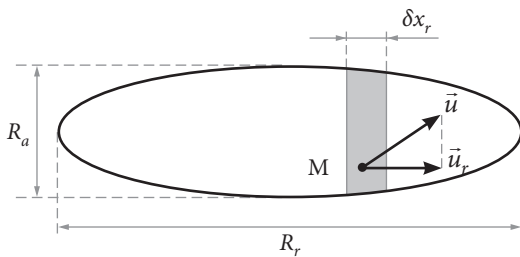
$$y_s = \frac{uX \cos \alpha}{v - u \sin \alpha} \quad (2.19.)$$

Tādējādi kustīgi objekti SAR attēlos izskatās nobīdīti attiecībā pret nekustīgiem objektiem y ass jeb platformas kustības virzienā. Turklāt šis efekts (distorsija) var būt visai ievērojams. Ja $u = 10$ m/s, $X = 300$ km, $v = 7$ km/s, $\cos \alpha = 1$, tad, ievietojot šīs vērtības formulā (2.19.), iegūstam $y_s \cong 400$ m, ar ko nopietni jārēķinās, interpretējot SAR attēlus ar kuģiem vai kustīgiem zemes transporta līdzekļiem.

Cita svarīga kustīgu objektu distorsija ir t. s. izzušanas³¹ distorsija. Tā parādās, ja novērojamais kustīgais objekts (mērķis) M iziet no radiālās izšķirtspējas apgabala x ass (radiā-



2-93. att. Kustīga un divu nekustīgu objektu korelācijas funkcijas SAR attēlā [50].



2-94. att. Kustīga objekta izzušanas distorsijas skaidrojums.

³¹ Angļu val. – *fading*.

lajā) virzienā pirms koherences laika beigām. Šādā gadījumā “Doplera vēsture” par mērķi tiek uzkrāta vairākās attēla rindiņās, un objekts attēlā izplūst (izzūd). Tā korelācijas funkcijai (2-93. att.) vairs nav izteikta asa maksimuma, un objekta lokalizācija attēlā kļūst apgrūtināta vai pat neiespējama.

Lai novērtētu izzušanas distorsijas efektu, apskatām 2-94. att., kur redzams radara apstarotais laukums un radiālajai izšķirtspējai δx_r (iesvītrotais apgabals) atbilstošais rezelis (pirms azimutālās kompresijas).

Ja mērķis M kustas ar ātrumu $\vec{u}$, kuram ir liela radiālā komponente $\vec{u}_r$, tad tas var pamest radiālās izšķirtspējas rezeli, šķērsojot tā sānu malu pirms koherences laika beigām, pie nosacījuma, ja

$$T_k > \frac{\delta x_r}{|u_r|} \quad (2.20.)$$

kur T_k – koherences laiks. Saskaņā ar (2.17.) un 2-66. att. labās puses attēlu

$$T_k = \frac{\lambda H}{vL \cos \beta} = \frac{\lambda r}{vL}$$

kur L – izmantotās radara antenas garums, nosacījumu (2.20.) var pārveidot formā

$$\frac{\lambda r}{vL} > \frac{\delta x_r}{|u_r|}$$

jeb

$$|u_r| > \frac{vL\delta x_r}{\lambda r} = \frac{2v\delta x_r\delta y_a}{\lambda r} \quad (2.21.)$$

jo saskaņā ar (2.18.) $L=2\delta y_a$, kur δy_a – SAR attēla azimutālā izšķirtspēja. Ievietojot formulā (2.21.) tipiskas vērtības $\delta x_r=\delta y_a=10$ m, $r=350$ km, $\lambda=6$ cm, $v=7$ km/s, iegūstam $u_r=70$ m/s. Turklāt, jo augstāka attēla izšķirtspēja, jo izzušanas distorsija parādās ātrāk. Ar to jārēķinās, apstrādājot SAR attēlus, kuros identificējamās lidmašīnas (potenciālu teroristu lidaparāts uz attēla var būt izzudis), gan arī daudz lēnāki objekti pie augstas attēlu izšķirtspējas.

2.5.8. SAR kalibrēšana un fokusēšana

Sintezētās apertūras radarattēlu kalibrēšanai izmanto vairākas metodes (retroreflektori, transponderi u. c.), no kurām detalizētāk iepazīsimies ar retroreflektoriem. Tie ir piramīdveida konstrukcijas (2-95. att.), kuru trīs skaldnes ir savstarpēji perpendikulāras un kurām piemīt spoguļrefleksijas īpašība atstarot EMS precīzi atpakaļ starojuma krišanas virzienā³² (skat. 1-36. att.).

Retroreflektoru atstarojumi SAR attēlos formē punktveida signālus, ko matemātiski var modelēt ar t. s. “delta” funkcijām (2-96. att.).

Šie punktveida signāli ļauj veikt, pirmkārt, SAR iekārtas radiometrisko kalibrēšanu, t. i., ļauj nodibināt savstarpēji viennozīmīgu atbilstību starp attēla pikseļu spožuma vērtībām³³ un radara spožumu jeb “beta” atpakaļizkliedes koeficientu (1.124.). Otrkārt, retroreflektori tiek izvietoti vietās uz zemes virsmas, kurām ir noteiktas precīzas GPS koordinā-

³² Analogi automobiļu un velosipēdu pasīvajiem stopsignāliem.

³³ T. s. *DN* jeb angļu val. *digital number* vērtībām.

tas, tādējādi šie punktveida signāli ir izmantojami arī radarattēlu ģeoreferencēšanai (skat. 3.8. nodaļu).

Treškārt, šos signālus var izmantot arī SAR attēlu fokusēšanai. Kā to redzēsīm turpmākajā izklāstā (skat. 3.3.2. sadaļu un 3-33. att.), reģistrētais attēls $g(x, y)$ vienmēr atšķiras no sākotnējā (netransformētā) attēla $f(x, y)$. Šīs atšķirības nosaka gan sistematiskās, gan gadījuma kļūdas (troksnis). Ja neņemam vērā gadījuma kļūdas, tad sākotnējo attēlu $f(x, y)$ un reģistrēto attēlu saista formula

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) \quad (2.22.)$$

kur ar $(\otimes)$ apzīmēta konvolūcijas operācija (2.14.), bet funkcija $h(x, y)$ reprezentē sistemātiskās transformācijas attēla iegūšanas procesā³⁴. Konvolūcijas teorēma (skat. 3.2.3. sadaļu) nosaka, ka spektrālajā apgabalā (t. i., pēc Furjē transformācijas veikšanas) iepriekšējo sa-
karību var uzrakstīt formā

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (2.23.)$$

kur $G(u, v) = \mathcal{F}[g(x, y)]$, $H(u, v) = \mathcal{F}[h(x, y)]$, $F(u, v) = \mathcal{F}[f(x, y)]$, ar $\mathcal{F}$ apzīmēta Furjē transformācija (skat. 3.2.2 sadaļu).

Ir zināms, ka Furjē transformācija no “delta” funkcijas (skat. 2-96. att. labo augšējo stūri) ir konstante, kuras vērtību nosaka pēc radiometriskās kalibrēšanas rezultātiem, tāpēc, izvēloties homogēnu attēla apakšapgabalu ar punktveida signālu (2-96. att. kreisais augšējais stūris), varam secināt, ka šajā apakšapgabalā

$$F(u, v) = C = \text{const}$$

Tādējādi izvēlētajā apakšapgabalā

$$H(u, v) = \frac{1}{C} \cdot G(u, v) \quad (2.24.)$$

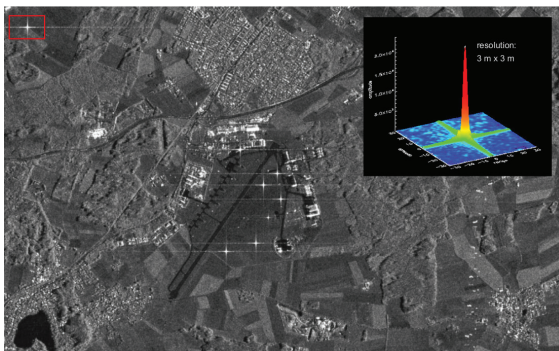
un sistemātisko transformāciju funkcija $h(x, y)$ ir aprēķināma ar formulu

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[H(u, v)] = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{G(u, v)}{C}\right]$$

Pieņemot, ka funkcija $h(x, y)$ ir viena un tā pati visam iegūtajam attēlam, varam aprēķināt sākotnējā (netransformētā) attēla ievērojami precīzāku tuvinājumu



2-95. att. Radara retroreflektors (ESA PECS).



2-96. att. SAR attēls ar retroreflektoru signāliem (Terra SAR).

34 Ši iemesla dēļ arī retroreflektoru punktveida objekti attēlā būs nedaudz “izplūduši”.

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{G(u, v)}{H(u, v)} \right] \quad (2.25.)$$

kur $H(u, v)$ pēc izvēlēta apakšapgabala nosaka formula (2.24.), ar $\mathcal{F}^{-1}$ apzīmēta apgrieztā Furjē transformācija.

Apskatīto procedūru sauc par SAR attēla fokusēšanu, un tā var jūtami uzlabot attēla kvalitāti. Process patiesībā ir ievērojami komplicētāks, jo gadījuma kļūdu (trokšņu) klātbūtne attēlos stipri ietekmē aprakstīto t. s. dekonvolūcijas algoritmu (skat. 3.3.4. sadaļu).

2.6. SAR polarimetrija (PolSAR) (14. lekcija)

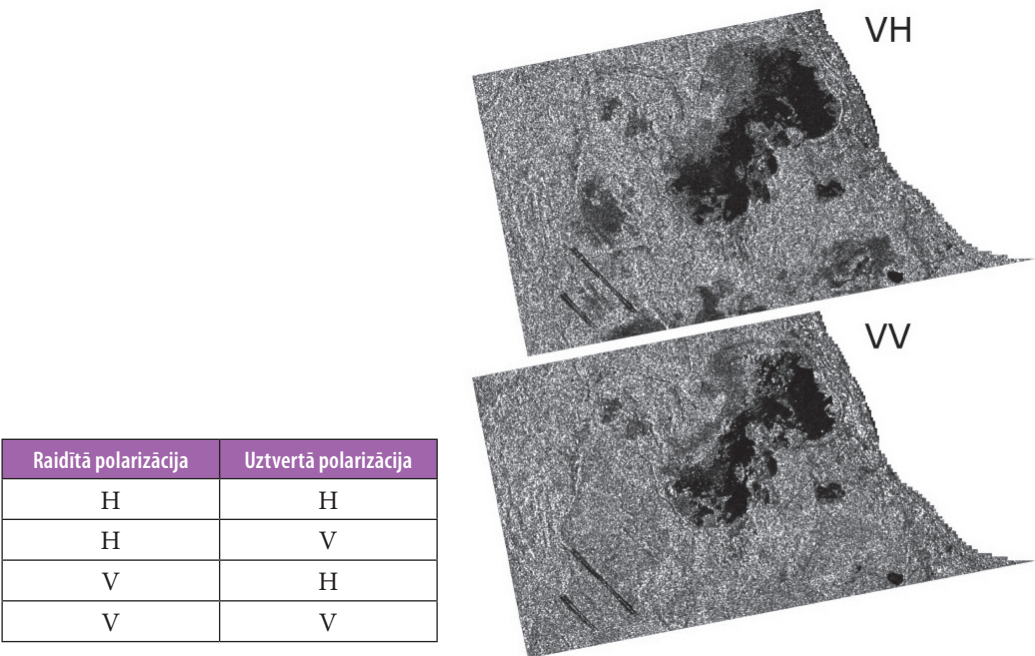
2.6.1. Kopsavilkums

Zemes virsmas objekti atšķirīgi mijiedarbojas ar dažādi polarizētiem elektromagnētiskā starojuma (EMS) signāliem, un tas var sniegt plašu informāciju par novērojamo objektu. Šajā lekcijā apskatīsim galvenos EMS polarizāciju raksturojošos parametrus un polarizēta starojuma formalizācijas veidus. Iepazīsimies ar Džonsa vektoru, Sinklēra matricām, kā arī koherences un kovariācijas matricu dekompozīcijas algoritmiem planētas (Zemes) virsmas tekstūras un faktūras parametru novērtēšanai.

2.6.2. Radaru signālu polarizācijas veidi

Tālizpētes radaros parasti izmanto lineāri (plakani) polarizētu elektromagnētisko starojumu (EMS) divās tā modifikācijās: H – horizontāli polarizēts EMS un V – vertikāli polarizēts EMS, jo Zemes virsmas objekti atšķirīgi mijiedarbojas ar dažādi polarizētu EMS. Tā vertikāli objekti atstaro vertikāli polarizētus EMS signālus, taču ir “neredzami” horizontāli polarizēta EMS signāliem. Arī tālizpētes signālu reģistrācija notiek, izmantojot polarizācijas filtrus, un tādējādi visbiežāk tiek raidīti divu veidu signāli (ar H un V polarizāciju), bet uztverti četru veidu signāli atbilstoši 2-5. tabulai.

Šādā veidā iespējams iegūt vairāk informācijas par pētāmo planētas (Zemes) virsmas apgabalu, nekā izmantojot tikai vienu no polarizācijas veidiem, jo HH (raidīts H polarizēts



2-5. tab. Raidīto un uztverto EMS signālu polarizācijas. 2-97. att. Kaņiera ezera un tā apkārtnes VH un VV radarattēli (Sentinel-1).

signāls, uztverts H polarizēts signāls), VV, HV un VH radarattēli ir visai atšķirīgi. 2-97. att. redzami Kaņiera ezera (Latvija) un tā apkārtnes VH un VV polarizāciju SAR attēli, kas iegūti ar “Sentinel-1” satelītu (ESA). Redzamas pikseļu vērtību atšķirības gan pašā ezerā, gan arī Čukciema purvā (uz dienvidrietumiem no Kaņiera ezera), kuru cēlonis ir veģetācijas tekstūras īpatnības. Apskatāmajā apgabalā ir izplatītas niedres, kuru vertikālā struktūra labāk saskatāma tieši VV polarizācijas attēlos.

Informācijas analīzi, izmantojot šo četru veidu (HH, VV, HV, VH) radarattēlus, lai novērtētu Zemes virsmas un tās objektu fizikālās (faktūras) un ģeometriskās (tekstūras) īpašības, sauc par SAR polarimetriju, un tā ir tālīzpētes SAR datu apstrādes pamatmetode.

2.6.3. Polarizācijas elipse un Džonsa vektors

Jau redzējām (1.1.3. sadaļā), ka vispārējā gadījumā (ko iegūst, risinot Maksvela vienādojumu sistēmu (1.3.)) elektromagnētiskā viļņa, kas izplatās x ass virzienā, elektriskās intensitātes vektora $\vec{E}$ galapunkts pārvietojas pa elipsi atbilstoši vienādojumam (1.12.)

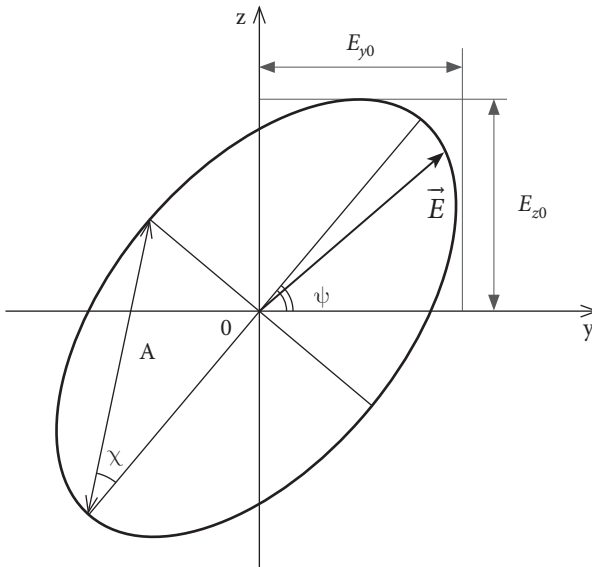
$$\frac{E_y^2}{E_{y0}^2} + \frac{E_z^2}{E_{z0}^2} - 2 \frac{E_y E_z}{E_{y0} E_{z0}} \cos(\alpha_2 - \alpha_1) = \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)$$

kur α_1, α_2 – viļņa komponentu sākuma fāzes, E_{y0} un E_{z0} – amplitūdas y un z ass virzienos. Šo elipsi sauc par polarizācijas elipsi (2-98. att.), un SAR polarimetrijā [51] to ir pieņemts raksturot ar specifiskiem parametriem, proti, polarizācijas elipses amplitūdu

$$A = \sqrt{E_{y0}^2 + E_{z0}^2}$$

elipses orientācijas leņķi

$$\tan 2\Psi = 2 \frac{E_{y0} E_{z0}}{E_{y0}^2 - E_{z0}^2} \cos(\alpha_2 - \alpha_1), \quad \Psi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$



2-98. att. Polarizācijas elipse un tās parametri.

un ekscentricitātes leņķi jeb t. s. elipses apertūru

$$|\sin 2\chi| = 2 \frac{E_{y0}E_{z0}}{E_{y0}^2 + E_{z0}^2} |\sin(\alpha_2 - \alpha_1)|, \quad \chi \in [0, \frac{\pi}{4}]$$

Tādējādi polarizācijas elipsi ir pieņemts raksturot ar lielumiem, kas atšķiras no klasiskajā analītiskajā ģeometrijā pieņemtās parametru sistēmas.

Saskaņā ar (1.11.) plakānu elektromagnētisko vilni tā kompleksā formā apraksta formulas (kur $i = \sqrt{-1}$)

$$E_y = E_{y0} \sin(\omega t - kx + \alpha_1) = E_{y0} e^{i\alpha_1} e^{i(\omega t - kx)}$$

$$E_z = E_{z0} \sin(\omega t - kx + \alpha_2) = E_{z0} e^{i\alpha_2} e^{i(\omega t - kx)}$$

jeb vektoriālā formā to var uzrakstīt kā

$$\vec{E} = \vec{E}_J e^{i(\omega t - kx)} \quad (2.26.)$$

kur

$$\vec{E}_J = \begin{Bmatrix} E_{y0} e^{i\alpha_1} \\ E_{z0} e^{i\alpha_2} \end{Bmatrix} \quad (2.27.)$$

sauc par [52] Džonsa vektoru. Džonsa vektors ir kompakta un ērta matemātiska struktūra polarizācijas efektu raksturošanai (līdzīgi t. s. Stoksa vektoram), un to ir viegli saistīt arī ar polarizācijas elipses parametriem

$$\vec{E}_J = A e^{i\alpha} \begin{Bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi \\ \sin \Psi & \cos \Psi \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \chi \\ i \sin \chi \end{Bmatrix} \quad (2.28.)$$

kur α – atbalsta signāla fāze.

Kā piemēru apskatīsim lineāri polarizētu elektromagnētisko vilni, kam saskaņā ar (1.1.4.) $\alpha_2 - \alpha_1 = m\pi$, kur $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ utt. Horizontālās polarizācijas gadījumā $E_{z0}=0$, $E_{y0} \neq 0$, savukārt atbilstošās polarizācijas elipses parametri būs $A=E_{y0}$, $\Psi=0$, $\chi=0$. Izvēloties $\alpha = \alpha_1 = 0$ un izmantojot (2.28.), varam aprēķināt šim gadījumam atbilstošo Džonsa vektoru

$$\vec{E}_{JH} = \begin{Bmatrix} E_{y0} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Džonsa vektoru nereti normē formā

$$\vec{u}_{JH} = \frac{\vec{E}_J}{A} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Vertikālās lineāras polarizācijas gadījumā $E_{y0}=0$, $E_{z0} \neq 0$, atbilstošās polarizācijas elipses parametri būs $A=E_{z0}$, $\Psi=\pi/2$, $\chi=0$, bet nenormēts un normēts Džonsa vektors (izvēloties $\alpha = \alpha_2 = 0$)

$$\vec{E}_{JV} = \begin{Bmatrix} 0 \\ E_{z0} \end{Bmatrix}, \quad \vec{u}_{JV} = \frac{\vec{E}_{JV}}{A} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

Līdzīgā veidā ar polarizācijas elipses parametriem un Džonsa vektoru var aprakstīt arī citus polarizācijas gadījumus, tostarp cirkulāro un eliptisko polarizāciju.

2.6.4. Objekta efektīvais (jeb radara) šķērsgriezums

Apskatām objektu O, ko no radara R sasniedz EMS enerģijas plūsma (1.34.) $\Delta\Phi_I = W_I \Delta S$, kur W_I – krītošā EMS enerģijas plūsmas blīvuma (Pointinga) vektora (skat. 1.1.5. sadaļu) modulis, ΔS – šī objekta šķērsgriezuma laukums (2-99. att.).

Ja objekts O ir izotrops izkliedētājs, tad no tā reflektētais EMS radara R attālumā r tiek vienmērīgi sadalīts pa sfēru ar laukumu $4\pi r^2$, bet atbilstoši enerģijas saglabāšanās likumam pie starojuma izkļiedes tā enerģijas plūsma nemainās, proti,

$$\Delta\Phi_I = \Delta\Phi_S$$

$$W_I \Delta S = W_S 4\pi r^2$$

un radara R antenas laukuma vienība attālumā r no objekta O reģistrēs izkliedētā starojuma enerģijas plūsmu (jaudu)

$$\Delta\Phi_S = W_S \cdot 1 = \frac{W_I \Delta S}{4\pi r^2}$$

Pētāmais objekts O visdrīzāk nav izotrops izkliedētājs, bet atbilstoši (1.18.) $W_I \sim E_{I0}^2$ un $W_S \sim E_{S0}^2$, kur E_{I0} un E_{S0} – krītošā un reģistrētā (izkliedētā) EMS elektriskā vektora amplitūdas vērtības, tāpēc pēdējo sakarību var pārrakstīt formā

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{E_{S0}^2}{E_{I0}^2} \quad (2.29.)$$

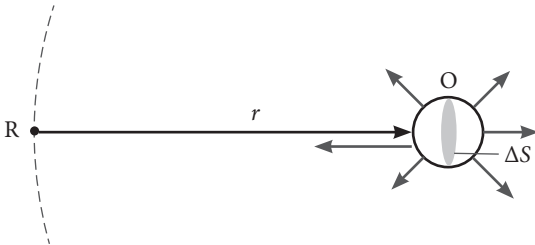
kur σ ir nevis objekta patiesais, bet gan efektīvais (jeb t. s. radara) šķērsgriezums, kas raksturo objekta EMS izkļiedes un refleksijas īpašības radara tālajā zonā. Citiem vārdiem, σ ir tāda EMS izotropa izkliedētāja šķērsgriezuma laukums, kas radara virzienā izkliedē tādu pašu EMS enerģijas plūsmu, kā reālais objekts O³⁵.

Nemot vērā atšķirīgās krītošā un reģistrētā signāla polarizācijas p un q , formulu (2.29.) var izmantot četrās atšķirīgās modifikācijās

$$\sigma_{pq} = 4\pi r^2 \frac{E_{S0p}^2}{E_{I0q}^2} \quad (2.30.)$$

kur pq pieņem attiecīgi vērtības HH, VV, HV un VH.

Izkļāstītais koncepts ir piemērojams izolētiem objektiem starojuma tālajā zonā, kuru izmēri ir mazāki par radara apstarotā laukuma izmēriem. Taču apstarotajā laukumā var



2-99. att. Objekta O efektīvā (radara) šķērsgriezuma skaidrojums.

³⁵ Uz radara apstaroto laukumu normēts objekta efektīvais (radara) šķērsgriezums $\sigma_0 = \sigma / \Delta S_K$ ir vienāds ar tā atpakaļizkļiedes koeficientu (1.121.) σ^0 .

atrasties vairāki šādi objekti, vai arī tas var noklāt tikai fragmentu no lielāka, relatīvi homogēna objekta (ko arī var reprezentēt kā vairāku līdzīgu objektu kopu). Šādā gadījumā [51] reālos radara mērījumus formē daudzu signālu superpozīcija, un tie ir uzskatāmi par gadījuma jeb stohastiskiem lielumiem. Tādēļ pēdējās formulas ir lietderīgi pielāgot arī šādiem gadījumiem formā

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{\langle E_{s0}^2 \rangle}{\langle E_{I0}^2 \rangle} \quad (2.31.)$$

$$\sigma_{pq} = 4\pi r^2 \frac{\langle E_{s0p}^2 \rangle}{\langle E_{I0q}^2 \rangle} \quad (2.32.)$$

kur ar $\langle \rangle$ apzīmēta matemātiskā cerība, kuras izmantošanu šeit dēvē par telpisko viduvējošanu.

2.6.5. Atpakaļizkliedes jeb Sinklēra matricas

Sakarības (2.31.) un (2.32.) ir atkarīgas tikai no izmantoto EMS komponentu amplitūdu vērtībām, bet nekādi neizmanto to fāžu informāciju. Tādēļ ap 1945. gadu G. Sinklērs [53, 54] piedāvāja lietot radaru starojuma analizē kompleksu atpakaļizkliedes matricu³⁶ konceptu, kas EMS mijiedarbību ar kādu objektu apraksta formā

$$\vec{E}_S = \underline{S} \vec{E}_I \quad (2.33.)$$

$$\begin{Bmatrix} E_{SH} \\ E_{SV} \end{Bmatrix} = \underline{S} \begin{Bmatrix} E_{IH} \\ E_{IV} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} E_{IH} \\ E_{IV} \end{Bmatrix} \quad (2.34.)$$

kur $\underline{S}$ tiek saukta par atpakaļizkliedes jeb Sinklēra matricu, un $\vec{E}_I$ un $\vec{E}_S$ – krītošā un izkļiedētā (reģistrētā) EMS elektriskā vektora vērtības. Formulas (2.33.) un (2.34.) izmantojamas gan EMS elektriskajam vektoram (tā kompleksā formā), gan arī krītošā un reflektētā starojuma Džonsa vektoriem. Ja radars R atrodas attālumā r no apstarojamā objekta O (skat. 2-99. att.), tad formula (2.33.) modificējama veidā

$$\vec{E}_S = \frac{e^{-ikr}}{r} \underline{S} \vec{E}_I \quad (2.35.)$$

kur reizinātājs (e^{-ikr}/r) reprezentē EMS enerģijas blīvuma samazināšanos (proporcionāli r^{-2}), kurai atbilst elektriskā vektora amplitūdas samazināšanās (proporcionāli r^{-1}), kā arī viļņa skaitlim k atbilstošas viļņa fāzes izmaiņas. Kompleksā matrica $\underline{S}$ savukārt reprezentē tikai EMS mijiedarbību (izkliedi un refleksiju) ar pētāmo objektu O.

Objekta efektīvie (radara) šķērsriezumi σ_{pq} ir saistīti ar Sinklēra atpakaļizkliedes matricas elementiem formā

$$\sigma_{pq} = 4\pi S_{pq}^2 \quad (2.36.)$$

Sinklēra matricas nereti tiek arī normētas, lai kvalitatīvi uzskatāmāk raksturotu polarizācijas veidu izmaiņas, kā arī tiek rēķināta to t. s. pilnā jauda, dēvēta par **span** funkciju

$$\text{span}(\underline{S}) = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 \quad (2.37.)$$

³⁶ Teorētiskajā kodolfizikā šo konceptu jau 1937. gadā izmantoja Džons Arčibalds Vīlers.

Izotropā vidē (kurā vairumā gadījumu darbojas tālzipētes radari) kādai noteiktai polarizācijai nav izteiktas orientācijas priekšrocības, tādēļ var uzskatīt, ka $S_{VH} = S_{HV}$ (šos Sinklēra matricas elementus sauc par šķērspolārajiem elementiem, atšķirībā no S_{HH} un S_{VV} , ko dēvē par kopolārajiem elementiem). Tādējādi Sinklēra atpakaļizkliedes matricas izotropā vidē ir atkarīgas tikai no trim neatkarīgiem lielumiem, ko nereti apvieno un izmanto 3D vektoru formā.

2.6.6. Izkliedes vektori un polarizācijas matricas

3D vektoru formēšanu, izmantojot Sinklēra matricas elementus, var veikt daudzus dažādos veidos. Taču to nevar darīt gluži patvaļīgi, jo jānodrošina lineārās algebras matemātisko kārtulu izmantošanas iespējas šādi izveidotajiem vektoriem. Tie jāsalāgo ar lineāro telpu bāzēm un tās formējošajām matricām un vektoriem. Neiedziļinoties šīs ne visai vienkāršās procedūras detaļās, ar kurām var iepazīties [51], minēsim divus populārākos un bieži izmantotos EMS t. s. izkliedes vektorus. Pirmais no tiem ir Pauli izkliedes vektors

$$\underline{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{Bmatrix} \quad (2.38.)$$

kas izveidots, balstoties uz kvantu mehānikā bieži lietotajām Pauli bāzes matricām. Otrais ir t. s. leksikogrāfiskais izkliedes vektors

$$\underline{\omega} = \begin{Bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{Bmatrix} \quad (2.39.)$$

kas izveidots, izmantojot t. s. leksikogrāfisko bāzes matricu sistēmu. Ja zināmi izkliedes vektori, nav grūti aprēķināt arī atbilstošās Sinklēra atpakaļizkliedes matricas un to elementus

$$\underline{S} = \begin{Bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega_1 & \frac{1}{\sqrt{2}}\omega_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\omega_2 & \omega_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} k_1 + k_2 & k_3 \\ k_3 & k_1 - k_2 \end{Bmatrix} \quad (2.40.)$$

Izmantojot izkliedes vektorus $\underline{k}$ un $\underline{\omega}$, tiek formētas t. s. polarizācijas matricas, proti, koherences matrica

$$\underline{T} = \langle \underline{k} \cdot \underline{k}^{*T} \rangle \quad (2.41.)$$

un kovariācijas matrica

$$\underline{C} = \langle \underline{\omega} \cdot \underline{\omega}^{*T} \rangle \quad (2.42.)$$

kur ar $*$ apzīmēta atbilstošo vektoru kompleksā saistība, ar T – stabiņvektoru transpozīcija. Nav grūti ievērot, ka polarizācijas matricas tiek formētas līdzīgi, kā matemātiskajā statistiskā aprēķina korelāciju matricas.

Koherences matricu $\underline{T}$ un kovariācijas matricu $\underline{C}$ plaši izmanto SAR attēlu interpretācijā un analizē. Ievērojot (2.38.) un (2.39.), kovariācijas matricu var uzrakstīt formā

$$\underline{C} = \begin{Bmatrix} \langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & 2 \langle S_{HV} S_{HV}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle \end{Bmatrix} \quad (2.43.)$$

Līdzīgā veidā kā Sinklēra atpakaļizkliedes matricas elementu funkciju, var izteikt arī koherences matricu $\underline{T}$.

2.6.7. Atpakaļizkliedes fizikālā modelēšana

Vienu no tālīzpētes radaru EMS atpakaļizkliedes fizikālās modelēšanas pamatiem [47] veido Frenela formulas (1.78.)–(1.81.) un to lietojumi relatīvi vienkāršām (t. s. kanoniskajām) ģeometriskām struktūrām: plaknei, sfērai, divplakņu un trīsplakņu kaktiem un lineāram elementam (sauktam par dipolu). Šie modeļi ir rūpīgi izstrādāti, un, tos kombinējot, var veidot komplicētākus fizikālos modeļus, par kādiem runājām 2.4.8. sadaļā. Īsumā iepazīsimies ar šīs modelēšanas galvenajiem rezultātiem [55] un tos raksturojošiem lielumiem.

- Izkliede no gludām un viegli līdz vidēji raupjām virsmām. Ar šāda veidi izkliedi bieži jāsastopas, modelējot EMS mijiedarbību ar Zemes virsmu.

Šajā gadījumā ar fizikas likumiem var pierādīt, ka atpakaļizkliedes (Sinklēra) matrica ir modelējama formā

$$\underline{S}^{(s)} = \begin{Bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_P \end{Bmatrix} \quad (2.44.)$$

kur saskaņā ar Frenela formulām (1.78.)–(1.81.), kā arī (1.82.) un (1.66.)

$$R_S = \frac{\cos \beta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}{\cos \beta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}$$

$$R_P = \frac{(\varepsilon - 1)(\sin^2 \beta - \varepsilon(1 + \sin^2 \beta))}{\left(\varepsilon \cos \beta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}\right)^2}$$

šeit β – starojuma krišanas leņķis, ε – virsmas relatīvā dielektriskā caurlaidība.

Izmantojot koherences un kovariances matricu definīcijas (2.41.)–(2.43.), var viegli iegūt, ka

$$\underline{T}^{(s)} = f_T^{(s)} \begin{Bmatrix} b_T^2 & b_T & 0 \\ b_T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.45.)$$

kur

$$f_T^{(s)} = |R_S - R_P|^2, \quad b_T = \frac{R_S + R_P}{R_S - R_P}$$

savukārt

$$\underline{C}^{(s)} = f_C^{(s)} \begin{Bmatrix} b_C^2 & 0 & b_C \\ 0 & 0 & 0 \\ b_C^* & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.46.)$$

kur

$$f_C^{(s)} = R_P^2, \quad b_C = \frac{R_S}{R_P}$$

Nav grūti aprēķināt arī šim gadījumam atbilstošo Pauli un leksikogrāfisko izkļiedes vektoru (2.38.), (2.39.)

$$\underline{k}^{(s)} = \begin{Bmatrix} R_S + R_P \\ R_S - R_P \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \underline{\omega}^{(s)} = \begin{Bmatrix} R_S \\ 0 \\ R_P \end{Bmatrix}$$

- Izkļiede no divplakņu kaktu struktūrām. Ar šāda veida izkļiedi nākas sastapties, modelējot EMS mijiedarbību ar ēku sienām urbanizētās vidēs (dažādi orientētu divplakņu kaktu struktūras) vai arī koku stumbru un Zemes virsmas struktūru mijiedarbību ar EMS (vienveidīgi orientētu divplakņu kaktu struktūras).

Otrajā (vienkāršākajā) no minētajiem gadījumiem var pierādīt, ka atpakaļizkļiedes (Sinklēra) matrica ir modelējama formā

$$\underline{S}^{(d)} = \begin{Bmatrix} R_{SS}R_{ST} & 0 \\ 0 & -R_{PS}R_{PT} \end{Bmatrix} \quad (2.47.)$$

savukārt koeficienti R_{SS} , R_{ST} , R_{PS} un R_{PT} aprēķināmi, līdzīgi kā iepriekš, izmantojot Frenela formulas (1.78.)–(1.81.). Šajā gadījumā koherences matrica būs

$$\underline{T}^{(d)} = f_T^{(d)} \begin{Bmatrix} a_T^2 & -a_T & 0 \\ -a_T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.48.)$$

kur

$$a_T = \frac{R_{SS}R_{ST} - R_{PS}R_{PT}}{R_{SS}R_{ST} + R_{PS}R_{PT}}, \quad f_T^{(d)} = |R_{SS}R_{ST} + R_{PS}R_{PT}|^2$$

savukārt kovariances matrica

$$\underline{C}^{(d)} = f_C^{(d)} \begin{Bmatrix} a_C^2 & 0 & a_C \\ 0 & 0 & 0 \\ a_C^* & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.49.)$$

kur a_C un $f_C^{(d)}$ arī atkarīgi no R_{SS} , R_{ST} , R_{PS} , R_{PT} teorētiski aprēķināmajām vērtībām. Nav grūti aprēķināt arī šim gadījumam atbilstošos Pauli un leksikogrāfisko izkļiedes vektoru (2.38.), (2.39.)

$$\underline{k}^{(s)} = \begin{Bmatrix} R_{SS}R_{ST} - R_{PS}R_{PT} \\ R_{SS}R_{ST} + R_{PS}R_{PT} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \underline{\omega}^{(s)} = \begin{Bmatrix} R_{SS}R_{ST} \\ 0 \\ -R_{PS}R_{PT} \end{Bmatrix}$$

- Telpiskā izkļiede, ar ko nākas sastapties, modelējot EMS mijiedarbību ar veģetācijas lapotni, kā arī daudzos citos tālīzpētes gadījumos. Šī modelēšana nedaudz atšķiras no iepriekš apskatītajiem gadījumiem, un tās realizācijai analizē EMS izkļiedi uz t. s. kanoniskajām dipolu struktūrām.

Šajā gadījumā var pierādīt, ka atpakaļizkliedes (Sinklēra) matrica ir modelējama formā

$$\underline{S}^{(v)} = m \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.50.)$$

kur $t. s.$ amplitūda m ir modelējama un atkarīga no telpiski izkliedējošās vides fizikālajām un ģeometriskajām īpašībām. Šajā gadījumā koherences matrica būs vienāda ar

$$\underline{T}^{(v)} = f_T^{(v)} \begin{Bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.51.)$$

savukārt kovariances matrica

$$\underline{C}^{(v)} = f_C^{(v)} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.52.)$$

kur $f_T^{(v)}$ un $f_C^{(v)}$ ir atkarīgi no Sinklēra matricas amplitūdas m . Nav grūti aprēķināt arī šim gadījumam atbilstošo Pauli un leksikogrāfisko izkliedes vektoru (2.38.), (2.39.)

$$\underline{k}^{(s)} = \begin{Bmatrix} m \\ m \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \underline{\omega}^{(s)} = \begin{Bmatrix} m \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Līdzīgā veidā var modelēt arī citus (vienkāršākus vai sarežģītākus) EMS atpakaļizkliedes gadījumus.

2.6.8. Polarizācijas matricu dekompozīcija

Koherences un kovariances matricās ir informācija par visiem atstarotājiem, kas atrodas radara apstarotajā laukumā, kam piemērota telpiskās vidējošanas operācija. Lai identificētu un atšķirtu šos atstarotājus, radarattēlu jācenšas sadalīt komponentēs ar atšķirīgām fizikālajām vai matemātiskajām īpašībām. Dažādu atšķirīgu komponentu īpatsvars attēlā un to specifisko parametru vērtības ļauj secināt par atstarojošās virsmas objektu fizikālajām (faktūras) un ģeometriskajām (tekstūras) īpašībām. Šo procesu SAR polarimetrijā sauc par polarizācijas matricu dekompozīciju, un faktiski tas ir analizējamo radarattēlu interpretācijas galvenais instruments. Dekompozīcijas algoritmi ir iedalāmi divās lielās grupās: (a) algoritmi, kas izmanto atpakaļizkliedes fizikālos modeļus, un (b) formāli matemātiski algoritmi apvienojumā ar empīrisku likumsakarību izmantošanu.

Kā piemēru dekompozīcijas algoritmam, kas izmanto 2.6.7. sadaļā apskatītos atpakaļizkliedes fizikālos modeļus, iepazīsimies ar Frīmana-Durdēna metodi [56], ko bieži izmanto ar veģetāciju klātu Zemes apgabalu analizē. Frīmana-Durdēna metode balstās pieņēmumā, ka ar veģetāciju klātos apgabalos dominējošo EMS izkliedi nodrošina 2.4.8. un 2.6.7. sadaļā analizētie izkliedes veidi, t. i.,

- izkliede no viegli un vidēji raupjām virsmām (Zemes virsmas);

- izkliede no divplakņu kaktu struktūrām (koku stumbri);
- telpiskā izkliede (lapotne).

Šis pieņēmums ļauj izteikt no mērījumiem aprēķinātās (t. i., novērotās un telpiski vidējotās) radarattēla kovariācijas $\langle \underline{C} \rangle$ un koherences $\langle \underline{T} \rangle$ matricas formās

$$\langle \underline{C} \rangle = f_C^{(s)} \begin{Bmatrix} b_C^2 & 0 & b_C \\ 0 & 0 & 0 \\ b_C^* & 0 & 1 \end{Bmatrix} + f_C^{(d)} \begin{Bmatrix} a_C^2 & 0 & a_C \\ 0 & 0 & 0 \\ a_C^* & 0 & 1 \end{Bmatrix} + f_C^{(v)} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.53.)$$

$$\langle \underline{T} \rangle = f_T^{(s)} \begin{Bmatrix} b_T^2 & b_T & 0 \\ b_T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} + f_T^{(d)} \begin{Bmatrix} a_T^2 & -a_T & 0 \\ -a_T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} + f_T^{(v)} \begin{Bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (2.54.)$$

kas atbilst fizikālajiem modeļiem (2.44.)–(2.52.). Matricu vienādojumus (2.53.) un (2.54.) var pārveidot par skalāru vienādojumu sistēmu attiecībā pret nezināmajiem svaru koeficientiem $f_X^{(y)}$ un parametriem a_C, a_T, b_C, b_T . To aprēķināšana ne vienmēr ir vienkārša, jo nezināmo skaits ir lielāks par vienādojumu skaitu. Taču ar regularizācijas metodēm un piesaistot papildinformāciju, to iespējams paveikt un tādējādi sadalīt radarattēlu trīs atšķirīgiem izkļedes procesiem atbilstošās komponentēs (2-100. att.).

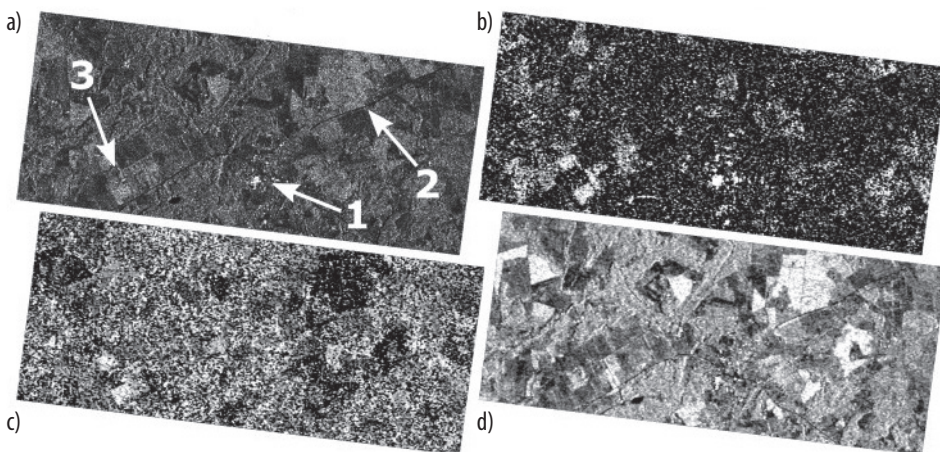
2-100. att. redzams SAR attēla Frimana-Durdēna dekompozīcijas rezultāts formā

$$P_s = f_C^{(s)} (1 + |b_C|^2)$$

$$P_d = f_C^{(d)} (1 + |a_C|^2)$$

$$P_v = f_C^{(v)}$$

kur ar P_i apzīmētas radarattēla fizikālo komponentu t. s. jaudas. Sektorā (a) redzams sākotnējais HH kanāla attēls, sektorā (b) – t. s. dubultā izkliede P_d (jeb izkliede no divplakņu



2-100. att. SAR attēls un tā fizikāli modelētās komponentes (*Radarsat-2*).

kaktu struktūrām), sektorā (c) – virsmas izkliede P_s , sektorā (d) – telpiskā izkliede P_v . Ar cipariem apzīmētas šādas teritorijas: (1) – ciems, (2) – mežs, (3) – labības lauki. Ciems labi saskatāms dubultās izklijes komponentē, mežs – telpiskās izklijes komponentē, savukārt labības lauki identificējami visās attēla komponentēs atkarībā no audzētās kultūras šķirnes un veģetācijas attīstības posma.

Kā piemēru dekompozīcijas algoritmam ar formāli matemātisku pieeju apvienojumā ar empīrisku likumsakarību izmantošanu apskatīsim t. s. “ $H/A/\alpha$ ” metodi. Mūsu rīcībā ir no mērījumiem aprēķinātās (t. i., novērotās un telpiski vidējotās) radarattēla kovariances $\langle C \rangle$ un koherences $\langle T \rangle$ matricas, tāpēc, izmantojot kādu lineārās algebras metodi, var noteikt šo matricu (piemēram, koherences matricas $\langle T \rangle$) īpašvērtības $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (sakārtotas dilstošā kārtībā) un atbilstošos īpašvektorus. Jau šādā gadījumā radarattēlu iespējams sadalīt trīs ortogonālās komponentēs, ko var analizēt un interpretēt. Taču minētā pieeja ne vienmēr izrādās pietiekami produktīva, tādēļ “ $H/A/\alpha$ ” metodē tiek aprēķinātas īpašvērtību λ_i varbūtības

$$p_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^3 \lambda_j, \quad \sum_{j=1}^3 p_j = 1$$

un no tām atkarīgais t. s. **alfa leņķis**

$$\alpha = \frac{\pi}{2} (p_2 + p_3) \quad (2.55.)$$

Empīriski ir zināms, ka, ja

- $\alpha \approx 0^\circ$ – radarattēlā dominē izkliede no zemes virsmas;
- $\alpha \approx 45^\circ$ – attēlā dominē telpiskā izkliede;
- $\alpha \approx 90^\circ$ – attēlā dominē divplakņu kaktu tipa izkliede.

Īpašvērtību varbūtības ļauj aprēķināt arī katra attēla pikseļa t. s. entropiju atbilstoši formulai

$$H = \sum_{j=1}^3 p_j \log_3 p_j \quad (2.56.)$$

kas raksturo informācijas daudzumu analizējamajā pikselī, proti, palielinoties H , samazinās iespēja identificēt noteiktu izklijes veidu. Ja $H=1$, atstarotais signāls uzskatāms par pilnīgi nejaušu refleksijas vērtību. Taču, ja ir aprēķināti α un H parametri, tad lieto t. s. “ H/α ” klasifikācijas diagrammas (2-101. att.), kas ļauj identificēt un klasificēt deviņus atšķirīgus atpakaļizklijes veidus un tiem atbilstošās virsmas [57].

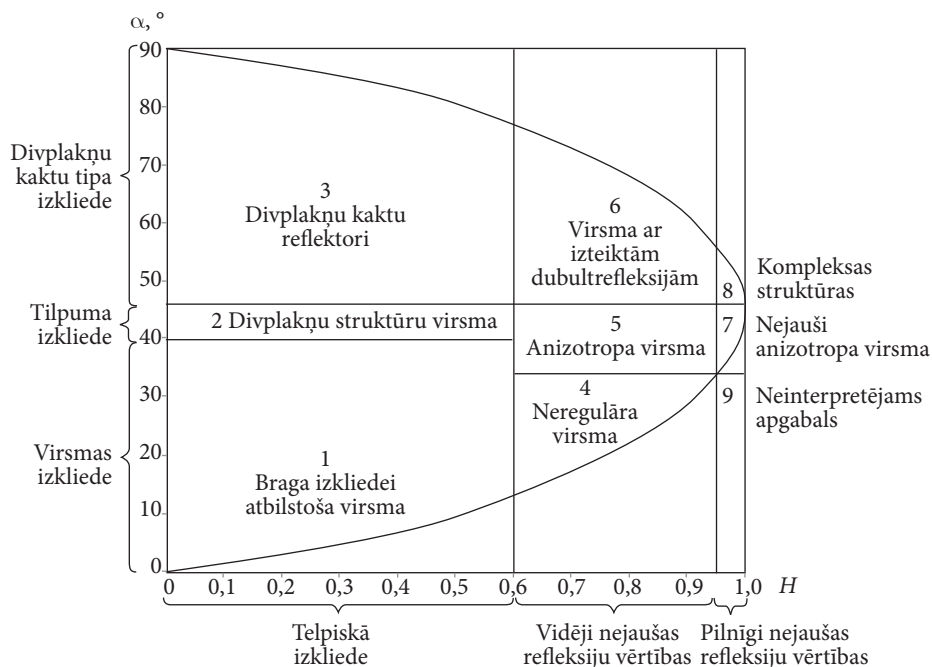
Visbeidzot, var aprēķināt arī t. s. izklijes anizotropiju

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.57.)$$

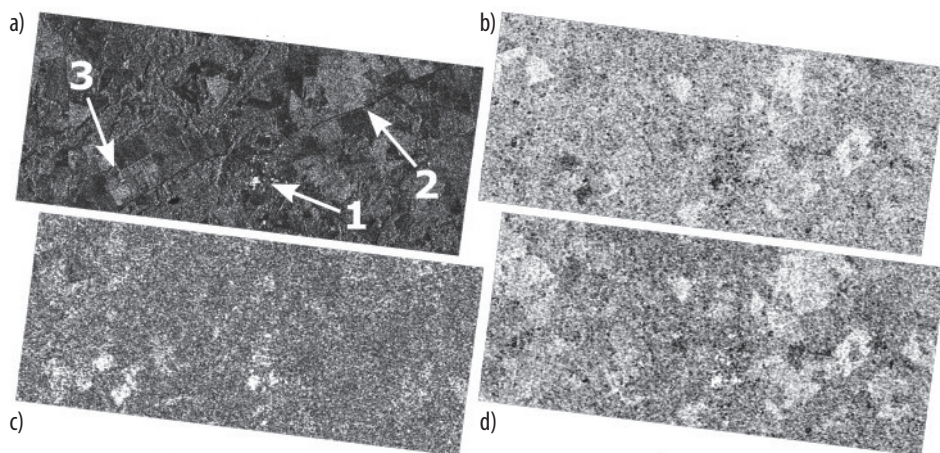
kas sniedz papildu informāciju par izklijes veidiem un objektiem radarattēlos gadījumos, kad $H > 0,7$. Ja aprēķināti visi trīs empīriskie parametri α , H un A , tad arī sākotnējo SAR attēlu var sadalīt tiem atbilstošās komponentēs (apakšattēlos), kā tas redzams 2-102. att.

2-102. att. redzams SAR attēla dekompozīcijas rezultāts, izmantojot “ $H/A/\alpha$ ” metodi. Sektorā (a) redzams sākotnējais HH kanāla attēls, sektorā (b) – entropijas H vērtību attēls, sektorā (c) – anizotropijas A vērtību attēls, sektorā (d) – alfa leņķa vērtību attēls. Ar cipariem apzīmētas šādas teritorijas: (1) – ciems, (2) – mežs, (3) – labības lauki. Ciems ir tumšs entropijas attēlā, mežs tajā ir ievērojami gaišāks. Alfa leņķa attēlā ciems ir ļoti gaišs, norādot uz divplakņu kaktu tipa izklijē no tā ēkām.

Apskatītās divas polarizācijas matricu dekompozīcijas metodes ne tuvu nav vienīgās. Tās tikai sniedz priekšstatu par tiem fizikālajiem un matemātiskajiem pamatiem, uz kuriem balstās liels daudzveidīgu dekompozīcijas algoritmu klāsts. Vēl jāatzīmē, ka SAR attēlus bieži analizē dažādu sintezēto krāsu formās. Radarattēli, protams, nav krāsaini, un tos nevar reprezentēt t. s. dabīgajās krāsās, jo tajos izmantotajiem EMS viļņu garumiem nav nekādas atbilstības cilvēku redzes orgānu krāsu uztveres diapazoniem. Taču radarattēlu sadalīšana trīs komponentēs (kā to bieži dara) ļauj katrai no tām piekārtot kādu no RGB krāsu komponentēm un šādi iegūt attēlus sintezētajās krāsās. Tas ļauj arī radarattēlu analīzei sekmīgi izmantot signālapstrādes metožu digitālo attēlu krāsu apstrādes tehnoloģijas.



2-101. att. Atpakaļizkliedes klasifikācijas "H/α" diagramma [57].



2-102. att. SAR attēls un tā empīriski modelētās komponentes (Radarsat-2).

2.7. SAR interferometrija (InSAR) (15. lekcija)

2.7.1. Kopsavilkums

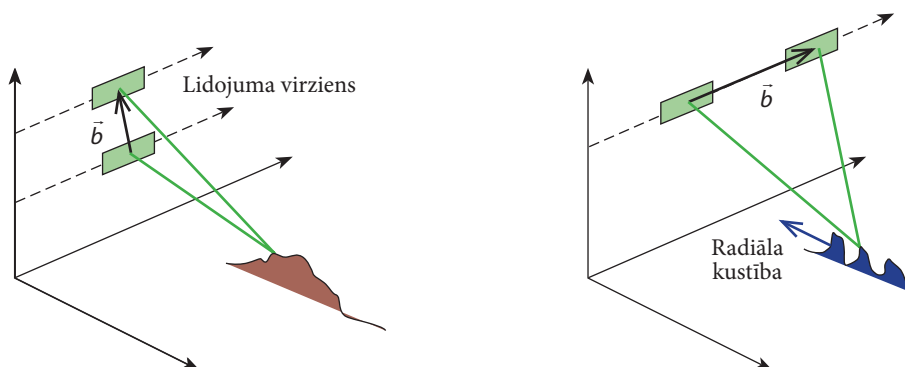
Iepazīsimies ar SAR interferogrammu iegūšanas pamatprincipiem un to aprēķināšanas ģeometriskajiem aspektiem, kā arī topogrāfiskās virsmas (vertikālā reljefa) noteikšanas metodēm, tostarp diferenciālo SAR interferometriju (DInSAR). Analizēsim SAR interferometrijas galvenās sistematiskās un gadījuma kļūdas, kā arī dažādu cēloņu radīto koherences samazināšanos. Nobeigumā pārskats par svarīgāko koherenci ietekmējošo korelācijas koeficientu matemātisko modelēšanu.

2.7.2. Ievads SAR interferometrijā

SAR interferometrija ir komplicētu tehnoloģiju kopums, un mēs iepazīsimies tikai ar to pamatidejām. Plašākā nozīmē ar tām saprot divu vai vairāku SAR attēlu kopīgu apstrādi, lai iegūtu vairāk informācijas par pētāmo planētas (Zemes) virsmas apgabalu. Šādā gadījumā izmantojamajos SAR attēlos vismaz vienam parametram jābūt atšķirīgam (satelīta trajektorijai, reģistrācijas laikam, izmantotajai nesējfrekvencei u. c.), kas arī nosaka izmantojamo InSAR tehnoloģiju. Šaurākā nozīmē ar InSAR saprot divu SAR attēlu izmantošanu stereoskopisku (t. i., 3D) radarattēlu iegūšanai. Šādā gadījumā izmantotās idejas ir līdzīgas fotogrammetriskajām (skat. 3.7. nodaļu), taču lietojamas efektīvāk, t. i., nevis tikai speciāli izvēlētiem atbalsta punktiem, bet katram radarattēla pikselim, jo, reģistrējot koherentu radara signālu, tiek reģistrēta gan tā amplitūda, gan fāze. Tādējādi, lai gan atsevišķos radarattēlos nevar atdalīt objektu patieso horizontālo izvietojumu no šķietamajām horizontālajām nobīdēm, ko izraisa vertikālās (reljefa) nobīdes, divu un vairāku SAR attēlu kopīgas apstrādes rezultātā to izdarīt var.

SAR interferometrijas tehnoloģijas reāli sāka izmantot 20. gadsimta 80. gados [64] (t. s. “Zvaigžņu karu” pētniecības programmās), lai gan to teorētiskie pamati [65, 66] bija izstrādāti jau 70. gados.

Arī divu SAR attēlu izmantošanas gadījumos iespējami dažādi antenu izvietojuma ģeometriskie kompozīciju varianti (2-103. att.), kad radaru antenas atšķirīgi izvietotas attiecī-

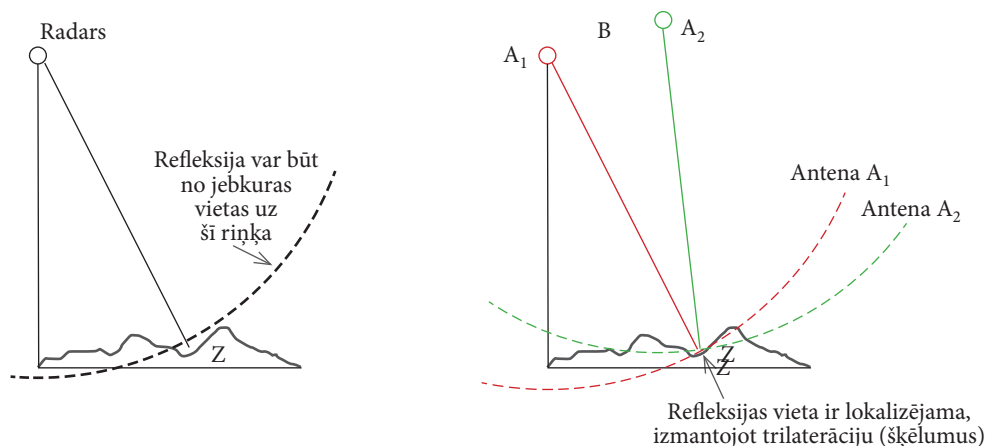


2-103. att. Dažādas SAR interferometru ģeometriskās kompozīcijas [69].

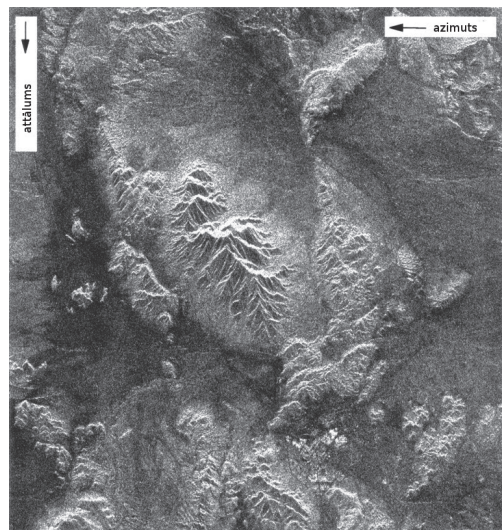
bā pret satelīta trajektoriju (transversais izvietojums, longitudinālais izvietojums vai arī patvaļīgs izvietojums). Turklāt SAR attēlus var iegūt arī no vienas un tās pašas telpiskās pozīcijas topogrāfisko izmaiņu detektēšanai (DInSAR tehnoloģijas). Antenu izvietojuma ģeometriskā kompozīcija tiek variēta, gan strādājot ar vienu satelītu, kas aprīkots ar divām antenām, gan izmantojot divus SAR satelītus tuvās orbītās, gan arī ar vienu satelītu dažādos tā orbītas vijumos.

2.7.3. Interferogrammu iegūšana (aprēķināšana)

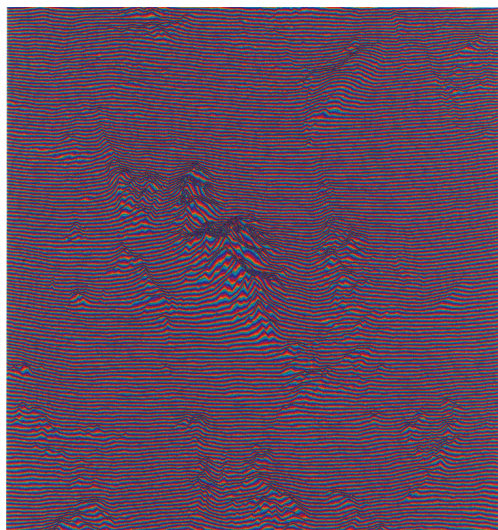
Ja ir pieejami SAR attēli no divām antenām A_1 (*master*) un A_2 (*slave*), kas atrodas attālumos r_M un r_S no objekta Z , tad tā telpisko lokalizāciju var noteikt, šķēlot atbilstošos riņķa līniju lokus (2-104. att.).



2-104. att. Objektu lokalizācijas iespējas ar vienu un divām radara antenām.



2-105. att. SAR attēls ar komplikētu topogrāfiju (vertikālo reljefu) [62].



2-106. att. Iepriekšējā SAR attēla interferogramma [62].

Satelītā A_1 reģistrētā objekta Z (kas atrodas loku krustpunktā) reflektētā signāla vērtība būs

$$a_M = a_1 \exp(i\varphi_1) \exp(2ikr_M)$$

satelītā A_2 līdzīgi

$$a_S = a_2 \exp(i\varphi_2) \exp(2ikr_S)$$

Objekts Z ir viens un tas pats abos gadījumos, un antenas A_1 un A_2 atrodas tuvu viena otrai, tāpēc var uzskatīt, ka $a_1 = a_2 = a$, $\varphi_1 = \varphi_2$, $r_M = r$, bet $r_S = r + \Delta r$. Šeit φ_1 un φ_2 ir sākuma fāzes, kuru vērtības nosaka EMS mijiedarbība ar objektu Z . Līdzīgi spriest var ne tikai par objektu Z , bet arī par citiem ar antenām A_1 un A_2 iegūto SAR attēlu pikseļiem. Pareizinoz antenas A_1 attēlu ar antenas A_2 attēla kompleksi saistīto attēlu³⁷ katram pikselim, iegūstam

$$a_M a_S^* = |a|^2 \exp(2ik\Delta r)$$

kur $k = 2\pi/\lambda$ – viļņu skaitlis, ar $*$ apzīmēta kompleksās saistības operācija. Ja attālumu starpība Δr mainās par lielumu $\lambda/2$, tad izteiksmes trigonometriskais arguments mainās par

$$2 \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2} = 2\pi$$

un aprēķinātā signāla $a_M a_S^*$ vērtība atkārtojas, t. i., veidojas interferometriskās joslas, ko var kodēt ar krāsām vai radiometriskās intensitātes (pelēkā līmeņa) vērtībām. No tā veidojas metodes nosaukums, proti, SAR interferometrija jeb InSAR. Ilustrācijai apskatīsim SAR attēlu (2-105. att.) un tam atbilstošo interferogrammu (2-106. att.), kas iegūta no diviem SAR attēliem, izmantojot apskatīto attēlu reizināšanas (interferogrammu aprēķināšanas) tehnoloģiju.

2.7.4. InSAR ģeometriskie aspekti

Ja signālus raida abas antenas un katra uztver tikai savus raidītos signālus, tad tajās reģistrēto signālu fāžu starpība $\Delta\varphi$ būs

$$\Delta\varphi = 2k\Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

kur Δr – attālumu starpība starp objektu un antenām.

Ja signālus raida tikai viena (t. s. *master*) antena, bet reflektētos signālus uztver abas antenas, tad viegli pārliecināties, ka

$$\Delta\varphi = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$$

Tālāk apskatām 2-107. att.

Lietojam plaknes kosinusu teorēmu $\triangle A_1^{(M)} A_2^{(S)} Z$ formā

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \alpha\right)$$

kur attālumu starp antenām B sauc par interferometra bāzi. Tuvināti (atverot iekavas un atmetot Δr^2 un B^2 kā mazus lielumus) nonākam pie

³⁷ Šeit reizināšana digitālo attēlu nozīmē, t. i., pa pikseļiem, nevis matricu reizināšana.

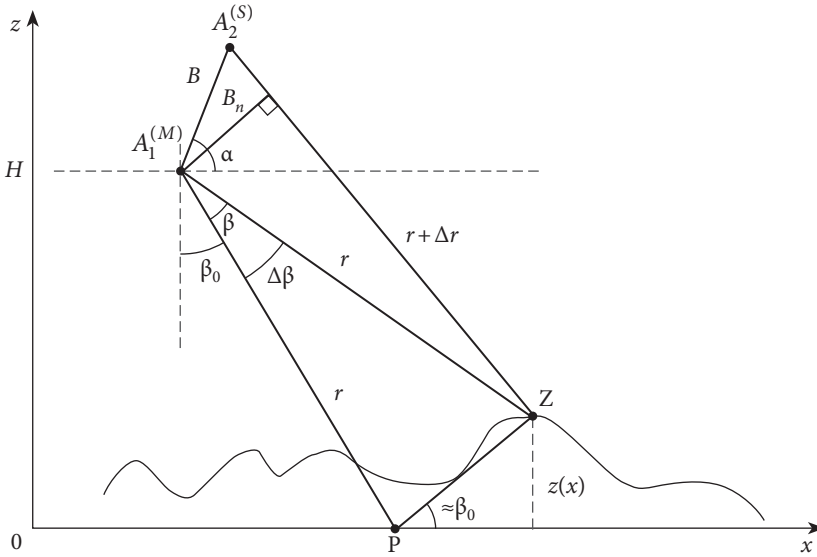
$$\Delta r \cong -B \sin(\beta - \alpha)$$

un

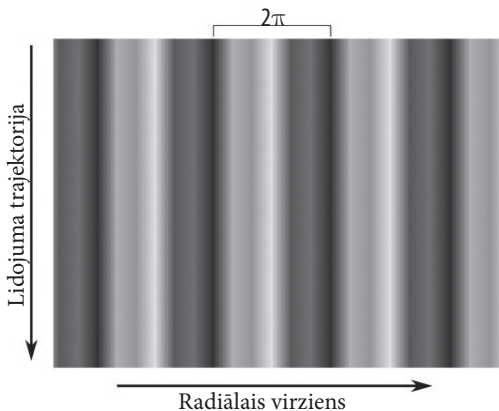
$$\Delta \varphi \cong -\frac{2\pi}{\lambda} B \sin(\beta - \alpha)$$

jeb fāzu nobīde $\Delta \varphi$ ir proporcionāla interferometra bāzei B (izmantotas formulas gadījumam, kad signālus raida tikai viena antena). Savukārt (izvirzot Teilora rindā)

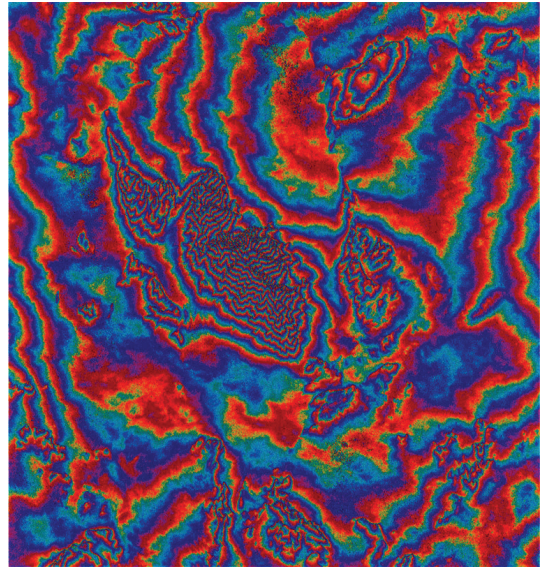
$$\sin(\beta - \alpha) = \sin(\beta_0 + \Delta\beta - \alpha) \cong \sin(\beta_0 - \alpha) + \cos(\beta_0 - \alpha)\Delta\beta$$



2-107. att. InSAR tehnoloģijas ģeometriskie aspekti.



2-108. att. Gludas referencvirsmas interferometriskās joslas.



2-109. att. Topogrāfiskā interferogramma, kas atbilst 2-105. att. un 2-106. att. [62].

un

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} B \sin(\beta_0 - \alpha) - \frac{2\pi}{\lambda} B \cos(\beta_0 - \alpha) \Delta\beta$$

kur β_0 – EMS krišanas leņķis attiecībā pret atbalsta virsmu jeb referencvirsmu (ko 2-107. att. reprezentē x ass).

Pirmais saskaitāmais pēdējā formulā apraksta fāžu nobīdi, kas veidojas attiecībā pret gludu referencvirsmu, bet otrais saskaitāmais – fāžu nobīdi, ko formē vertikālais reljefs. Pirmajam saskaitāmajam ir regulāru interferences joslu forma (2-108. att.), ko ir viegli aprēķināt un atskaitīt no sākotnēji iegūtās interferogrammas.

Šādi nonāk pie t. s. topogrāfiskajām interferogrammām, ko apraksta pēdējās formulas otrais saskaitāmais

$$\Delta\varphi_{\text{topo}} = -\frac{2\pi}{\lambda} B \cos(\beta_0 - \alpha) \Delta\beta$$

un kas atbilst lokālajam virsmas reljefam (2-109. att.).

2.7.5. Vertikālā reljefa noteikšana

2-107. att. redzams, ka virsmas vertikālo reljefu $z(x)$ iespējams aprēķināt ar formulu

$$z = H - r \cos \beta$$

kurā leņķa β noteikšanai izmantojamas sakarības

$$\Delta r \cong -B \sin(\beta - \alpha)$$

un

$$\Delta r = \frac{1}{k} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$$

no kurām

$$\sin(\beta - \alpha) = -\frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi B}$$

jeb

$$\beta = \alpha - \arcsin \frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi B}$$

Izmantojot šīs formulas un fāzes “atšķetināšanas” algoritmu (skat. turpmāk), veikta 2-110. att. redzamā vulkāna Etna (Sicīlijā) topogrāfijas (vertikālā reljefa) rekonstrukcija pēc topogrāfiskās interferogrammas, kas iegūta ar apskatītajām InSAR tehnoloģijām.

Visbeidzot, tuvināti

$$z(x) \cong PZ \sin \beta_0 \cong (r \Delta\beta) \sin \beta_0$$

Topogrāfiskā fāze $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ mainās par 2π pie nosacījuma $\Delta\beta = \Delta\beta_a$, kur $\Delta\beta_a$ – atkārtotamības leņķis.

$$2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} B \cos(\beta_0 - \alpha) \Delta\beta_a$$

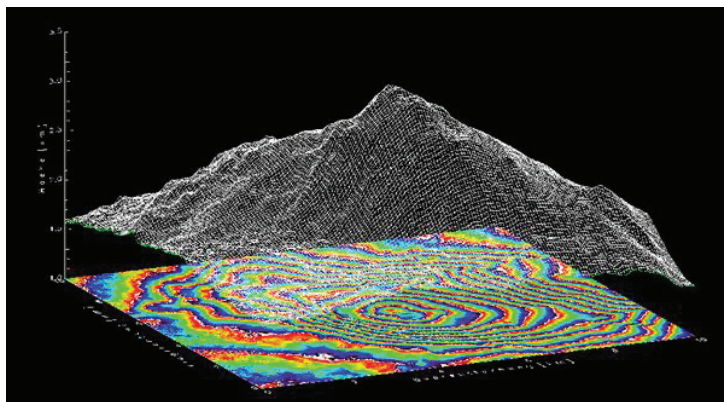
kur no pēdējās (tuvinātās) formulas izriet

$$\Delta\beta_a = \frac{h_a}{r \sin \beta_0}$$

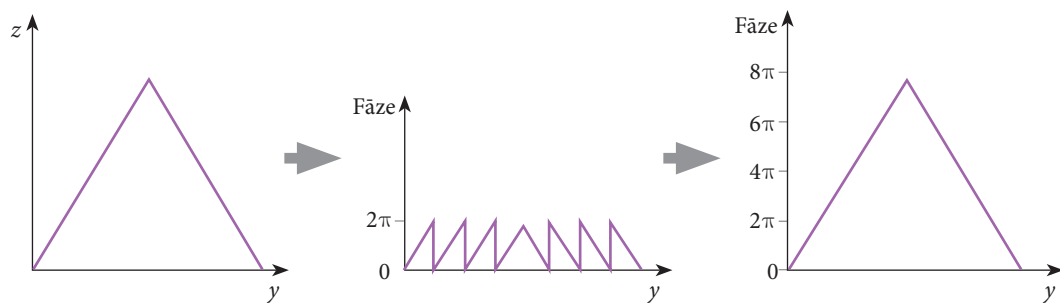
Apvienojot pēdējās divas formulas,

$$h_a = \frac{\lambda r \sin \beta_0}{B \cos(\beta_0 - \alpha)}$$

t. i., interferometriskā aina atkārtojas, reljefa augstumam $z(x)$ izmainoties par lielumu h_a (nenoteiktības augstumu). Lai aprēķinātu patiesās reljefa augstuma izmaiņas, jāveic t. s. fāzes “atšķetināšana” (skat. 2-111. att.), ko ir iespējams sekmīgi īstenot. Detaļās neiedziļināsimies, jo šis algoritms ir labi zināms un pat iestrādāts *MATLAB* funkcijās. 2-111. att. kreisajā pusē attēlots vienkāršots reālais reljefs, vidū – topogrāfiskās interferogrammas fāzes vērtības, labajā pusē – “atšķetinātās” fāzes vērtības, kas atbilst reālajam reljefam. Tehnisko parametru rūpīgāka analīze rāda, ka reālā reljefa augstuma aprēķināšanas precizitāte, izmantojot InSAR tehnoloģijas, ir ar lieluma kārtu ~ 1 m.



2-110. att. Vulkāna Etna vertikālais reljefs pēc SAR interferogrammas.

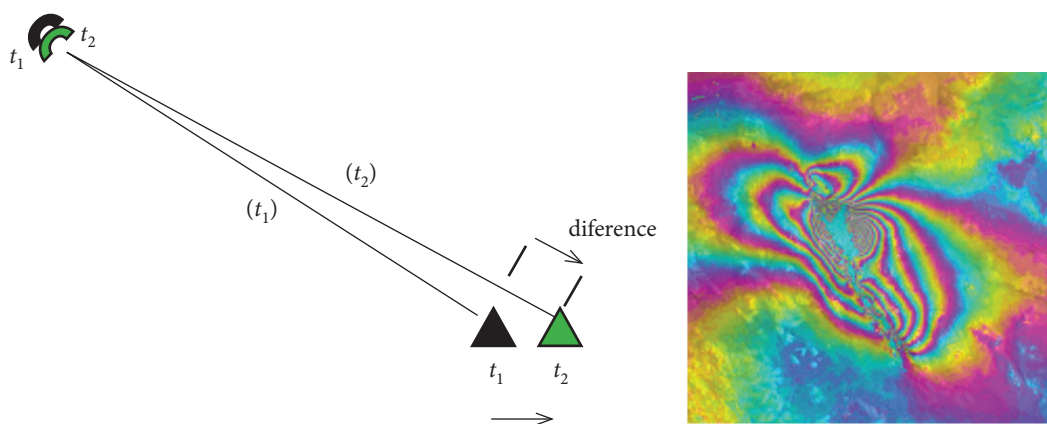


2-111. att. Fāzes “atšķetināšanas” shematiskais skaidrojums.

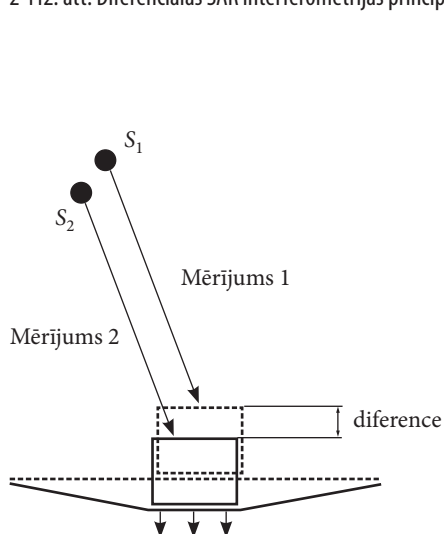
2.7.6. Diferenciālā SAR interferometrija (DInSAR)

Ja pētāmā apgabala topogrāfija (augstuma reljefs) ir noteikta, tad, protams, var sekot arī tās izmaiņām laikā, taču tās iespējams nomērīt arī tieši, izmantojot diferenciālās SAR interferometrijas DInSAR tehnoloģijas. Ja no vienas un tās pašas telpiskās pozīcijas iegūti divi identiski SAR attēli, tad pikseļu vērtību fāžu nobīdes visur būs vienādas ar nulli un interferogramma neveidosies. Taču, ja laikā starp attēlu ieguves momentiem notikušas reālas augstuma (vai horizontālā) reljefa izmaiņas, veidosies interferogramma, kas raksturo šīs topogrāfiskās izmaiņas (2-112. att.).

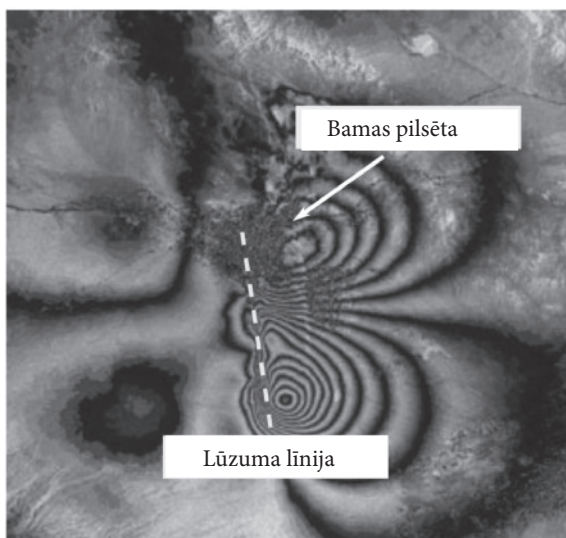
Iegūt attēlus no identiskas telpiskās pozīcijas praktiski nav iespējams, savukārt DInSAR tehnoloģijas ir viegli modificējamās gadījumiem, kad antenu pozīcijas nedaudz atšķiras (2-113. att.). DInSAR tehnoloģijas realizē centimetru līmeņa vertikālo precizitāti un tādejādi ievērojami pārsniedz citām InSAR realizācijām raksturīgo precizitāti (tipiski līdz 1 m).



2-112. att. Diferenciālās SAR interferometrijas princips.



2-113. att. DInSAR princips, mērot no dažādām telpiskajām pozīcijām.



2-114. att. Zemesrīces epicentra diferenciālā interferogramma.

2003. gadā Bamas pilsētā, Irānā, notika ļoti spēcīga zemestrīce, kas gandrīz pilnībā iznīcināja pilsētu. 2-114. att. redzama diferenciālā interferogramma, kas uzrāda vismaz vienu tektonisko lūzumu. Interferogramma iegūta no diviem SAR attēliem: viena, kas uzņemts pirms zemestrīces, un otra – pēc tās.

Diferenciālās interferogrammas plaši lieto arī vulkānisko aktivitāšu dabas katastrofu monitoringam, kā arī ledāju dinamikas pētījumiem polārajos apgabalos. Šajos gadījumos nereti ir svarīgi atdalīt pētāmās virsmas izmaiņu vertikālās un horizontālās komponentes. To nav iespējams izdarīt, kopīgi apstrādājot tikai divus SAR attēlus, taču ir izstrādātas metodes arī horizontālo izmaiņu detektēšanai pēc trim un vairāk SAR attēliem.

2.7.7. Sistemātiskās un gadījuma kļūdas

Pilnā fāžu nobīde InSAR signālā, kā to jau redzējām, veidojas kā dažādu komponentu summa

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{plakne}} + \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{nobide}} + \Delta\varphi_{\text{atmosf}} + \Delta\varphi_{\text{sist}} + \dots$$

no kurām būtiskākās ir šādas:

- $\Delta\varphi_{\text{plakne}}$ – nobīde, ko formē plakana atbalsta virsma (referencvirsma);
- $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ – nobīde, ko formē virsmas topogrāfija (augstuma reljefs);
- $\Delta\varphi_{\text{nobide}}$ – nobīde, ko formē virsmas topogrāfijas izmaiņas (DInSAR);
- $\Delta\varphi_{\text{atmosf}}$ – nobīde, ko formē atmosfēras (troposfēras un jonosfēras) mijiedarbība ar radara EMS;
- $\Delta\varphi_{\text{sist}}$ – citu sistemātisko kļūdu summa, ko izraisa neprecizitātes datu ieguvē un apstrādē.

Šīs sistemātiskās kļūdas (nobīdes) ir iespējami precīzi jāmodelē, lai, piemēram, atmosfēras un EMS mijiedarbības efektus kļūdaini neinterpretētu kā topogrāfijas izmaiņas vai kā citādi.

Taču InSAR mērījumus ietekmē ne tikai sistemātiskās, bet arī gadījuma (stohastiskās) kļūdas. To ietekme visuzskatāmāk izpaužas kā izmantoto SAR attēlu šķērskorelācijas (dēvētas par koherenci) samazināšanās. Ja tā tuvojas nullei, tad interferences aina izzūd, attēlus sauc par nekoherentiem un InSAR lietojumiem tie vairs nav derīgi. Šķērskorelācijas (koherences) koeficientus InSAR lietojumos definē sakarība

$$\gamma_{\text{total}} = \frac{|\langle s_1 s_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}}$$

kur $0 \leq \gamma_{\text{total}} \leq 1$, ar $\langle \rangle$ apzīmēta vidējās vērtības aprēķināšanas operācija, ar $*$ – kompleksās saistības operācija, atbilstošo attēlu fragmentu s_1 un s_2 reizināšana tiek veikta pa pikseļiem, nevis matricu reizināšanas nozīmē. Attēlu fragmentu s_1 un s_2 parasti izvēlas, izmantojot digitālo attēlu apstrādes telpiskā formālisma maskas (skat. 3.1. nodaļu). Tās nedrīkst izvēlēties pārāk mazas, jo tad korelācijas (koherences) koeficienta γ_{total} novērtējums būs neprecīzs, īpaši mazo korelācijas koeficienta vērtību apgabalā, kā tas redzams 2-115. att. Šeit pie grafikiem uzrādīts pikseļu skaits zem izmantotās maskas (proti, attēlu fragmentu izmēri pikseļos), kas izmantoti korelācijas koeficientu aprēķināšanai. Jāpatur prātā, ka koherences novērtējums, izmantojot pēdējo formulu, vienmēr ir “optimistiskāks”, nekā tas ir īstenībā.

InSAR attēlu pilnais šķērskorelācijas (koherences) koeficients raksturo izmantoto attēlu koherences pakāpi, t. i., šo attēlu statistisko piemērotību interferometriskās informācijas iegūšanai (aprēķināšanai), kā arī tās reflektējošās virsmas īpašības, kas ietekmē attēlu koherenci.

Pilnais šķērskorelācijas koeficients ir izsakāms kā dažādu, attēlu koherenci samazinošu faktoru reizinājums.

$$\gamma_{\text{total}} = \gamma_{\text{therm}} \gamma_{\text{spat}} \gamma_{\text{temp}} \gamma_{\text{dif}} \dots$$

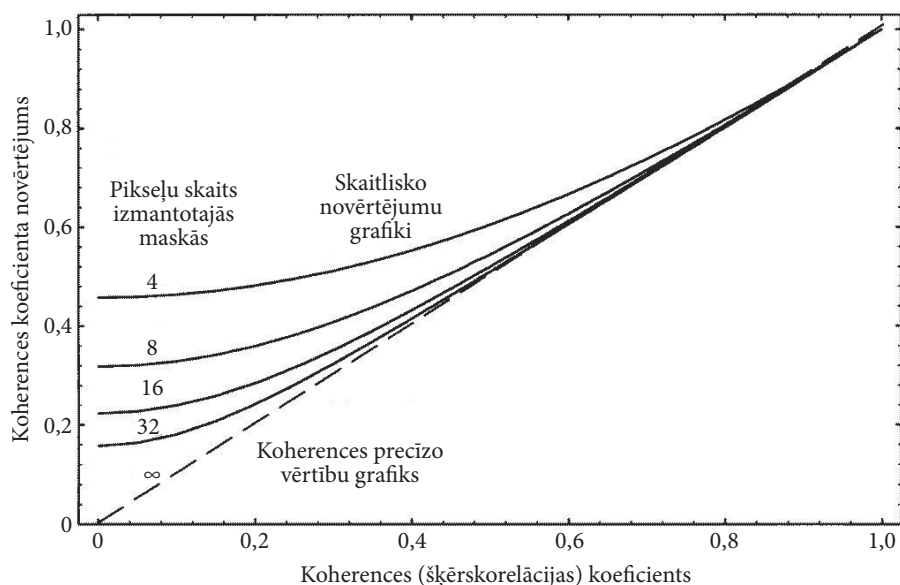
no kuriem būtiskākie ir šādi:

- γ_{therm} – signālus reģistrējošo elektronisko sistēmu termisko trokšņu dekorelatīvā ietekme (termiskā dekorelācija);
- γ_{spat} – interferometra ģeometrisku parametru dekorelatīvā ietekme, kas atkarīga no tā bāzes B garuma (telpiskā dekorelācija);
- γ_{temp} – signālus reflektējošās virsmas nestacionaritātes dekorelatīvā ietekme (refleksijas no kustīgiem objektiem – lapotnes, ūdenstilpju viļņiem u. c.) (temporālā dekorelācija).

Ar γ_{dif} šeit apzīmēts citu koherenci samazinošu faktoru ietekmes parametru reizinājums, kas ietver gan:

- γ_{vol} – tilpuma dekorelāciju, kas saistīta ar EMS iespīšanas vidē un mijiedarbību ar to dažādos dziļuma slāņos;
- γ_{dop} – Doplera efekta dekorelējošo ietekmi uz reģistrētajiem signāliem (SAR attēliem),

gan γ_{rot} (t. s. rotācijas dekorelāciju) un γ_{proc} (signālapstrādes algoritmu ietekmi uz koherenci), gan arī citu dekorelējošu faktoru ietekmi raksturojošus koeficientus. Visus šos daļējos korelācijas koeficientus arī ir iespējami precīzi jāmodelē, lai atdalītu dažādu faktoru dekorelējošo ietekmi un tos pareizi interpretētu. Piemēram, veģetācijas pētījumiem



2-115. att. Šķērskorelācijas (koherences) koeficienta novērtējuma nobīdes [62].

būtisku informāciju satur γ_{temp} (tas raksturo lapotni un tās kustību), tādēļ no reģistrētā pilnā korelācijas koeficienta γ_{total} jāatdala telpiskais γ_{spat} un termiskais γ_{therm} , kā arī citas multiplikatīvās komponentes, lai iespējami precīzi noteiktu šajā gadījumā būtisko temporālās korelācijas koeficientu γ_{temp} . Bez pilnā korelācijas koeficienta un tā multiplikatīvajām komponentēm SAR attēlu interpretācijai nereti izmanto arī korelācijas koeficientus starp dažādām to polarizācijas matricu dekompozīcijas komponentēm.

2.7.8. Korelācijas (koherences) koeficientu modelēšana

Termiskās dekorelācijas modelēšana

Saskaņā ar [67, 68, 69] SAR signālus reģistrējošo elektronisko sistēmu termisko trokšņu dekorelatīvo ietekmi var modelēt formā

$$\gamma_{\text{therm}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}}$$

kur SNR^{38} – signāla/trokšņa attiecība (STA), kas raksturo sensora elektronisko sistēmu īpašības. Šis korelācijas koeficients ir ļoti atkarīgs no attēlu pikseļu intensitātes vērtībām (tādējādi tas ir atšķirīgs dažādiem attēla apgabaliem). Gaišos apgabalos $\gamma_{\text{therm}} \cong 1$, tumšos apgabalos $\gamma_{\text{therm}} \cong 0$.

Temporālās dekorelācijas modelēšana

Saskaņā ar [67, 68, 69] radara EMS reflektējošās virsmas nestacionaritātes dekorelatīvo ietekmi var modelēt formā

$$\gamma_{\text{temp}} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\sigma_x^2 \sin^2 \beta + \sigma_z^2 \cos^2 \beta \right) \right]$$

kur β – starojuma krišanas leņķis, λ – starojuma viļņa garums, σ_z^2 – nestacionaritātes dispersija vertikālā virzienā, σ_x^2 – nestacionaritātes dispersija radiālajā virzienā (t. i., horizontālajā virzienā, kas perpendikulārs satelīta trajektorijai). Matemātiskā modeļa precizitāti raksturo 2-116. att. grafiki.

Šāda veida nestacionaritātes raksturīgas vēja kustinātas veģetācijas lapotnei un zariem, kā arī viļņiem uz ūdenstilpju virsmām.

Telpiskās dekorelācijas modelēšana

Saskaņā ar [67, 68, 69] SAR interferometra ģeometrisku parametru dekorelatīvā ietekme horizontālai virsmai ir modelējama formā

$$\gamma_{\text{spat}} = 1 - \frac{2B\delta_r \cos^2 \beta}{\lambda r}$$

kur B – interferometra bāze, r – attālums līdz virsmai, δ_r – radiālā izšķirtspēja. Modeļa precizitāti raksturo 2-117. att.

Ja otrais saskaitāmais pēdējā formulā ≥ 1 , tad $\gamma_{\text{spat}} \leq 0$ un attēla koherence (kā arī tai

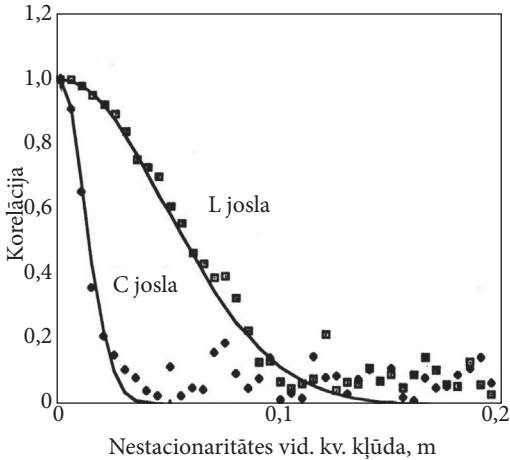
³⁸ SNR – Signal to Noise Relation.

atbilstošā interferences aina) izzūd. Šāda situācija veidojas, kad

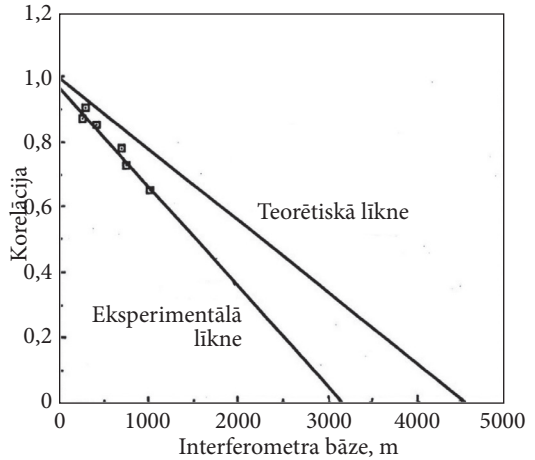
$$B > B_c = \frac{\lambda r}{2\delta r \cos^2 \beta}$$

kur B_c – t. s. kritiskā bāze, ko nedrīkst pārsniegt, lai neizjauktu koherenci. Saskaņā ar 2-117. att. interferometra bāze (attālums starp InSAR attēlu reģistrācijas telpiskajām pozīcijām) nedrīkst būt lielāka par dažiem kilometriem.

Līdzīgi modelē arī citas pilnā korelācijas (koherences) koeficienta γ_{total} multiplikatīvās komponentes ([67, 68, 69, 63] u. c.).



2-116. att. Temporālās dekorelācijas modeļa atbilstība mērījumu rezultātiem [62].



2-117. att. Telpiskās dekorelācijas modeļa atbilstība mērījumu rezultātiem [62].

3. daļa

Apstrādes un interpretācijas metodes

3.1. Telpiskais formālisms (16. lekcija)

3.1.1. Kopsavilkums

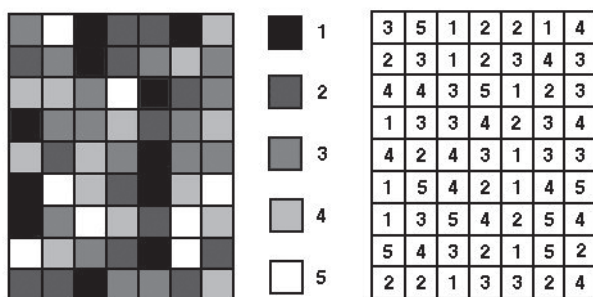
Satelītattēlu apstrādes galvenais instruments ir signālapstrādes metodes un tehnoloģijas. Tādēļ iepazīsimies ar digitālo attēlu apstrādes telpiskā formālisma svarīgākajām metodēm: punkta operācijām, tostarp histogrammu transformācijām un konvolūcijas jeb masķu operācijām. Lekcijas nobeigumā apskatīsim visbiežāk lietotos digitālo attēlu telpiskos filtrus.

3.1.2. Ievads satelītattēlu apstrādē

Satelītattēlu apstrāde tiek veikta, galvenokārt izmantojot klasiskās signālapstrādes tehnoloģijas un metodes. No signālapstrādes viedokļa satelītattēls, līdzīgi citiem digitālajiem attēliem, ir traktējams kā divu argumentu funkcija

$$z = f(x, y) \quad (3.1.)$$

kur x un y ir attēla atbilstošā pikseļa koordinātas (veseli skaitļi), z – šī pikseļa intensitāte jeb pelēkā vērtība (arī noapaļota līdz tuvākajam veselajam skaitlim). 3-1. att. redzams 63 pikseļu digitālais attēls ar pieciem intensitātes (pelēko vērtību) diskriminācijas līmeņiem. Šajā attēlā tā centrālajam pikselim ar koordinātām¹ $x=5$, $y=4$ atbilst intensitāte $z=3$.



3-1. att. Digitālā attēla piemērs ar pieciem intensitātes diskriminācijas līmeņiem.

- 1 Signālapstrādē digitālo attēlu pikseļu koordinātu sistēmas sākuma punkts tradicionāli tiek izraudzīts attēla kreisajā augšējā stūrī, koordinātu ass x tiek vērsta vertikāli lejup, savukārt koordinātu ass y – horizontāli pa labi.

Vēsturiski pirmie, kas izmantoja digitālos attēlus, bija avižnieki, kuri pagājušā gadsimta 20. gados izveidoja t. s. Bartlana sistēmu ar pieciem intensitātes diskriminācijas līmeņiem, attēlu pārraidei no Eiropas uz ASV izmantojot telegrāfu. Vēlāk šī sistēma tika pilnveidota 15 intensitātes līmeņu izmantošanai. Lai iegūtu attēlu, tika lietota fotoplate, ko eksponēja ar mainīga spožuma spuldzīti, kuru vadīja no telegrāfa aparāta iegūta perfolente (skat. 3-2. att.).

Tādējādi digitālie attēli ir izmantoti jau gandrīz no paša 20. gadsimta sākuma, bet sākotnēji tos neapstrādāja (izņemot dažas analoģo tehnoloģiju manipulācijas, piemēram, attēla detaļu pastiprināšana vai gaišuma izmaiņas), jo nebija pieejami datori. Tikai parādīties datoriem pagājušā gadsimta otrajā pusē, radās iespēja veikt daudzveidīgas manipulācijas ar digitālajiem attēliem, kas nodrošināja pilnvērtīgas digitālo attēlu apstrādes iespējas.

Sākoties datoru ērai, digitālo attēlu apstrādes tehnoloģijas kā vieni no pirmajiem veidoja speciālisti astronomisko un medicīnisko attēlu apstrādes jomās. Turklāt interese bija divējāda:

- transformēt attēlu efektīgākai vizuālai uztverei (lietotājs – cilvēks);
- transformēt attēlu ērtākai datora apstrādei (lietotājs – dators).

Pirmajā gadījumā attēla apstrādes rezultāts arī ir attēls, bet ar labākiem vizuālās uztveres rādītājiem. Piemēram, izplūdušu medicīnisko rentgena attēlu apstrāde, lai akcentētu tajos grūti saskatāmas, bet diagnostikai svarīgas detaļas. Otrajā gadījumā attēla apstrādes rezultāts ir t. s. atribūtu kopa, kas pielāgotai datorprogrammai ļauj pieņemt tādu vai citādu lēmumu. Piemēram, ielaist vai neielaist personu kādā militāra objekta zonā pēc personas pirkstu nospieduma attēla analīzes. Šis gadījums robežojas ar datorzinātņu jomu, ko dēvē par mākslīgo intelektu. Tālīzpētē izmanto abas pieejas, bet svarīgākā tomēr ir pirmā no tām, tādēļ tai turpmākajā izklāstā veltīsim galveno uzmanību.

Digitālo attēlu apstrādes metodes un tehnoloģijas, kurām ir kopīgi matemātiskie pamati, veido metožu grupas, kuras sauc par formālismiem. Lielākie un biežāk lietotie digitālo attēlu apstrādes formālismi ir šādi:

- telpiskais formālisms² (izmanto ar konvolūcijas operāciju saistītas metodes);
- spektrālais formālisms (izmanto Furjē spektrālās analīzes metodes);
- morfoloģiskais formālisms (izmanto matemātiskās kopu teorijas metodes).

Gan lietišķā matemātika, gan signālapstrādes tehnoloģijas strauji attīstās, un pēdējā lai-



3-2. att. Ģenerāļa Peršinga tikšanās ar maršalu Fošu, attēls pārraidīts pa telegrāfu 1929. gadā, izmantojot Bartlana sistēmu [22].

2 Viendimensionālu signālu apstrādes gadījumos to nereti dēvē arī par temporālo formālismu.

kā digitālo attēlu apstrādes jomās iezīmējas jaunas lielas līdzīgu metožu grupas, kas preten-
dē uz formālisma statusu. Tādas ir gan veivletu tehnoloģijas un metodes, gan arī fraktālās
tehnoloģijas un citas metodes, ko plaši izmanto digitālo attēlu kompresijas algoritmos un
citos svarīgos lietojumos.

Ja digitālo attēlu transformē efektīvākai vizuālai uztverei, tad šī procesa trīs būtiskās
komponentes ir:

- attēla restaurēšana jeb atjaunošana, ar ko saprot reģistrētā attēla radiometrisko (t. i.,
intensitātes) kropļojumu modelēšanu un šo kropļojumu novākšanu, lai restaurētu
attēlu tā sākotnējā formā;
- attēla uzlabošana³, ar ko saprot attēla skatāmības uzlabošanu, lai tajā būtu vieglāk
ieraudzīt vajadzīgo;
- attēla krāsu manipulācijas, lai reprezentētu attēlu gan dabīgajās, gan mākslīgajās
(sintezētajās) krāsās.

Pirmā no šī procesa komponentēm – attēla restaurēšana – ir objektīvs process, jo tā
veikšanai izmanto objektīvus un pamatotus radiometrisko kropļojumu matemātiskos mo-
delus. Savukārt otrā komponente jeb attēla uzlabošana ir ļoti subjektīvs process, jo attēla
skatāmības uzlabošana ir atkarīga no tā, ko lietotājs vēlas attēlā labāk saskatīt un kādi ir
attēla izmantošanas mērķi. Svarīgu vietu tālīzpētes digitālo attēlu apstrādē ieņem arī attēlu
segmentācijas, kā arī to interpretācijas un klasifikācijas metodes.

Digitālo attēlu tipiska apstrādes sistēma nav nekas cits kā pietiekami jaudīgs dators ar
ātru procesoru (digitālo attēlu apstrādes programmatūra bieži ir resursus tērējoša), lielu
atmiņu (attēli aizņem daudz vietas gan diskos, gan operatīvajā atmiņā), kvalitatīvu disple-
ju, specifisku profesionālu printeri, un, protams, datoram jābūt aprīkotam ar specializētu
(nereti dārgu) programmatūru. Atsevišķos gadījumos jāizmanto arī piemēroti skeneri at-
tēlu ievadīšanai datora atmiņā. Nekādas citas īpašas vai ļoti specifiskas tehniskas ierīces
digitālo attēlu apstrādē parasti neizmanto.

3.1.3. Telpiskā formālisma punkta operācijas

Par telpiskā formālisma punkta operācijām sauc tādas pikseļa intensitātes izmaiņas, kas
atkarīgas tikai no šī pikseļa sākotnējās intensitātes vērtības. Punkta operāciju matemātisko
modeļus var formulēt veidā

$$s = T(r) \quad (3.2.)$$

kur r – pikseļa intensitātes sākotnējā vērtība, s – pikseļa intensitātes transformētā (jaunā)
vērtība, funkciju $T(r)$ sauc par attēla transformācijas funkciju.

Attēla transformācijas funkcijām jābūt viennozīmīgām un monotonām sava argumen-
ta funkcijām, kā tas parādīts 3-3. att. digitālajam attēlam ar L intensitātes diskriminācijas
līmeņiem ($r = 0, 1, 2, \dots, L - 1$). Intensitātes vērtībai ($r = 0$) atbilst melnā, vērtībai ($r = L - 1$) –
baltā krāsa. 3-3. att. labajā pusē redzamā transformācijas funkcija pārveido melnbaltu (t. i.,
ar L intensitātes jeb pelēko līmeņu vērtībām) attēlu par bināru attēlu (ar tikai divām inten-
sitātes vērtībām – melno un balto).

Populāra un bieži lietota punkta operācija ir gamma transformācija [24], tās attēla

3 Angļu val. – *enhancement*.

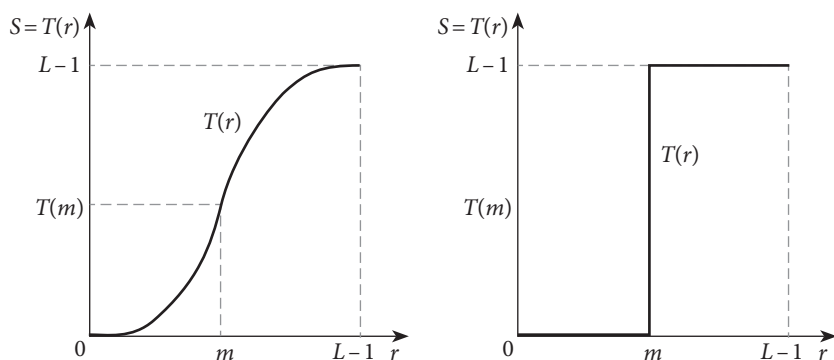
transformācijas funkcija ir uzrakstāma formā

$$s = T(r) = cr^\gamma \quad (3.3.)$$

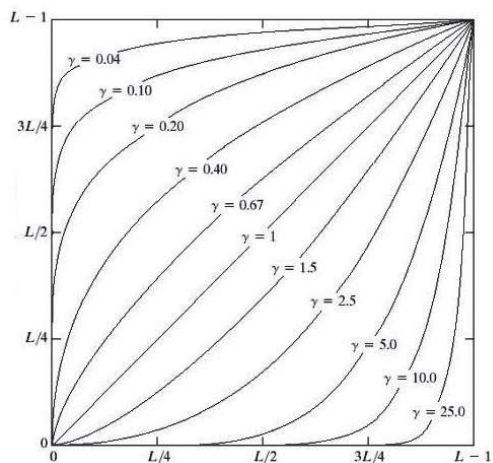
Gamma transformācija ļauj “izstiept” (vai “saspiest” – radiometriskā nozīmē) gan attēla tumšo, gan gaišo daļu. Tādēļ to izmanto (pie vērtībām $\gamma > 1$), lai attēlotu detaļas pārgaismotos attēlos.

Līdzīgā veidā ar gamma transformācijas palīdzību (pie vērtībām $\gamma < 1$) iespējams parādīt detaļas tumšos attēlos, kur tās grūti saskatāmas. Taču ir prasmīgi jāpiemeklē parametru γ un c pareizās vērtības. Ja parametru vērtības ir kļūdainas, tiek pazaudētas detaļas citos digitālā attēla apgabalos. Bieži izvēlas $c = 1$ un eksperimentāli piemeklē tikai optimālo parametru γ vērtību.⁴

Nereti izmanto lineāras vai gabaliem lineāras attēlu transformācijas funkcijas.



3-3. att. Attēla transformācijas funkcijas.



3-4. att. Gamma transformācijas grafiki dažādām γ vērtībām ($c = 1$) no [23].

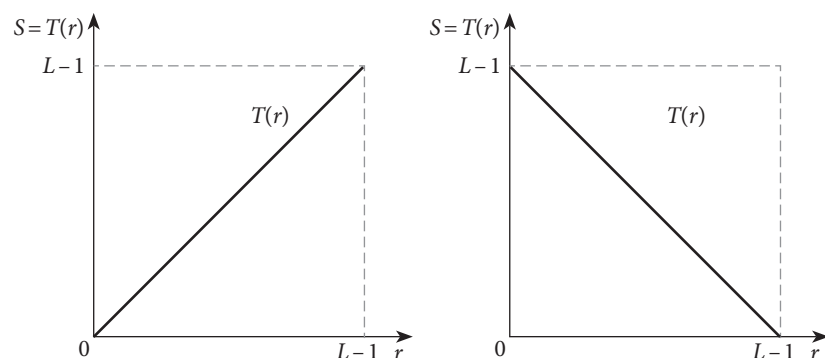
4 Bez gamma transformācijas lieto arī virkni citu nelineāru transformācijas funkciju, piemēram, logaritmisko transformāciju $s = \log(1 + r)$, sinusa transformāciju u. c.

3-6. att. kreisajā pusē redzama attēlu transformācijas funkcija, kas realizē identitātes transformāciju, t. i., to lietojot, digitālais attēls netiek izmainīts. Savukārt labajā pusē redzamā transformācijas funkcija digitālo attēlu pārvērš par tā negatīvu.

Interesantākas, ar vairāk iespējām un tādēļ biežāk lietotas ir attēlu transformācijas funkcijas, kas formē no gabaliem lineāriem fragmentiem. To populārākie veidi ir atkarīgi no četriem vai diviem parametriem.



3-5. att. Augšējā kreisā attēla gamma transformācijas ar γ vērtībām 3, 4 un 5 ($c=1$) no [23].

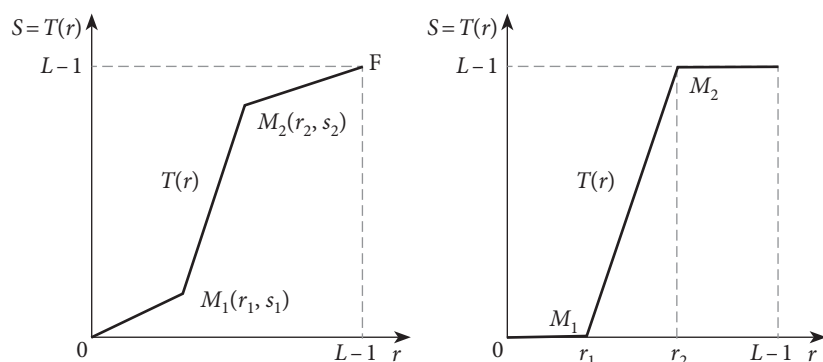


3-6. att. Identitātes transformācija $s = T(r) = r$ un negatīvu formējoša transformācijas funkcija $s = T(r) = (L-1) - r$.

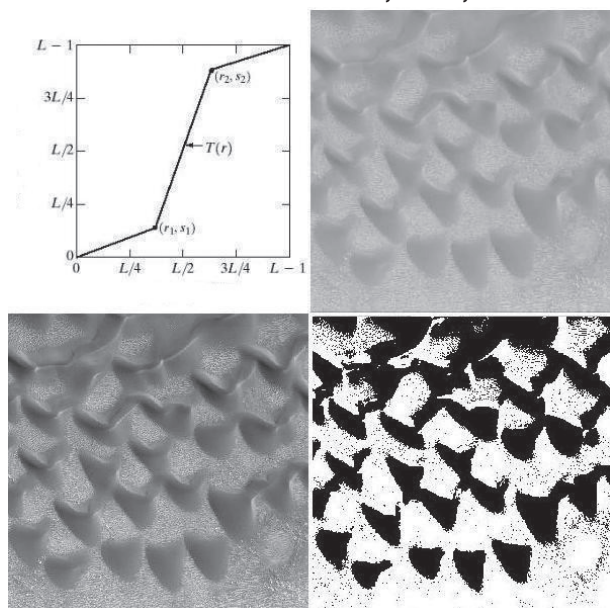
3-7. att. kreisajā pusē redzamā attēlu transformācijas funkcija ir atkarīga no četriem parametriem r_1 , r_2 , s_1 un s_2 . Taču, lai nodrošinātu transformācijas funkcijas viennozīmību un monotonitāti, jāizvēlas $r_1 \leq r_2$ un $s_1 \leq s_2$. Šīs funkcijas izmantošanu nedaudz apgrūtina samērā liels optimizējamo parametru skaits (četri), tādēļ nereti izmanto 3-7. att. labajā pusē redzamo transformācijas funkciju, kas atkarīga tikai no diviem parametriem r_1 un r_2 , turklāt to var uzskatīt par kreisās puses funkcijas speciālgadījumu. Praktiskās aplikācijās (datorprogrammās) punktus M_1 un M_2 , kas nosaka šo transformācijas funkciju parametrus, bieži var izvēlēties grafiski ar datorpeli.

3-7. att. redzamās attēlu transformācijas funkcijas ļauj “izstiept” (radiometriskā nozīmē) tieši to digitālā attēla intensitāšu (pelēko vērtību) apgabalu, kurā ir visvairāk informācijas.

3-8. att. augšējā labajā pusē redzams Marsa kāpu zonas (NASA) attēls, kam piemērota zīmējuma augšējā kreisajā pusē attēlotā “kontrasta izstiepšanas” transformācijas funkcija. Šādas digitālā attēla pārveides rezultāts redzams zīmējuma apakšējā kreisajā pusē.



3-7. att. Gabaliem lineāras attēlu transformācijas funkcijas.

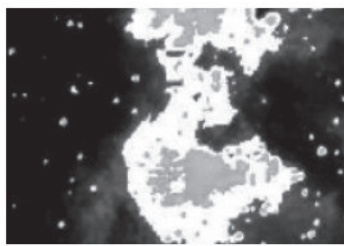
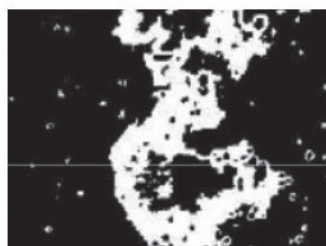
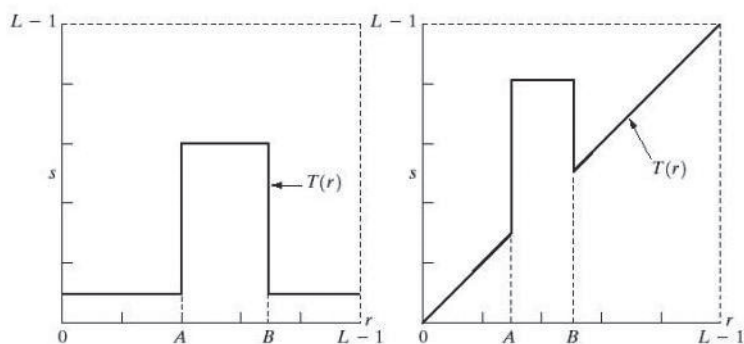


3-8. att. Marsa kāpu (NASA) attēla apstrāde ar gabaliem lineāru transformācijas funkciju.

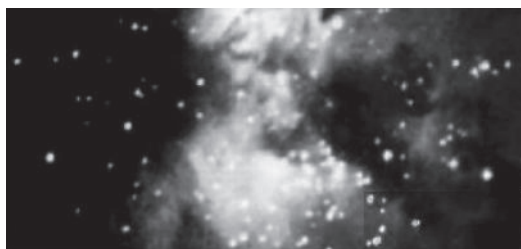
Savukārt zīmējuma apakšējā labajā pusē redzams kāpu zonas binārais attēls, ko iegūst, izmantojot sākotnējam attēlam (augšā pa labi) 3-3. att. labajā pusē redzamo transformācijas funkciju.

Cita veida gabaliem lineāras attēlu transformācijas funkcijas un to lietojums redzams 3-9. attēlā. Šāda veida transformāciju funkcijas izmanto t. s. šķēļu metodēs, kad jāatēlo tikai kāds izvēlēts attēla objekts (noteiktā intensitāšu intervālā) un pēc iespējas jāvājina vai jānovāc fona objektu klātbūtne attēlā. Šo pieeju izmanto, apstrādājot digitālos attēlus ar specifiskām datorprogrammām, kurām nepieciešamā rezultāta sasniegšanai var būt traucējoša fona objektu klātbūtne.

3-9. att. redzami divu šķēļu metodes transformācijas funkciju (attēla augšējā daļa) lietojuma rezultāti (attēla apakšējā daļa) astronomiskam (miglāja) digitālajam attēlam (3-10. att.). Kreisajā pusē miglājs redzams, nesaglabājot attēla fonu, labajā pusē – attēla fonu saglabājot.



3-9. att. Šķēļu metodes transformācijas funkcijas un to lietojums [78].



3-10. att. Šķēļu metodes ilustrācijai izmantotais attēls [78].

3.1.4. Histogrammu transformācijas

Par histogrammu pelēko līmeņu intensitāšu apgabalā $[0, L - 1]$ sauc diskrētu funkciju

$$n_k = h(r_k) \quad (3.4.)$$

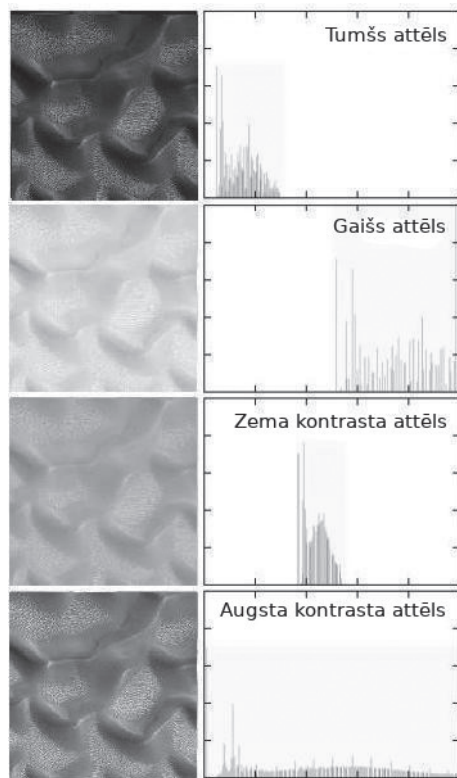
kur r_k – intensitātes līmenis, n_k – pikseļu skaits digitālajā attēlā ar intensitātes līmeni r_k . Histogrammas funkciju bieži normalizē formā

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (3.5.)$$

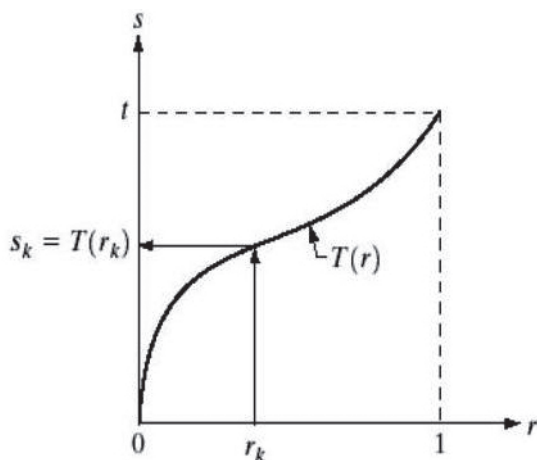
kur n – pilnais pikseļu skaits attēlā. Funkcija $p(r_k)$, ko sauc par normalizētu histogrammu, raksturo pelēkā līmeņa intensitātes r_k atkārtotšanās biežumu (varbūtību) attēlā. Kādā veidā attēla skatāmība ir atkarīga no tā histogrammas, var novērtēt, aplūkojot 3-11. att.

Vizuāli labi skatāmam attēlam ar labu kontrastu histogramma ir vairāk vai mazāk vienmērīgi sadalīta pa visu pelēko līmeņu intensitāšu apgabalu. Vizuāli ne tik labi skatāmiem attēliem tā aizņem tikai daļu (lielāku vai mazāku) no minētā intensitāšu apgabala. Tādējādi, ja slikti skatāmam attēlam tiktu izmantota transformācijas funkcija, kas izlīdzina histogrammu pa visu intensitāšu apgabalu, tiktu panākta ievērojama attēla skatāmības uzlabošana. Šajā sakarā nav grūti pierādīt, ka transformācijas funkcijas

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(x) dx \quad (3.6.)$$



3-11. att. Attēla skatāmības saistība ar tā histogrammu.



3-12. att. Tipiska histogrammu izlīdzinoša attēla transformācijas funkcija [23].

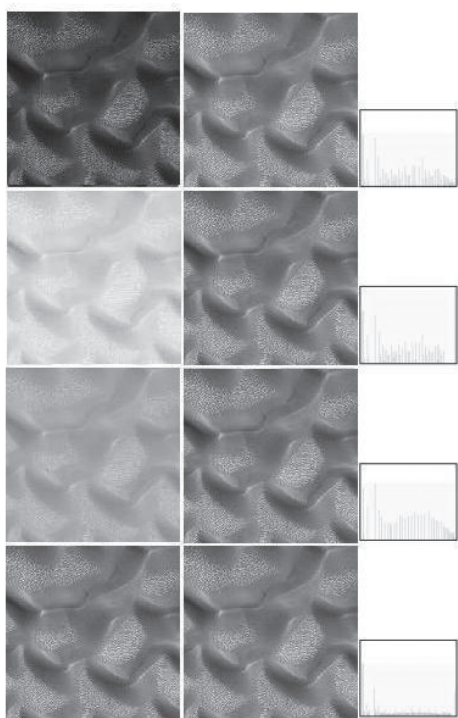
jeb diskrētajā tuvinājumā

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad (3.7.)$$

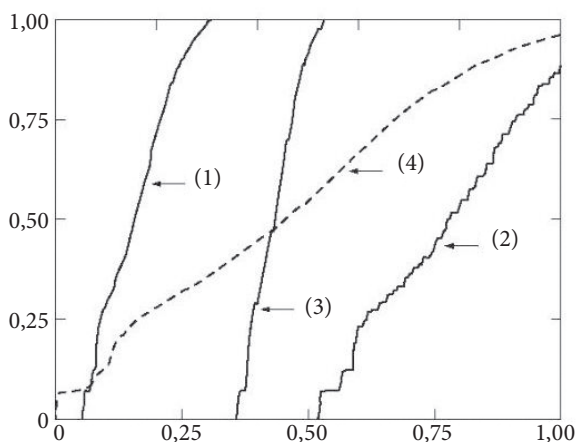
lietošana digitālajam attēlam izlīdzina tā histogrammu un efektīvi uzlabo attēla skatāmību. Funkcijas (3.6.) un (3.7.) atbilstoši to definīcijai ir gan viennozīmīgas, gan monotonas (3-12. att.) un tādējādi ir izmantojamas par digitālo attēlu transformācijas funkcijām.

Histogrammu izlīdzināšanas transformācija ir ļoti populāra arī tādēļ, ka tā ir viegli automatizējama, jo ar formulu (3.7.) definētais algoritms ir absolūti viennozīmīgs un nav nepieciešama nekāda papildu informācija par apstrādājamo attēlu. Tās lietošana, kā tas redzams 3-13. att., ievērojami uzlabo attēla skatāmību. Redzams, ka transformētajiem attēliem histogrammas ir vairāk vai mazāk vienmērīgi sadalītas pa izmantoto pelēko līmeņu intensitātes apgabalu. Lai arī sākotnēji izmantotie digitālie attēli bija visai dažādi (no to skatāmības viedokļa), iegūtie rezultāti ir praktiski identiski. Tas nozīmē, ka sākotnējos attēlos ir praktiski vienāds informācijas daudzums, tikai vizuāli to nav iespējams novērtēt. Histogrammu izlīdzināšanas transformācija šo informāciju vizualizē.

3-14. att. redzamas digitālo attēlu transformācijas funkcijas, kas aprēķinātas saskaņā ar formulu (3.7.) un izmantotas 3-13. att. redzamo attēlu skatāmības uzlabošanai. Ceturtajā gadījumā transformācijas funkcija ir gandrīz lineāra un daudz neatšķiras no identitātes transformācijas (skat. 3-6. att.), jo sākotnējais attēls jau bija ar vienmērīgu histogrammas sadalījumu (3-11. att.), tādēļ nebija vajadzības attēlu būtiski transformēt.



3-13. att. Histogrammas izlīdzināšanas transformācijas lietošanas piemēri Marsa kāpu (NASA) attēlam.



3-14. att. Izmantotās attēlu transformācijas funkcijas [23].

3.1.5. Konvolūcija un masku operācijas

Digitālā attēla pikseļa intensitātes vērtību var pārveidot, ņemot vērā arī tam blakus esošo pikseļu intensitātes vērtības. Šādu pieeju attēla transformācijām sauc par masku operācijām jeb telpiskajiem filtriem. Lai to realizētu, tiek veidotas t. s. maskas, kas arī ir nelieli specifiski digitālie attēli, ko var pārvietot pa sākotnējā digitālā attēla virsmu (3-15. att.).

Maskas parasti izvēlas ar nepāru pikseļu skaita malām, lai maskai būtu centrālais pikselis. Pārvietojot masku w pa attēlu f , pārveidojam tā attēla pikseļa intensitāti, kas atrodas zem maskas centrālā pikseļa, atbilstoši lineārai formulai

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (3.8.)$$

kur summēšana notiek pa visiem maskas w elementiem (pikseļiem). Šādi apstrādājot visus digitālā attēla $f(x, y)$ pikseļus⁵, tas tiek transformēts par attēlu $g(x, y)$. Matemātisko darbību (3.8.), kas realizē masku operācijas, sauc par konvolūciju. Attēla transformācijas, izmantojot masku operācijas, bieži pieraksta arī vienkāršotā veidā

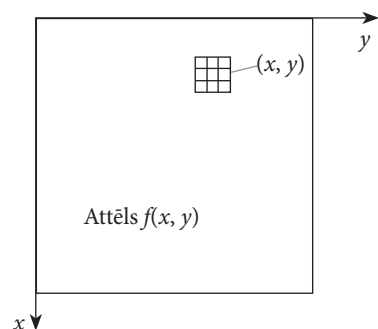
$$R = \sum_{i=1}^{mn} w_i z_i \quad (3.9.)$$

kur reizinājums mn raksturo maskas izmērus. Ļoti bieži $mn=9$, jo visbiežāk lieto 3×3 izmēra maskas⁶.

Relatīvi bieži lieto arī nelineāras masku operācijas, kas neizmanto konvolūcijas formulu (3.8.). Populārākā no nelineārajām masku operācijām ir mediānas transformācija. Tajā masku novieto uz attēla un sakārto visu zem maskas esošo attēla pikseļu intensitātes vērtības augošā secībā. Izvēlas tā pikseļa intensitātes vērtību, kas atrodas šīs secības vidējā pozīcijā, un piešķir šo vērtību attēla pikselim, kas atrodas zem maskas centrālā elementa (pikseļa). Nereti masku operācijām lieto arī citus nelineārus algoritmus.

3.1.6. Nogludinošie telpiskie filtri

Nogludinošo telpisko filtru (masku operāciju) pamatdoma ir aizstāt zem maskas esošā centrālā pikseļa intensitātes vērtību ar apkārtējo (zem maskas esošo) pikseļu intensitāšu



3-15. att. Digitālais attēls $f(x, y)$ un 3×3 pikseļu maska.

5 Problēmas rodas pie attēla malām, kur maska daļēji iziet ārpus tā robežām (korekti šādi transformēt iespējams tikai nedaudz samazinātu attēlu).

6 Iepriekš apskatītās punkta operācijas arī var traktēt kā masku operācijas ar 1×1 izmēra maskām.

vidējo (svērtu vai nesvērtu) vērtību jeb realizēt vienu no transformācijām

$$R = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} z_i, \quad R = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{mn} w_i z_i \quad (3.10.)$$

kur W ir t. s. maskas svars

$$W = \sum_{i=1}^{mn} w_i$$

Lineāros konvolūcijas algoritmus (3.10.) var īstenot ar 3-16. att. redzamajām maskām.

Svērtās nogludinošās maskas piešķir selektīvu nozīmi to pikseļu intensitāšu vērtībām, kas atrodas atšķirīgā attālumā no maskas centrālā pikseļa, savukārt nesvērtā maska visu zem tās atrodošos pikseļu vērtības izmanto līdzvērtīgi.

Nogludinošie telpiskie filtri samazina trokšņu ietekmi attēlos, izlīdzina krāsu plankumu malas, novāc sīkas detaļas (piemēram, grumbas portretos), jo nedaudz “izsmērē” attēlu un samazina tā asumu.

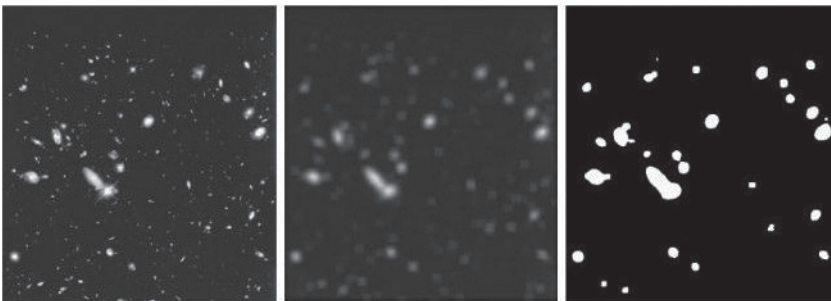
$\frac{1}{9} \times$	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1

$\frac{1}{16} \times$	1	2	1
	2	4	2
	1	2	1

3-16. att. Attēlu nogludinošās maskas (nesvērtā un svērtā).



3-17. att. Trokšņu samazināšana, izmantojot nogludinošus telpiskos filtrus.



3-18. att. Maskas veidošana, izmantojot astronomisku (NASA) digitālo attēlu [23].

3-17. att. kreisajā pusē redzams Pentagona satelītattēls ar lielu trokšņu komponenti (balte un melnie punkti). Veikta trokšņu ietekmes samazināšana, izmantojot konvolūciju ar 3-16. att. kreisajā pusē redzamo masku (3-17. att. labās puses attēls) un lietojot mediānas metodi (3-17. att. vidējais attēls). Redzams, ka nelineārā mediānas metode trokšņu ietekmes samazināšanai ir ievērojami efektīvāka par lineārajām masku operācijām.

Cits nogludinošo telpisko filtru izmantošanas piemērs redzams 3-18. att. Tā kreisajā pusē redzams ar Habla kosmisko teleskopu iegūts debess sektora fotoattēls, kurā ir gan zvaigznes (sīki objekti), gan galaktikas (lieli objekti). Lai turpmākai analīzei atdalītu zvaigznes no galaktikām, vispirms izpludina attēlu, izmantojot 15×15 pikseļu lielu masku, šādi iegūstot 3-18. att. vidējo attēlu. Tam piemēro punkta operāciju ar 3-3. att. labajā pusē redzamo transformācijas funkciju, t. i., formē bināro attēlu, kas redzams 3-18. att. labajā pusē. Šo attēlu tālāk izmanto kā bināro masku, lai kreisās puses attēlā izceltu tā lielos objektus – galaktikas. Invertējot 3-18. att. labās puses attēlu, lietojot punkta operāciju ar 3-6. att. labajā pusē redzamo transformācijas funkciju, iegūst 3-18. att. labās puses attēla negatīvu, ko var izmantot kā bināro masku, lai kreisās puses attēlā izceltu tā mazos objektus – zvaigznes.

3.1.7. Asumu pastiprinošie telpiskie filtri

Attēlu ar lielāku asumu var iegūt, atņemot no sākotnējā attēla $f(x, y)$ tā nogludinātu attēlu $\bar{f}(x, y)$. Šo paņēmieni zināja poligrāfisti jau 20. gadsimta 30. gados un izmantoja attēlu uzlabošanai analogā formā, kā $\bar{f}(x, y)$ izmantojot izfokusētu (izpludinātu) sākotnējo attēlu. Citiem vārdiem, attēla detaļas ir vairāk akcentētas attēlā

$$f_s(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y)$$

salīdzinot ar sākotnējo attēlu $f(x, y)$. Izmantojot šo konceptu, iespējams pierādīt, ka attēla asumu var pastiprināt arī ar konvolūcijas operāciju, t. i., lietojot specifiskas maskas, divas no kurām redzamas 3-19. att.

Šajā attēlā pirmais no kreisās ir Mēness digitālais attēls, kas apstrādāts, izmantojot konvolūciju ar zīmējumā attēlotajām maskām, un iegūti divi nākamie attēli ar labāk akcentētām sīkajām detaļām.

Masku operāciju ir daudz, un tās ir dažādas (gan lineāras, gan nelineāras). Noteiktā secībā lietojot digitālajam attēlam virkni masku un punkta operāciju, iespējams sasniegt ievērojamu attēla skatāmības uzlabojumu. Visuzskatāmāk tas parādāms, uzlabojot medicīniskos (vai industriālos) rentgena attēlus, kas sākotnēji ir ļoti neizteiksmīgi, jo rentgena starus praktiski nav iespējams fokusēt. Taču informācija šajos attēlos ir, un, prasmīgi rīkojoties, to iespējams sekmīgi vizualizēt (skat. piemēram 3-30. att.).



3-19. att. Asumu pastiprinošu telpisko filtru lietojums [23].

3.2. Spektrālais formālisms (17. lekcija)

3.2.1. Kopsavilkums

Šajā lekcijā iepazīsimies ar spektrālā formālisma matemātisko pamatu – Furjē transformācijām, kā arī to aprēķināšanas algoritmiem diskrētajā gadījumā (*DFT* un *FFT*). Digitālo attēlu apstrādes pamatmetodes (spektrālā formālisma izmantošanas gadījumā) balstās konvolūcijas teorēmas secinājumos, kas izskaidro zemfrekvences un augstfrekvences filtru lietošanas iespējas un īpatnības. Nobeigumā apskatīsim tālīzpētes gadījumiem būtisko homomorfās filtrēšanas metodi.

3.2.2. Furjē transformācija

Franču matemātiķis un fiziķis Žozefs Furjē (1768–1830) savu zinātnisko darbu [26] “*La Theorie Analytique de la Chaleur*”⁷, publicēja 1822. gadā, kur analizēja pieņēmumu (ne vienmēr acīmredzamu), ka jebkuru periodisku funkciju var reprezentēt kā harmonisku funkciju summu. Vispārinot analīzi arī uz neperiodiskām funkcijām, Furjē formulēja sakarības

$$\begin{aligned} F(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i2\pi ux} dx \\ f(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) e^{i2\pi ux} du \end{aligned} \quad (3.11.)$$

kas ir traktējamas kā identitātes transformācija (šeit i – imaginārā vienība). Pirmo no formulām (3.11.) sauc par tiešo Furjē transformāciju, un tā katrai neperiodiskai funkcijai $f(x)$ ļauj aprēķināt funkciju $F(u)$, ko sauc par šīs funkcijas spektru. Otro no formulām (3.11.) sauc par apgriezto (inverso) Furjē transformāciju, un tā ļauj precīzi (!) restaurēt funkciju $f(x)$, ja zināms tās spektrs – funkcija $F(u)$. Divargumentu funkciju gadījumā sakarības (3.11.) ir vispārināmas formā

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \\ f(x, y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv \end{aligned} \quad (3.12.)$$

Tā kā attēls ir traktējams kā divargumentu funkcija (skat. (3.1.)), formulas (3.12.) ir lietojamas gan attēlu spektru aprēķināšanai, gan attēlu atjaunošanai no to spektriem.

Digitālo attēlu apstrādes gadījumā arī Furjē transformācija ir jāpārveido digitālā formā. To iespējams izdarīt šādi

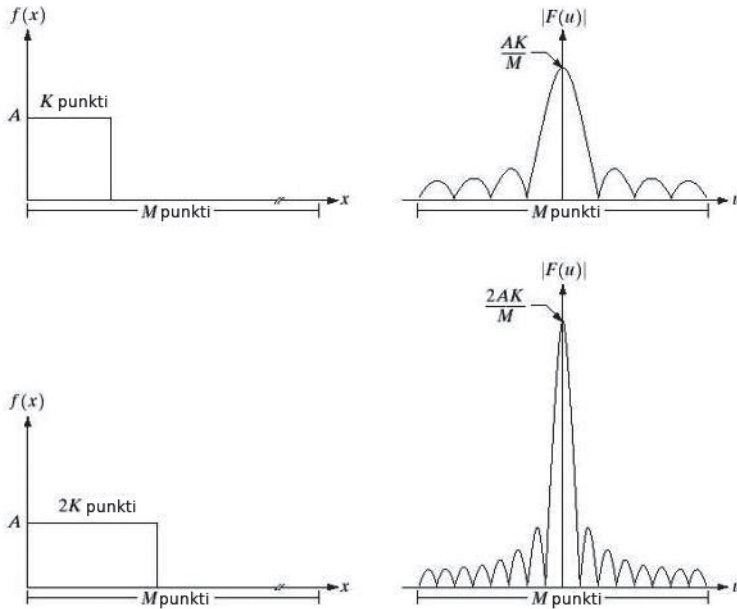
$$F(u, v) \cong \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)} \quad (3.13.)$$

⁷ “Siltuma analītiskā teorija”.

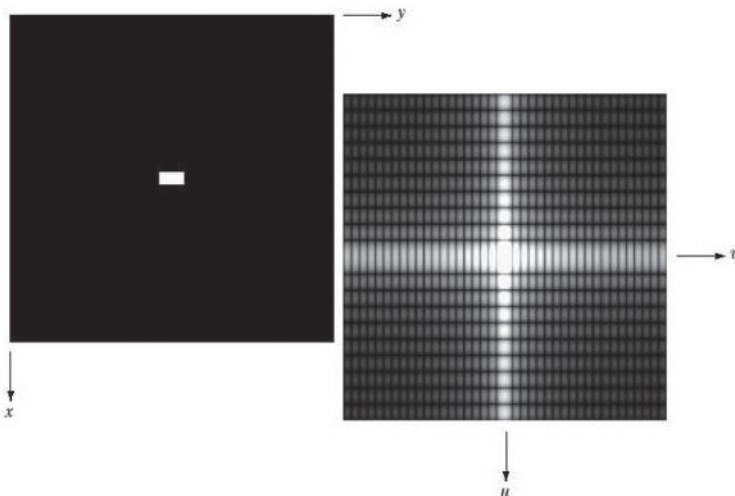
$$f(x, y) \cong \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}$$

kur x, y, u, v – veseli skaitļi (kas reprezentē diskretas pikseļu koordinātu un diskretas spektra frekvenču vērtības), kas mainās intervālos $(0, M-1)$ un $(0, N-1)$, M un N nosaka digitālā attēla izmērus (pikseļu skaitu attēla kolonnās un rindīpās).

Diskrētās formulas (3.13.) ir tuvinātas un atšķirībā no formulām (3.12.) nenodrošina precīzu identitātes transformāciju, t. i., atjaunojot attēlu saskaņā ar (3.13.) otro formulu, iegūst rezultātu, kas nedaudz atšķiras no sākotnējā attēla. Tas īpaši jāņem vērā gadījumos,



3-20. att. Vienargumenta funkcijas un to amplitūdas spektri [23].



3-21. att. Divargumentu funkcija (attēls) un tās amplitūdas spektrs [23].

kad tiešo un apgriezto Furjē transformāciju piemēro vairākkārt. Turklāt formulas (3.13.) nav īsti simetriskas, jo normēšanas koeficients $1/MN$ ir piemērots tikai pirmajai no tām. Simetriskā gadījumā abām formulām būtu jāpiemēro normēšanas koeficienti $1/\sqrt{MN}$, kas nav racionāli no aprēķinu optimizācijas viedokļa, tādēļ abi koeficienti tiek apvienoti vienā un piemēroti asimetriskā veidā tikai vienai formulai.

Diskrēto Furjē transformāciju aprēķinu algoritmu, kas izveidots saskaņā ar formulām (3.13.), sauc par *DFT* algoritmu un lieto samērā reti, jo tas ir ļoti resursietilpīgs un tādēļ lēns. Daudz biežāk aprēķiniem izmanto citu komplicētāku, bet efektīgāku algoritmu, ko dēvē par *FFT* jeb ātro Furjē transformāciju [27].

Tā kā attēla $f(x, y)$ spektrs $F(u, v)$ ir kompleksa (nevis reāla) funkcija, tad tā raksturošanai izmanto dažādas reālas funkcijas, no kurām visbiežāk izmanto:

- spektra reālo daļu $R(u, v) = \text{Re}F(u, v)$;
- spektra imagināro daļu $I(u, v) = \text{Im}F(u, v)$;
- t. s. jaudas spektru $P(u, v) = R^2(u, v) + I^2(u, v)$;
- t. s. amplitūdas spektru $|F(u, v)| = \sqrt{P(u, v)}$;
- t. s. fāzes spektru $\Phi(u, v) = \arctan[I(u, v)/R(u, v)]$.

Lai komplekso spektra funkciju $F(u, v)$ attēlotu grafiski, izmanto kādu no minētajām reālajām funkcijām, visbiežāk amplitūdas spektra funkciju $|F(u, v)|$. Turklāt, kā viegli pārlicināties, attēla spektram nav nekādas vizuālas līdzības ar pašu attēlu. 3-20. att. redzami divu taisnstūrveida viendimensionālu funkciju $f(x)$ amplitūdas spektri. Lietderīgi atzīmēt, ka amplitūdas spektra funkcijas $|F(u)|$ augstums dubultojas, ja dubultojas laukums zem sākotnējās funkcijas $f(x)$, kā arī spektra nullpunktu skaits dubultojas, ja dubultojas funkcijas $f(x)$ no nulles atšķirīgais garums.

3-21. att. redzama divargumentu funkcija (taisnstūra klucīša attēls) un tās amplitūdas spektrs, tā biežums u ass virzienā ir divas reizes mazāks nekā v ass virzienā, jo tas ir apgriezti proporcionāls funkcijas (attēla) izmēru izkārtojumam pa x un y asīm (salīdzināt ar 3-20. att.).

3.2.3. Konvolūcijas teorēma

Spektrālā formālisma saistību ar telpisko formālismu un tā lietošanas pamatojumu nosaka konvolūcijas teorēma, kas apgalvo: konvolūcijai telpiskajā apgabalā atbilst reizināšana spektrālajā apgabalā un otrādi, t. i., reizinājumam telpiskajā apgabalā atbilst konvolūcija spektrālajā apgabalā, jeb

$$w(x, y) \otimes f(x, y) \Leftrightarrow W(u, v) \cdot F(u, v)$$

$$w(x, y) \cdot f(x, y) \Leftrightarrow W(u, v) \otimes F(u, v)$$

kur ar $\otimes$ apzīmēta konvolūcijas darbība (3.8.), $W(u, v)$ un $F(u, v)$ ir attiecīgi attēlu $w(x, y)$ un $f(x, y)$ Furjē spektri. Konvolūcijas darbību bieži formalizē, izmantojot nedaudz atšķirīgu no (3.8.) (precizētu) definīciju

$$w(x, y) \otimes f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w(m, n) f(x-m, y-n) \quad (3.14.)$$

kur abas funkcijas $w(x, y)$ un $f(x, y)$ tiek uzskatītas par attēliem ar izmēriem MN . Ja maska

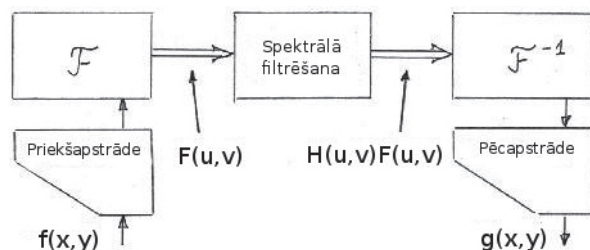
$w(x, y)$ ir mazāka par attēlu, tad tai nepiederošās vērtības līdz izmēram MN tiek pielīdzinātas nullei. Savukārt reizināšanas darbība, ņemot vērā, ka $w(x, y)$ un $f(x, y)$ ir digitāli attēli, tiek veikta, sareizinot abu funkciju atbilstošo pikseļu intensitāšu vērtības. Arī funkcijas $W(u, v)$ un $F(u, v)$ ir uzskatāmas par MN izmēra kompleksiem digitāliem attēliem, un tos reizina, sareizinot atbilstošo pikseļu kompleksās vērtības.

Spektrālajā apgabalā katra funkcijas $F(u, v)$ pikseļa vērtība (skat. (3.13.) pirmo formulu) ir atkarīga no visu (!) attēla $f(x, y)$ pikseļu (t. i., to intensitāšu) vērtībām. Tādēļ, kā jau atzīmēts iepriekš, attēla spektram nav nekādas vizuālas līdzības ar pašu attēlu. Taču, salīdzinot attēlu ar tā spektru (3-22. att.)⁸, varam atzīmēt:

- spektra centrālā elementa vērtība $F(0, 0)$ raksturo digitālā attēla (pelēkā līmeņu) intensitātes vidējo vērtību, jo šim elementam atbilst nulles frekvence spektrālajā apgabalā;
- spektrālā apgabala centram tuvie funkcijas $F(u, v)$ elementi ir ar zemām frekvencēm un tādējādi atbilst lēnām (plūstošām) intensitāšu izmaiņām digitālajā attēlā;
- no spektrālā apgabala centra tālie funkcijas $F(u, v)$ elementi ir ar augstām frekvencēm un tādējādi atbilst straujām intensitāšu izmaiņām digitālajā attēlā, t. i., attēla sīkajām detaļām;
- pastāv detaļu leņķiskas (savstarpēji perpendikulāras) atbilstības digitālajā attēlā un tā spektrā (3-22. att. attēlā ir redzamas izteiktas aptuveni $\pm 45^\circ$ leņķos orientētas struktūras, kas labi saskatāmas arī tā amplitūdas spektrā);
- spektram piemīt centrāla simetrija, tādējādi datora atmiņā var saglabāt tikai pusi no



3-22. att. Digitālais attēls un tā amplitūdas spektrs.



3-23. att. Spektrālās filtrēšanas vispārīgā shēma.

8 3-22. att. redzams Ventspils Augstskolas tālīzpētes attēls (aerofotogrāfija).

tā (otra puse ir restaurējama, izmantojot simetrijas īpašību). Šādā gadījumā redzams, ka spektrs aizņem tādu pašu datora atmiņas apjomu kā sākotnējais attēls, jo katru tā pikseli raksturo divas vērtības (reālā un imaginārā).

Digitālā attēla uzlabošanas (sauktas arī par filtrēšanu) vispārīgā shēma spektrālā formālisma lietošanas gadījumos ir visai vienkārša, un tā redzama 3-23. att.

Pēc priekšapstrādes digitālajam attēlam $f(x, y)$ lieto Furjē transformāciju $\mathcal{F}$ un aprēķina tā komplekso spektru $F(u, v)$. Šo spektru reizina ar filtra funkciju $H(u, v)$, tās jēga ir slāpēt atsevišķas attēla frekvences, savukārt citas tiek atstātas nemainīgas vai pat pastiprinātas. Atbilstoši konvolūcijas teorēmai attēlam netieši tiek lietota konvolūcija ar kādu masku, kuras struktūra tiešā veidā nav zināma. Pēc šādi veiktas spektrālās filtrēšanas koriģētajam spektram $G(u, v) = H(u, v)F(u, v)$ lieto apgriezto Furjē transformāciju $\mathcal{F}^{-1}$ un pēc pēcapstrādes iegūst uzlabotu digitālo attēlu $g(x, y)$. Jāatceras, ka spektri $F(u, v)$ un $G(u, v)$ ir kompleksas funkcijas, savukārt kā filtru $H(u, v)$ parasti izvēlas reālu funkciju. Savukārt uzlabotais attēls

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{G(u, v)\}$$

atkal ir reāla divargumentu diskrēta funkcija.

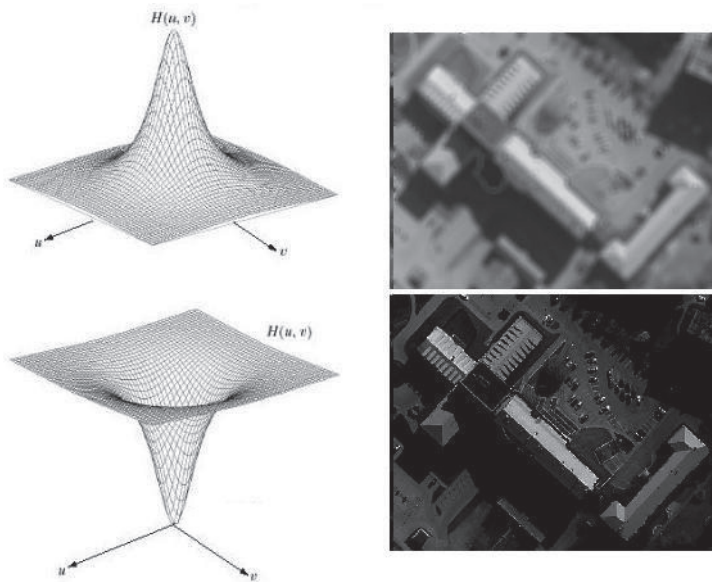
Nobeigumā dažas piezīmes par jēdzieniem “priekšapstrāde” un “pēcapstrāde”. Ar priekšapstrādi visbiežāk saprot sākotnējā attēla $f(x, y)$ katra pikseļa intensitātes vērtības reizināšanu ar lielumu $(-1)^{x+y}$. Šāda manipulācija nodrošina (to iespējams pierādīt), ka, veicot Furjē transformāciju, $\mathcal{F}$ spektrs $F(u, v)$ attēlojas koordinātu sistēmā (u, v) ar sākuma punktu kompleksā attēla augšējā kreisajā stūrī (kā tas pieņemts, strādājot ar digitālajiem attēliem), nevis spektra centrā. Tas ļauj ērtāk vizualizēt iegūtos spektrus kā amplitūdas spektru digitālos attēlus, gan arī ērtāk veikt citas manipulācijas ar tiem⁹. Ar pēcapstrādi savukārt saprot uzlabotā attēla $g(x, y)$ imaginārās daļas likvidēšanu, jo diskrētā Furjē transformācija (3.13.), kā jau tika atzīmēts, ir tuvināta identitātes transformācija, tādēļ pēc tās veikšanas attēlam var parādīties neliela parazītiska imaginārā komponente, ko var neņemt vērā. Turklāt attēla $g(x, y)$ reālās daļas katra pikseļa intensitātes vērtība ir jāreizina ar lielumu $(-1)^{x+y}$, lai kompensētu priekšapstrādes procesā veiktās attēla izmaiņas.

3.2.4. Zemfrekvences filtri

Zemfrekvences (ZF) filtru lietošana digitālo attēlu spektriem (ZF filtri samazina augstfrekvences (AF) komponentes ietekmi spektros) attēlu nogludina, AF filtru lietošana (kas samazina ZF komponentes ietekmi spektros) – izceļ attēla detaļas (3-24. att.). Taču, izmantojot AF filtrus, tiek būtiski samazināta attēla spektra centrālā elementa $F(0, 0)$ vērtība, kas reprezentē attēla (pelēko līmeņu) intensitātes vidējo vērtību, tādēļ iegūtais rezultāts ir ļoti tumšs (3-24. att. labās puses apakšējais attēls). Lai to kompensētu, pie filtra funkcijas $H(u, v)$ pieskaita reālu konstanti (bieži vienādu ar $1/2$), kas to nobīda vertikāli uz augšu. Šādi iegūst gaišuma korekciju, kas būtiski uzlabo attēla skatāmību (3-25. att.).

ZF filtrus spektrālajā apgabalā var veidot atšķirīgi, un ir zināmas dažādas to modifikā-

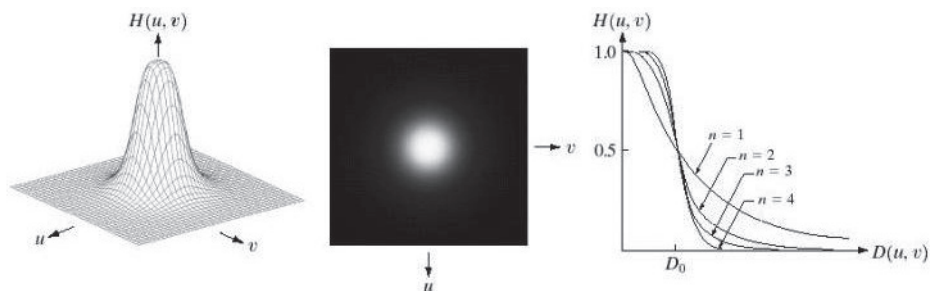
⁹ To, protams, var izdarīt, arī izmantojot no analitiskās ģeometrijas zināmo koordinātu sistēmas centra nobīdes operāciju spektrālajā apgabalā, taču visbiežāk izmanto tieši reizināšanu ar $(-1)^{x+y}$ kā visvienkāršāko no paņēmieniem.



3-24. att. ZF un AF filtru lietojums 3-22. att.



3-25. att. AF filtra lietojums ar gaišuma korekciju.



3-26. att. Batervorta ZF filtrs dažādās interpretācijās [23].

cijas (cilindriskie filtri, Gausa filtri u. c.). Taču viens no populārākajiem un biežāk lietotajiem filtriem ir Batervorta filtrs [25], kas redzams 3-26. att.

Batervorta ZF filtra matemātiskā forma ir šāda

$$H_{ZF}(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v) / D_0]^{2n}} \quad (3.15.)$$

kur n – t. s. filtra kārtā (visbiežāk $n=2$), $D(u, v)$ – attālums no spektra centra ģeometriskā (pikseļu skaita) nozīmē, D_0 – parametrs, ko sauc par slēdzējfrekvenci (to arī izsaka garuma jeb pikseļu skaita vienībās).

3-27. att. redzami Batervorta ZF filtra izmantošanas rezultāti attēlu kalibrēšanas šablonam. Zīmējuma augšējā kreisajā stūrī redzams sākotnējais kalibrēšanas šablona attēls, kuram secīgi lietoti Batervorta ZF filtri ar šādām slēdzējfrekvenču vērtībām: $D_0=5$, $D_0=15$, $D_0=30$, $D_0=80$ un $D_0=230$. Redzam, ka ZF filtru lietošanas rezultāts ir ekvivalents nogludinošo telpisko filtru (masku operāciju) izmantošanas rezultātam telpiskajā formālmā.



3-27. att. Batervorta ZF filtra lietojuma rezultāti [23].

3.2.5. Augstfrekvences filtri

Augstfrekvences (AF) jeb asumu pastiprinošos filtrus spektrālajā apgabalā veido, izmantojot vispārinātu pieeju formā

$$H_{AF}(u, v) = 1 - H_{ZF}(u, v) \quad (3.16.)$$

kur $H_{ZF}(u, v)$ – izvēlētais zemfrekvences filtrs (Batervorta, Gausa, cilindriskais vai cits), kā tas redzams 3-28. att. dažādās interpretācijās (telpiskajā interpretācijā, attēla interpretācijā un šķēluma interpretācijā).

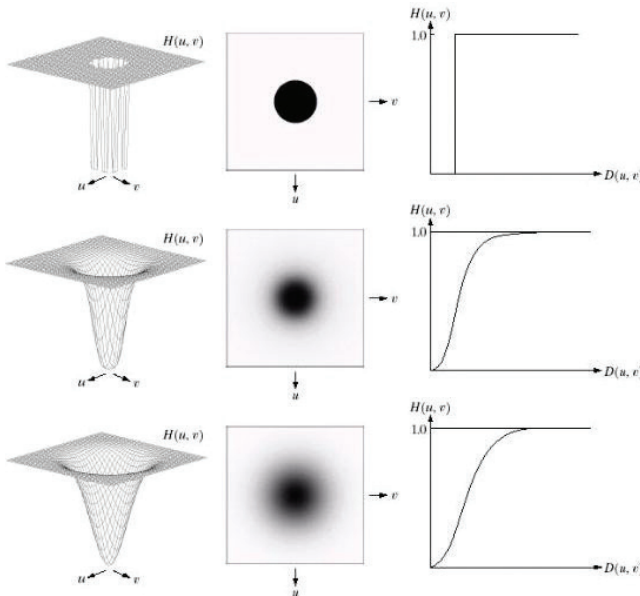
Cilindrisko filtru lieto reti, jo filtri ar asām malām (kāds ir šis filtrs) attēlos rada t. s. “artefaktus” jeb parazītiskas detaļas, kādu sākotnējos attēlos nemaz nav. No šādiem rezultātiem vienmēr jācenšas izvairīties, bet atsevišķos gadījumos (medicīniskie attēli) tie ir pat nepieļaujami.

Gausa filtra gadījumā

$$H_{ZF}(u, v) = \exp\left(-\frac{D^2(u, v)}{2D_0^2}\right)$$

kur, līdzīgi kā iepriekš, $D(u, v)$ – attālums no spektra centra ģeometriskā (pikseļu skaita) nozīmē, D_0 – slēdzējfrecvence. Gausa augstfrekvences filtru veido atbilstoši formulai (3.16.). Batervorta un Gausa filtri ir digitālo attēlu apstrādei visbiežāk lietotie frekvenču filtri spektrālajā apgabalā.

Asumu pastiprinošie AF filtri ļauj būtiski uzlabot attēlu skatāmību un efektīvi vizualizē grūti saskatāmas attēlu detaļas. Lai to novērtētu, apskatīsim divus piemērus. 3-29. att. redzama Mēness fotogrāfija (kreisajā pusē) un Batervorta AF filtra lietošanas rezultāts šim attēlam (vidū). Savukārt labajā pusē redzama sākotnējā attēla un AF filtra izmantošanas rezultāta superpozīcija (t. i., iepriekšējo divu attēlu lineāra kombinācija). Attēlā labajā pusē

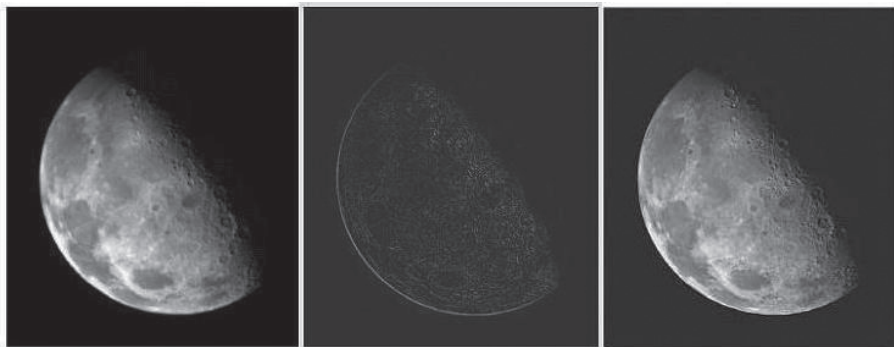


3-28. att. Cilindriskais, Gausa un Batervorta AF filtrs [23].

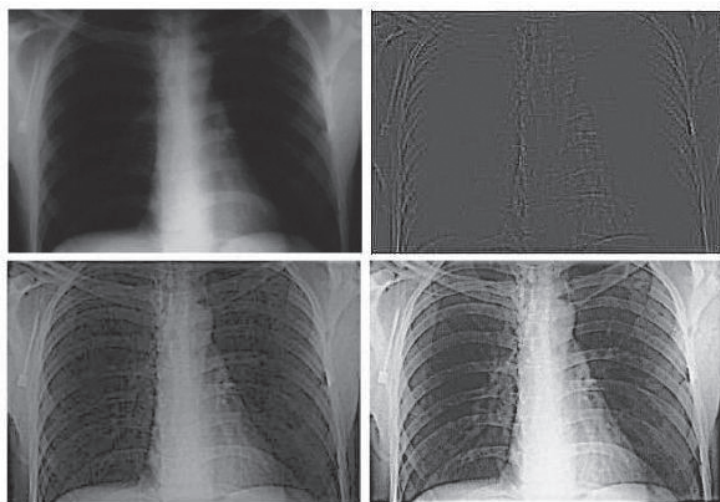
nav vairāk informācijas kā attēlā kreisajā pusē, taču labajā pusē šī informācija ir veiksmīgāk vizualizēta.

Vēl efektīvāk attēlu skatāmības uzlabošanu, izmantojot AF filtrus, var novērtēt medicīniskiem attēliem. 3-30. att. kreisajā augšējā pozīcijā redzams rentgenattēls, kam lietots AF filtrs (augšā pa labi). Apakšējā rindā pa kreisi redzama abu iepriekšējo attēlu superpozīcija, kurai izmantota histogrammas izlīdzināšana (skat. 3.1.4. sadaļu) (apakšā pa labi). Attēla skatāmības uzlabojums ar šīm vienkāršajām operācijām ir ļoti iespaidīgs.

Apskatot asumu pastiprinošos telpiskos filtrus (skat. 3.1.7. sadaļu), nebija skaidrs, kāpēc 3-19. att. redzami filtri nodrošina asuma pastiprināšanu un no kurienes tie radušies. Atbildi sniedz konvolūcijas teorēma, kas faktiski realizē telpiskā un spektrālā formālisma savstarpēji vienošmīgu atbilstību. Ja mēs spektrālajā apgabalā esam izvēlējušies kādu AF filtru $H_{AF}(u, v)$, tad varam tam lietot apgriezto Furjē transformāciju $\mathcal{F}^{-1}$ un, veicot vēl dažas maznozīmīgas manipulācijas, iegūt telpisko filtru (masku) $w_{AF}(x, y)$. Šīs maskas konvolūcija (masku operācija) ar digitālo attēlu telpiskā formālisma ietvaros dod to pašu rezultātu, ko filtra $H_{AF}(u, v)$ lietošana minētā attēla spektram spektrālā formālisma ietvaros. Piemērojot šādu pieeju, tika aprēķināti 3-19. att. kreisajā pozīcijā redzami telpiskie filtri (maskas).



3-29. att. Mēness digitālā attēla uzlabošana, izmantojot AF filtru [23].



3-30. att. Medicīniska attēla uzlabošana ar AF filtru [23].

3.2.6. Homomorfā filtrēšana

Tālīzpētes aplikācijām ir raksturīga situācija, ka attēlu formē divas multiplikatīvas komponentes

$$f(x, y) = s(x, y)r(x, y) \quad (3.17.)$$

no kurām $s(x, y)$ ir pētāmās virsmas apstarojums (Saulē vai radars), savukārt funkcija $r(x, y)$ reprezentē virsmas refleksijas koeficientu. Informāciju par pētāmo virsmu satur tikai otrā komponente $r(x, y)$, tādēļ apstarojuma komponentes $s(x, y)$ ietekmi vēlamā novērst vai pēc iespējas samazināt. Taču īstenībā apstarojuma komponentes ietekme uz attēlu ir ļoti liela (virsmas apstarojuma atšķirības ēnā un saulē ir ievērojamas), tādēļ daļa attēla ir vai nu pārgaismota, vai tumša. Šādos attēla apgabalos detaļas bieži nav saskatāmas, kas apgrūtina to interpretāciju un izmantošanu. Taču piemērot frekvenču filtrus katrai no attēla (3.17.) multiplikatīvajām komponentēm nav vienkārši, jo Furjē transformācijai piemīt īpašība, ko sauc par aditīvo invarianci, t. i.,

$$\mathcal{F}[f(x, y) + g(x, y)] = \mathcal{F}[f(x, y)] + \mathcal{F}[g(x, y)]$$

bet nepiemīt īpašība, ko sauc par multiplikatīvo invarianci, t. i.,

$$\mathcal{F}[f(x, y) \cdot g(x, y)] \neq \mathcal{F}[f(x, y)] \cdot \mathcal{F}[g(x, y)]$$

kur ar $\mathcal{F}$ apzīmēta Furjē transformācija. Tādēļ izmantojam logaritmisko funkciju un pārveidojam (3.17.) formā, kam ir piemērojama Furjē transformācijas aditīvā invariance, proti,

$$\ln f(x, y) = \ln s(x, y) + \ln r(x, y)$$

Veicot tiešo Furjē transformāciju, iegūstam

$$F'(u, v) = S'(u, v) + R'(u, v) \quad (3.18.)$$

kur

$$F'(u, v) = \mathcal{F}[\ln f(x, y)]$$

$$S'(u, v) = \mathcal{F}[\ln s(x, y)]$$

$$R'(u, v) = \mathcal{F}[\ln r(x, y)]$$

Tādējādi, izmantojot logaritmisko funkciju, esam spektrālajā apgabalā atdalījuši apstarojuma komponenti no refleksijas komponentes. Apstarojuma komponente tipiski ir lēni mainīga, un, salīdzinot ar refleksijas komponenti, tās spektrā dominē zemās frekvences. Refleksijas komponentē savukārt ir visi pētāmās virsmas sīkstruktūras elementi, un tās spektrā dominē augstās frekvences. Tātad tuvināti var ZF komponenti mūsu attēla logaritmā asociēt ar apstarojumu, savukārt AF komponenti – ar refleksiju. Lai samazinātu apstarojuma ietekmi, izvēlamies augstfrekvences filtru $H(u, v)$, lietojam to izteiksmei (3.18.)

$$G'(u, v) = H(u, v)F'(u, v) = H(u, v)S'(u, v) + H(u, v)R'(u, v)$$

un veicam apgriezto Furjē transformāciju

$$g'(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[G'(u, v)] = s'(x, y) + r'(x, y)$$

kur

$$s'(x, y) = \mathcal{F}^{-1} [H(u, v) S'(u, v)]$$

$$r'(x, y) = \mathcal{F}^{-1} [H(u, v) R'(u, v)]$$

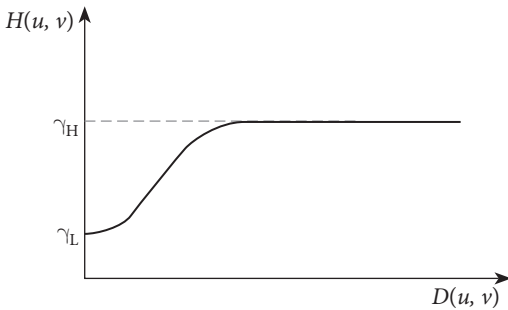
Restaurējot šādi koriģēto (filtrēto) attēlu ar eksponentfunkciju (lai kompensētu sākotnēji veikto logaritmēšanu), iegūstam

$$g(x, y) = e^{g'(x, y)} = e^{s'(x, y)} e^{r'(x, y)}$$

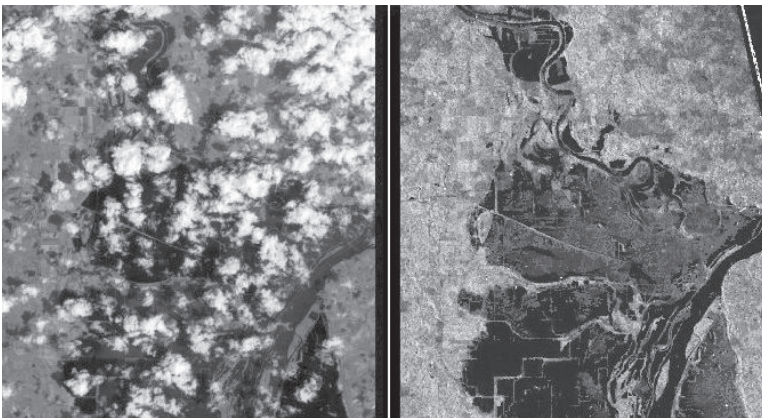
Šo algoritmu sauc par **homomorfo filtrēšanu** [28], un to lieto gadījumos, kad digitālajam attēlam ir multiplikatīvas komponentes. Homomorfās filtrēšanas gadījumos kā AF filtru bieži izmanto funkciju $H(u, v)$, kas redzama 3-31. att., kurai $\gamma_L < 1$, $\gamma_H > 1$.

Šādi tiek slāpēta apstarojuma ietekme un akcentētas attēla refleksijs izcelsmes detaļas. Bez logaritmēšanas šo attēla komponentu atdalīšana nav iespējama, tādēļ 3-31. att. redzamā frekvenču filtra lietošana paša attēla spektram vērā ņemamu efektu nebūtu devusi.

3-32. att. (kreisajā pusē) redzams satelītattēls ar mākoņiem, to ēnām un apgabaliem ar ļoti atšķirīgām refleksijs koeficienta vidējām vērtībām, kas rada tumšu attēla fragmentu bez saskatāmām detaļām. Lietojot attēlam homomorfo filtrēšanu (labajā pusē), efektīgi parādījušās detaļas tumšajā apgabalā un novērsta mākoņu ēnu radītā ietekme. Pazuduši arī paši mākoņi kā vienmērīgas intensitātes (t. i., zemfrekvences) apgabali, un, lai arī Zemes virsmas detaļas tiem cauri nav saredzamas, kopējā attēla skatāmība ir būtiski uzlabojusies.



3-31. att. Tipisks homomorfās filtrēšanas AF filtrs [23].



3-32. att. Homomorfās filtrēšanas lietojuma piemērs.

3.3. Restaurācijas un segmentācijas metodes (18. lekcija)

3.3.1. Kopsavilkums

Iepazīsimies ar divām tālīzpētei būtiskām signālapstrādes tehnoloģijām – signālu (attēlu) restaurācijas metodēm (tostarp Vīnera filtru) un digitālo attēlu segmentācijai bieži izmantoto sliekšņu metodi un tās modifikācijām (globālā sliekšņa metodi, adaptīvā sliekšņa metodi un lokālā sliekšņa metodi). Lekcijas nobeigumā īss ieskats citā populārā tehnoloģijā – attēlu segmentācijas ūdensšķirtņu metodē.

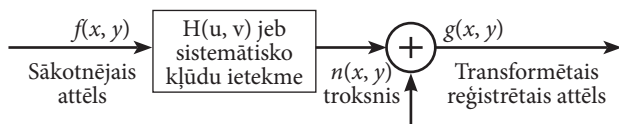
3.3.2. Attēlu restaurācija jeb pirmapstrāde

Ir liela starpība, vai digitālo attēlu lieto vizuālai kvalitatīvai analīzei, vai arī to paredzēts izmantot kvantitatīvu mērījumu veikšanai, piemēram, 1.7.6. sadaļā analizētās spožuma temperatūras mērīšanai. Pirmajā gadījumā attēla pikseļu intensitātes vērtības var samērā brīvi mainīt (izmantojot apskatītās attēlu uzlabošanas telpiskā un spektrālā formālisma metodes), lai uzlabotu attēla skatāmības un vizuālās uztveres parametrus. Otrajā gadījumā, gluži pretēji, ir pēc iespējas precīzāk jārestaurē sākotnējais attēls, t. i., jānodrošina tā pikseļu intensitātes vērtību proporcionalitāte (vai vismaz funkcionāli viennozīmīga atbilstība) pētāmā objekta rezeļu¹⁰ radiometriskajam spožumam (skat. 1.2.5. sadaļu). Lai to nodrošinātu, lieto izmantoto sensoru kalibrēšanas datus, dažādus attēlu iegūšanas ietekmējošo parādību (starojuma mijiedarbības ar atmosfēru u. c.) matemātiskos modeļus, kā arī analizē visus reģistrācijas iespējamo sistemātisko un stohastisko kļūdu avotus un veidus. Taču, neskatoties uz to, reāli iegūtajā attēlā vienmēr vēl būs gan līdz galam vēra ņemtu sistemātisko kļūdu komponentes, gan stohastiskās (gadījuma) kļūdas. Shematiski sākotnējā (nosacīti precīzā) attēla $f(x, y)$ transformācija par reģistrēto (vēra ņemto sistemātisko un stohastisko kļūdu ietekmēto) attēlu $g(x, y)$ redzama 3-33. att.

Ja vēra ņemto sistemātisko kļūdu komponente nav liela, varam lietot 3-33. att. atbilstošu lineāru attēla transformācijas modeli, t. i.,

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) + n(x, y)$$
$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) + N(u, v) \quad (3.19.)$$

kur $N(u, v)$ – stohastisko kļūdu (trokšņa) komponentes spektrs. Pirmā no formulām (3.19.) reprezentē transformācijas modeli telpiskā formālisma apzīmējumos, otrā – spektrālā for-



3-33. att. Attēla transformācija tā iegūšanas procesā.

¹⁰ Par rezeli tālīzpētē sauc digitālā attēla pikselim atbilstošo apgabalu uz planētas (Zemes) virsmas.

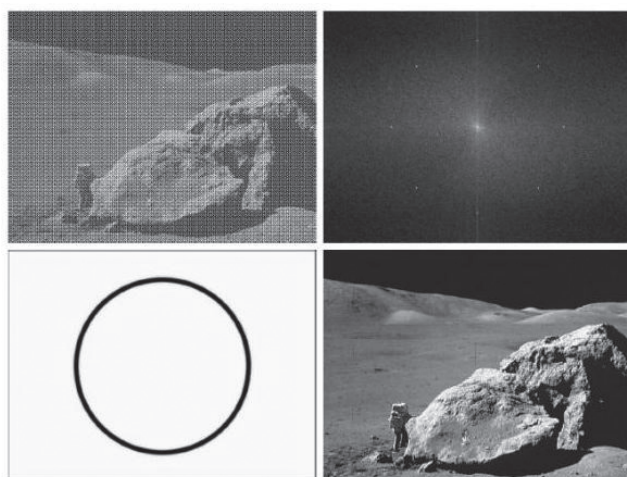
mālisma apzīmējumos. Funkcijas $h(x, y)$ un $H(u, v)$ sauc par šī modeļa multiplikatīvo komponenti, funkcijas $n(x, y)$ un $N(u, v)$ – par aditīvo komponenti. Jo vairāk informācijas par minētajām funkcijām (komponentēm) ir mūsu rīcībā, jo precīzāk iespējams veikt digitālā attēla restaurāciju, t. i., pēc transformētā attēla $g(x, y)$ aprēķināt sākotnējā attēla $f(x, y)$ optimālu tuvinājumu $\hat{f}(x, y)$. Transformācijas modelis (3.19.) ietver konvolūciju, tāpēc attēla restaurāciju nereti dēvē arī par tā dekonvolūciju.

3.3.3. Stohastiskie un periodiskie trokšņi

Stohastiskās kļūdas (trokšņus) nav iespējams precīzi modelēt, un tādējādi pilnībā novērst to ietekmi arī nav iespējams. Šo kļūdu veidu pieņemts raksturot ar to varbūtības blīvuma funkcijām, kas ir atšķirīgas dažādas izcelsmes trokšņiem. Digitālo attēlu apstrādē izšķir Gausa, Releja, Erlanga, eksponenciālos, vienmērīgos un impulsa trokšņus. Trokšņa tipu var noteikt, analizējot attēla vienmērīgas intensitātes apgabalu histogrammas, jo tajos histogrammu formē pārsvarā tikai troksnis. Trokšņu ietekmes samazināšanai galvenokārt izmanto dažādus zemfrekvences (nogludinošos) filtrus, gan lineārus, gan nelineārus, gan vienkāršus, gan komplicētus (pēdējie, protams, bieži ir efektīvāki).

Īpašu trokšņu grupu formē t. s. periodiskie trokšņi, kas rodas no periodiskiem elektroniskiem vai elektromehāniskiem procesiem attēlu iegūšanas un reģistrācijas sistēmās. Šie trokšņi īstenībā nav stohastiski, tādēļ to ietekmi iespējams praktiski pilnībā novērst, izmantojot spektrālā formālisma metodes.

3-34. att. augšējā rindā redzams digitālais attēls¹¹ ar lielu periodisko trokšņu komponenti un tā amplitūdas spektrs, kurā labi saskatāmi astoņi regulāri ap tā centru izvietoti punkti, kas atbilst kaut kādām izteiktām regulārām struktūrām attēlā. Attēlā vienīgās izteiktās regulārās struktūras ir saistītas ar tam piemītošo periodisko trokšņu komponenti, tāpēc minēto spektra punktu izslēgšana no tā varētu novērst traucējošos periodiskos trokšņus attēlā. To var izdarīt, lietojot attēla spektram 3-34. att. apakšējā kreisajā pusē vai



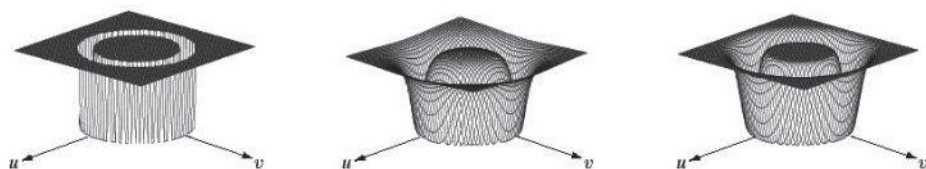
3-34. att. Periodisko trokšņu novēršana digitālajā attēlā [23].

¹¹ Astronauts Harisons Šmits uz Mēness “Apollo-17” misijas laikā.

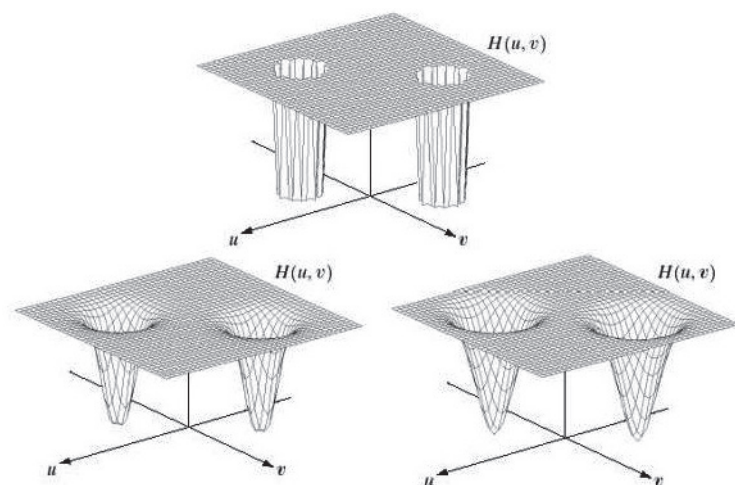
3-35. att. redzamos joslu filtrus. Rezultāts, kā redzams 3-34. att. apakšējā labajā pusē, ir iespaidīgs.

Lai filtrēšanas rezultāts būtu vēl precīzāks un mazāk ietekmētu apstrādājamo attēlu, aplūkotajā piemērā joslu filtru vietā var izmantot arī robu filtrus, kas redzami 3-36. att.

Ņemot vērā jau minēto spektru centrālo simetriju, robu filtrus vienmēr ir pāra skaita simetriskas komponentes. Protams, var izmantot arī daudzus citus specifiskus frekvenču filtrus, lai novērstu vai samazinātu dažādu atšķirīgu periodisko trokšņu ietekmi uz digitālajiem attēliem.



3-35. att. Cilindriskais, Batervorta un Gausa joslu filtrs [23].



3-36. att. Cilindriskais, Batervorta un Gausa robu filtrs [23].

3.3.4. Multiplikatīvā komponente

Ja kļūdu aditīvā komponente ir likvidēta, transformācijas (3.19.) modelis vienkāršojas

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v)$$

un sākotnējā attēla spektru (ignorējot trokšņus) var atrast formā

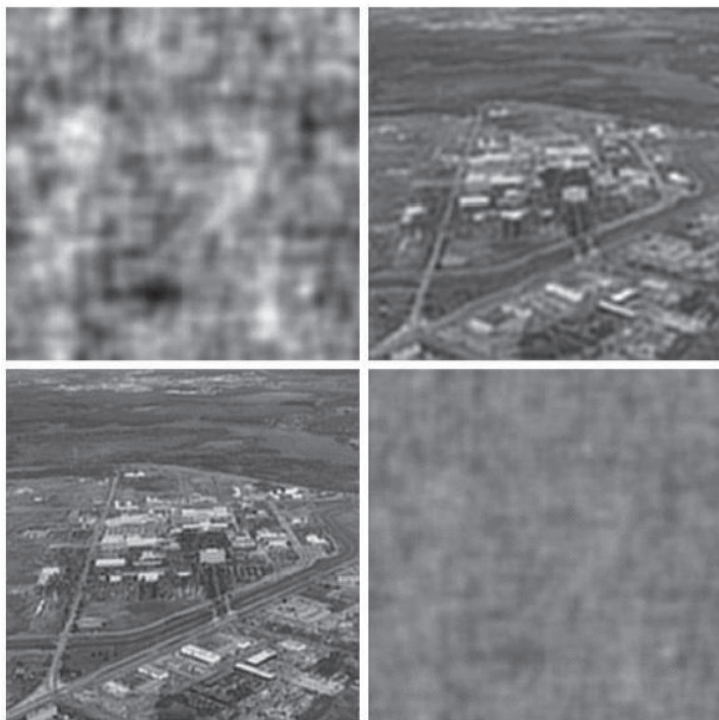
$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (3.20.)$$

ja vien zināma t. s. degradējošā funkcija $H(u, v)$. Ir izstrādātas speciālas metodes degradējošās funkcijas noteikšanai, ko var iedalīt trīs grupās: $H(u, v)$ noteikšana novērojumu veidā, eksperimentālā veidā vai modelējot (t. i., teorētiskā veidā). Šīs metodes tomēr lielā mērā ir atkarīgas no konkrētā attēla iegūšanas un izmantošanas īpatnībām, tāpēc detalizēti tām nepievērsīsimies, taču aprēķināt degradējošo funkciju $H(u, v)$ ar lielāku vai mazāku precizitāti ir iespējams.

Tomēr formula (3.20.) izrādās maldinoša, jo trokšņu (aditīvā) komponente nekad pilnībā nav novēršama, to iespējams tikai samazināt. Tādējādi precizētais reģistrētā attēla spektrs ir uzrakstāms formā

$$\check{G}(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) + \check{N}(u, v) \quad (3.21.)$$

kur $\check{N}(u, v)$ – samazināto (bet ne novērsto) trokšņu spektrs. Sākotnējā attēla spektra saprātīgu tuvinājumu saskaņā ar (3.21.) iespējams atrast formā



3-37. att. Turbulentas atmosfēras degradācijas restaurācijas piemēri [23].

$$\check{F}(u, v) = \frac{\check{G}(u, v)}{H(u, v)} = F(u, v) + \frac{\check{N}(u, v)}{H(u, v)} \quad (3.22.)$$

bet funkcijai $H(u, v)$ var būt arī nulles vērtības, un pie tām formulas (3.22.) otrais saskaitāmais bezgalīgi pieaug, izjaucot šīs formulas saprātīgas izmantošanas iespēju. Šī ir ļoti slikta ziņa pat tad, ja degradējošā funkcija $H(u, v)$ ir noteikta pietiekami precīzi.

Izeja no radušās situācijas iespējama divos veidos. Vienkāršākais (bet reizē arī primitīvākais) paņēmieni ir “apcirt” funkciju $H(u, v)$ un izmantot tikai spektra centram tuvāko tās daļu, kurā nav funkcijas $H(u, v)$ nulles vērtību. Šis paņēmieni daudzos gadījumos darbojas, kaut arī degradējošā funkcija tiek izmainīta un tādējādi padarīta mazāk precīza.

3-37. att. redzami atmosfēras turbulences radītās 480×480 pikseļu izmēra attēla degradācijas restaurācijas piemēri ar formulu (3.22.). Augšā pa kreisi lietota precīza degradējošā funkcija $H(u, v)$, bet aditīvās komponentes klātbūtnē. Acīmredzot funkcija $H(u, v)$ satur nullei tuvas vērtības, un tā rezultātā attēls ir pazudis. Augšā pa labi redzams restaurācijas rezultāts, lietojot tikai funkcijas $H(u, v)$ zemfrekvences daļu (kad $H(u, v)$ reizināta ar Bartervorta ZF filtru ar slēdzējfrecvenci $D_0 = 40$). Apakšā pa kreisi izmantota slēdzējfrecvence $D_0 = 70$, apakšā pa labi $D_0 = 85$. Varam secināt, ka degradējošās funkcijas $H(u, v)$ pirmā (spektra centram tuvākā) nulles vērtība atrodas joslā, ko ierobežo divas pēdējās slēdzējfrecvenču vērtības.

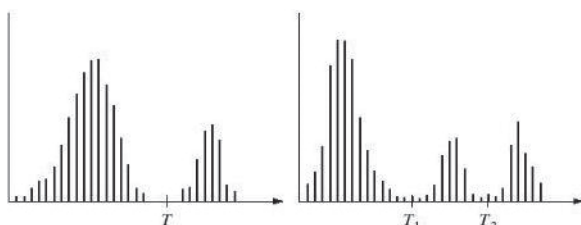
Cits algoritmiski sarežģītāks, bet reizē arī efektīvāks problēmas risinājums ir t. s. Vīnera filtra lietošana. Veicot daudz rūpīgāku attēlu restaurācijas analīzi, amerikāņu matemātiķis Norberts Vīners (1894–1964) parādīja [29], ka sākotnējā attēla (signāla) spektra optimālu tuvinājumu iespējams atrast formā

$$\check{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \cdot \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v) / S_f(u, v)} \right] \check{G}(u, v) \quad (3.23.)$$

kur $S_n(u, v) = |\check{N}(u, v)|^2$ – trokšņu jaudas spektrs (nosakāms), $S_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ – sākotnējā attēla jaudas spektrs (nezināms). Tādējādi, lai izmantotu Vīnera filtru, nākas saprātīgi modelēt attiecības $S_n(u, v) / S_f(u, v)$ iespējamās vērtības un izmantot samērā komplicētus matemātiskos modeļus.

3.3.5. Attēlu segmentācijas sliekšņu metode

Par segmentāciju sauc digitālā attēla sadalīšanu vienveidīgos (pēc kādas pazīmes vai to grupas) apgabalos – objektos. Kādi ir šie objekti un to sadalīšanas pazīmes, lielā mērā nosaka risināmā problēma. Galvenās pamatidejas segmentācijas veikšanai ir līdzības izmantošana (piemēram, sliekšņu metodē) un nepārtrauktības izmantošana (piemēram, ūdens-



3-38. att. Viegli atdalāmu apgabalu histogrammas.

šķirtņu metodē). Rūpīgāk iepazīsimies ar pirmo no tām – sliekšņu metodi, jo vienkāršās lietojamības un intuitīvās interpretējamības dēļ tā ieņem centrālo vietu attēlu segmentācijas metožu kopumā.

Sāksim ar vienkāršotu gadījumu, kad attēlā ir tikai divu veidu apgabali – “objekts” un “fons”, kas ir jāatdala viens no otra. Ja šo apgabalu histogrammas nepārklājas (3-38. att.), tad ir vienkāršākais sliekšņu metodes gadījums, t. i., ja attēla pikseļa intensitāte $f(x, y) > T$, tad šis pikselis pieder “objektam”, pretējā gadījumā, ja $f(x, y) < T$ – “fonam”, kur sliekšņa T vērtība atdala abus histogrammas apgabalus. Apskatīto pieeju viegli vispārināt arī trīs vai vairāk atdalāmu (kuru histogrammas nepārklājas) apgabalu gadījumiem.

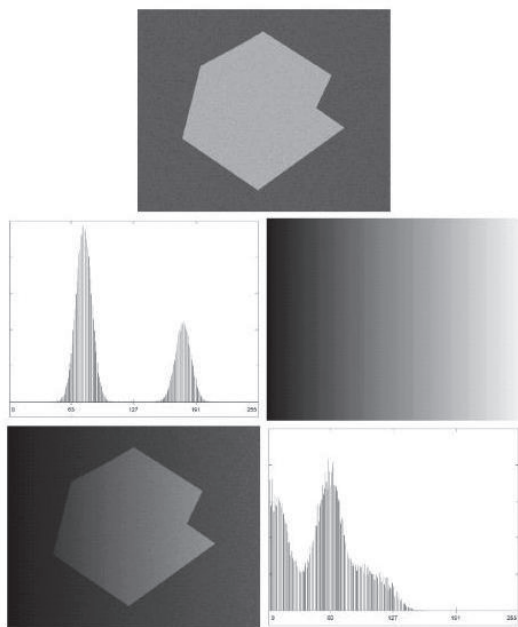
Vispārējā gadījumā segmentācijas sliekšņu metode balstās attēla pikseļa intensitātes $f(x, y)$ salīdzināšanā ar kādu funkciju $T(x, y)$, ko sauc par sliekšņa funkciju

$$T(x, y) = T[x, y, f(x, y), p(x, y)] \quad (3.24.)$$

kur $p(x, y)$ – attēla lokālās īpašības raksturojoša funkcija (piemēram, pikseļa apkārtnes vidējā intensitātes vērtība vai pikseļa ģeometriskais attālums no kādas attēla struktūras u. tml.). Atkarībā no sliekšņa funkcijas struktūras tiek klasificēti segmentācijas sliekšņu metodes galvenie speciālgadījumi, proti:

- ja $T = T[f(x, y)]$ (tā atkarīga tikai no pikseļa intensitātes vērtības vai arī ir konstante), tad sliekšni sauc par globālu un metodi par globālā sliekšņa metodi;
- ja $T = T[f(x, y), p(x, y)]$ (tā atkarīga no kādas attēla lokālās īpašības raksturojošas funkcijas), tad sliekšni sauc par lokālu un metodi par lokālā sliekšņa metodi;
- ja $T = T(..., x, y)$ (tā ir tieši atkarīga no pikseļa koordinātām), tad sliekšni sauc par adaptīvu un metodi par adaptīvā sliekšņa metodi.

Līdzīgi kā iepriekš, apskatīto pieeju viegli vispārināt arī divu, trīs vai vairāk sliekšņu funkciju piemērošanas gadījumiem.



3-39. att. Nevienmērīga apstarojuma ietekme uz attēlu [23].

3.3.6. Apstarojuma loma sliekšņu metodē

Kā jau minēts, iepazīstoties ar homomorfo filtrēšanu (skat. 3.2.6. sadaļu), tālīzpētes lietojumiem ir raksturīga situācija, kad attēlu formē divas multiplikatīvas komponentes

$$f(x, y) = s(x, y)r(x, y)$$

no kurām $s(x, y)$ ir pētāmās virsmas apstarojums (Saulē vai radars), savukārt funkcija $r(x, y)$ reprezentē virsmas refleksijas koeficientu. Informācija par pētāmo virsmu ir tikai otrajā komponentē $r(x, y)$, tādēļ apskatīsim, kas notiek ar attēlu $f(x, y)$ un tā histogrammu, ja apstarojums $s(x, y)$ ir nevienmērīgs (3-39. att.).

Ja sākotnējā attēlā (augšā – pie vienmērīga apstarojuma) abas tā komponentes bija viegli atdalāmas (skat. histogrammu vidū pa kreisi), tad pie nevienmērīga apstarojuma (vidū pa labi) attēls ievērojami transformējas (apakšā pa kreisi) kopā ar savu histogrammu (apakšā pa labi), un vienkāršota komponentu atdalīšana vairs nav iespējama.

Ja apstarojuma funkcija $s(x, y)$ ir pieejama (teiksim, eksperimentālai noteikšanai), tad var rīkoties turpmāk norādītajā veidā. Ar $s(x, y)$ atbilstošu starojumu apstaro baltu Lamberta virsmu (skat. 1.4.5. sadaļu), iegūstot kalibrējošo attēlu

$$g(x, y) = \bar{k}_\lambda s(x, y)$$

kur $\bar{k}_\lambda$ – Lamberta virsmas refleksijas koeficients (difūzais albedo). Šis kalibrējošais attēls $g(x, y)$ ļauj nošķirt no sākotnējā, nevienmērīgi apstarotā attēla $f(x, y)$ tā refleksijas komponenti

$$r(x, y) = \frac{f(x, y)}{s(x, y)} = \bar{k}_\lambda \frac{f(x, y)}{g(x, y)}$$

kuras histogrammā “objekts” un “fons” atkal ir atdalāmi iepriekš apskatītajā vienkāršotajā veidā. Taču, ja apstarojuma funkcija $s(x, y)$ nav pieejama, tad jāizmanto adaptīvā sliekšņa metode vai cits adekvāts segmentācijas algoritms.

3.3.7. Globālā sliekšņa metode

Globālā sliekšņa metode ir visvienkāršākā no visām sliekšņu metodēm, jo visiem digitālā attēla pikseļiem tiek piemērota viena un tā pati sliekšņa vērtība $T = \text{const}$ vai tās modifikācija $T = T[f(x, y)]$, kur $f(x, y)$ – pikseļa intensitātes vērtība. Metodes veiksmē galvenokārt atkarīga no objektu atdalāmības attēla histogrammā.

Globālā sliekšņa metodes tipisks algoritms datora vadītai attēla segmentācijai ir šāds:

- izvēlas sākotnējo sliekšņa vērtību $T = T_0$;
- izmantojot T , segmentē attēlu divos apgabalos G_1 un G_2 ;
- aprēķina vidējās pelēko līmeņu intensitātes šajos apgabalos $\bar{f}_1 = \bar{f}(G_1)$ un $\bar{f}_2 = \bar{f}(G_2)$;
- aprēķina jaunu sliekšņa vērtību $T = T_1 = \frac{1}{2}(\bar{f}_1 + \bar{f}_2)$;
- atgriežas pie otrā soļa un ciklā turpina procesu, kamēr $|T_n - T_{n-1}| > \epsilon$, kur ϵ – iepriekš izvēlēts mazs lielums (sliekšņa precizitātes kritērijs).

Kā sākotnējo sliekšņa vērtību T_0 bieži izvēlas visa attēla pelēko līmeņu intensitātes vidējo vērtību vai arī to mediānas vērtību.

Apskatītā algoritma izmantošanas piemērs redzams 3-40. att. Veikta pirksta nospieduma ("objekta") atdalīšana no pelēkā "fona", un segmentācijas rezultāts noformēts kā binārais attēls. Algoritms pēc trim iterācijām ātri konverģēja uz sekmīgu rezultātu. Jāpiezīmē, ka globālā sliekšņa metode labi strādā gadījumos, kad apstarojuma funkcija $s(x,y)$ ir kontrolējama vai eksperimentāli nosakāma (skat. 3.3.6. sadaļu), kā tas ir daudzos digitālo attēlu industriālajos lietojumos, bet ne vienmēr tālīzpētē.

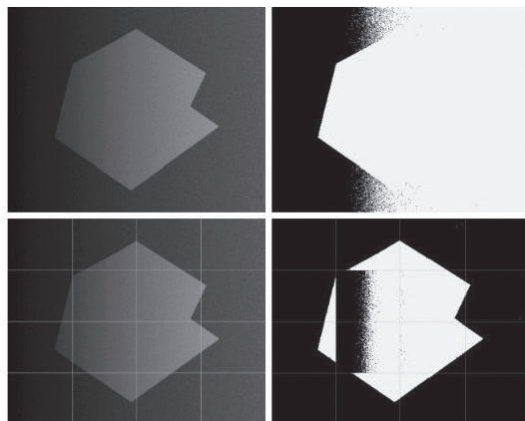
3.3.8. Adaptīvā sliekšņa metode

Kā jau redzējām, globālā sliekšņa metode nav efektīvi izmantojama nevienmērīgas un nezināmas apstarojuma funkcijas $s(x,y)$ gadījumos. To apliecina gan 3-39. att. (apakšā pa labi) redzamā histogramma, gan 3-41. att. (augšā pa labi) redzamais segmentācijas ar globālā sliekšņa metodes algoritmu rezultāts.

Adaptīvā sliekšņa metodes būtība ir sadalīt sākotnējo attēlu apakšattēlos (3-41. att. apakšā pa kreisi), un katram no tiem lietot globālā sliekšņa metodes algoritmu (skat. 3.3.7. sadaļu) ar atšķirīgām sliekšņa T vērtībām. Ja iegūtais rezultāts nav apmierinošs kādos no apakšattēliem (skat. 3-41. att. apakšā pa labi), tad tos sadala jau sīkākos apakšattēlos, un katram no tiem atkal lieto globālā sliekšņa metodes algoritmu. Procesu turpina tik ilgi, kamēr sasniegts apmierinošs segmentācijas rezultāts.



3-40. att. Pirksta nospieduma segmentācija ar globālā sliekšņa metodi [23].



3-41. att. Nevienmērīgi apstarota objekta segmentācijas rezultāti [23].

3.3.9. Sliekšņa izvēles optimizācija

Ja digitālā attēla apgabalu histogrammas pārklājas, tad to precīza segmentācija ar sliekšņa metodi bieži nav iespējama. Taču var censties izvēlēties tādu sliekšņa T vērtību, lai veiktās segmentācijas kļūda būtu minimāla. Apskatīsim gadījumu, kad attēlā ir tikai divi atdalāmi apgabali ("objekts" un "fons"), kuru normētās histogrammas (skat. 3.1.4. sadaļu) var traktēt (skat. 3-42. att.) kā atbilstošo pelēkā līmeņa intensitāšu z atkārtošanās varbūtības blīvuma funkcijas $p_1(z)$ ("objektā") un $p_2(z)$ ("fonā").

Attēla rezultējošā pelēkā līmeņa intensitāšu z atkārtošanās varbūtības blīvuma funkcija $p(z)$ savukārt ir uzrakstāma formā

$$p(z) = P_1 p_1(z) + P_2 p_2(z)$$

kur P_1 – varbūtība, ka pikselis pieder "objektam", P_2 – varbūtība, ka pikselis pieder "fonam", turklāt $P_1 + P_2 = 1$. Ja esam izvēlējušies kādu sliekšņa vērtību T , tad segmentācijas kļūdu var raksturot ar lielumu

$$E(T) = P_2 E_1(T) + P_1 E_2(T) \quad (3.25.)$$

kur

$$E_1(T) = \int_{-\infty}^T p_2(z) dz$$

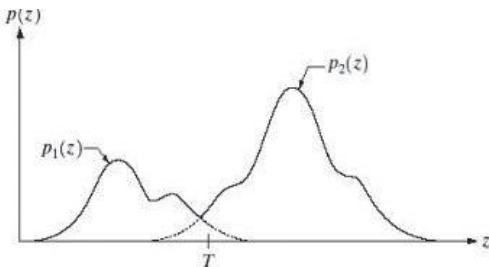
raksturo varbūtību kļūdaini segmentēt "fona" pikseli kā "objektam" piederošu, savukārt

$$E_2(T) = \int_T^{\infty} p_1(z) dz$$

raksturo varbūtību kļūdaini segmentēt "objekta" pikseli kā "fonam" piederošu.

Lai atrastu optimālu sliekšņa vērtību, jāmeklē tāds T , kas minimizē funkciju (3.25.). Pielīdzinot funkcijas $E(T)$ atvasinājumu nullei, iegūstam¹²

$$\frac{dE}{dT} = P_2 \frac{dE_1}{dT} + P_1 \frac{dE_2}{dT} = P_2 p_2(T) - P_1 p_1(T) = 0 \quad (3.26.)$$



3-42. att. Attēla divu apgabalu pārklājošās histogrammas [23].

¹² Mīnusa zīme izteiksmes labajā pusē parādās tādēļ, ka funkcija $E_2(T)$ tiek atvasināta pēc integrāļa apakšējās robežas.

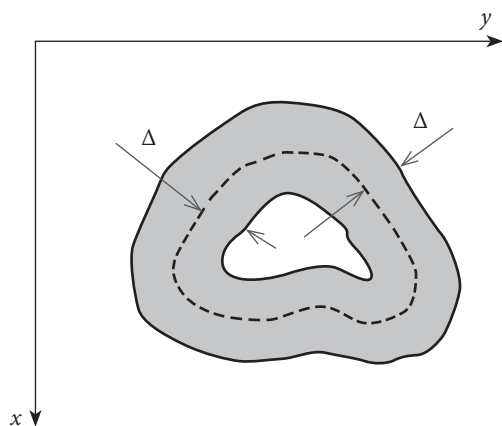
Vienādojuma (3.26.) analītiska atrisināšana iespējama tikai tad, ja zināms funkciju $p_1(z)$ un $p_2(z)$ analītiskais veids (piemēram, Gausa likne), bet šādi gadījumi nav bieži. Tādēļ vienādojumu (3.26.) parasti risina skaitliski, ņemot vērā, ka funkciju $p_1(z)$ un $p_2(z)$ skaitliskās vērtības ir zināmas no histogrammas. Speciālgadījumā, kad $P_1 = P_2$, optimālā sliekšņa vērtība T atbilst līkņu $p_1(z)$ un $p_2(z)$ krustpunktam.

3.3.10. Lokālā sliekšņa metode

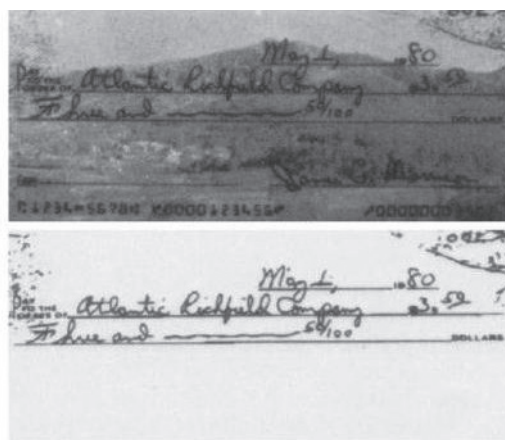
Ja segmentācija veikta, izmantojot saskaņā ar (3.26.) aprēķināto optimālo sliekšņa vērtību T , tad iegūto (tomēr tuvināto) rezultātu (3-43. att. pārtrauktā līnija) iespējams uzlabot ar lokālā sliekšņa metodi. Šīs metodes pamatideja ir veikt segmentāciju, izmantojot nevis visus attēla pikseļus, bet tikai tos, kas atrodas segmentācijas robežas tiešā tuvumā, t. i., saprātīgi izvēlētā attālumā Δ no tās tuvinātā stāvokļa (pārtrauktās līnijas).

Šādai attēla apakškopai, kas veiksmīgas parametra Δ izvēles gadījumā ietvers arī patieso robežu starp attēla atdalāmajiem apgabaliem, histogrammu atdalāmība parasti ir veicama daudz efektīvāk un ar sliekšņa metodi šim lokālajam (pelēkajam) apgabalam ļauj iegūt precīzāku segmentācijas rezultātu. Nepieciešamības gadījumā arī šo lokālo apgabalu iespējams dalīt apakšapgabalos.

Ir virkne gadījumu, kad lokālā sliekšņa metode sniedz pārsteidzoši labus rezultātus. Kā vienu no tādiem var minēt teksta (objekta) segmentāciju attēlos ar raibu fonu (3-44. att.), kā tas ir ar tekstiem uz bankas čekiem vai citām aizsargātām vērtspapīru veidlapām. Ar līdzīgām situācijām nereti nākas saskarties arī tālīzpētes lietojumos.



3-43. att. Lokālā sliekšņa segmentācijas skaidrojums.



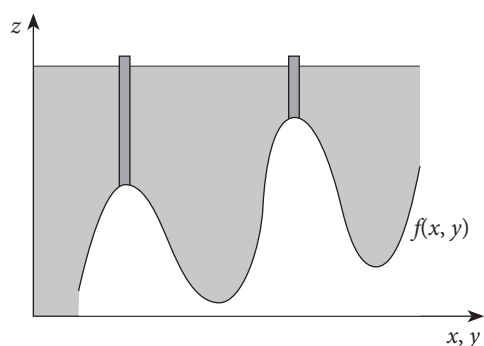
3-44. att. Teksta segmentēšana ar lokālā sliekšņa metodi [23].

3.3.11. Segmentācijas ūdensšķirtņu metode

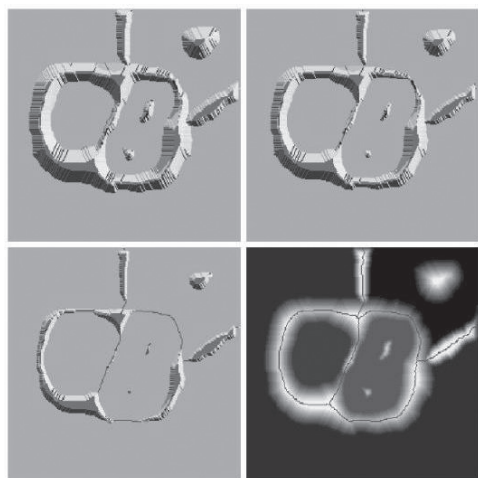
Nobeigumā īsi aplūkosim citu efektīvu un bieži izmantotu segmentācijas tehnoloģiju – t. s. ūdensšķirtņu metodi. Šī metode balstās otrā segmentācijas pamatidejā, proti, nepārtrauktībā. Ūdensšķirtņu metodes gadījumā digitālos attēlu $z=f(x, y)$ uzskata par reljefu 3D funkciju jeb virsmu. Šo reljefu (virsmu) pakāpeniski aizpilda ar virtuālu šķidrumu, dēvētu par “ūdeni”. Sākotnēji “ūdens” aizpilda tikai virsmas zemākās ieplakas (attēla tumšākos apgabalius), pēc tam, līmenim ceļoties, sākas izolēto ūdenstilpju virtuāla saplūšana. Taču tā netiek pieļauta, saplūšanas punktos “būvējot” virtuālus dambjus (atzīmēti tumši pelēkā krāsā 3-45. att.) un paturot tos vienmēr virs “ūdens” virsmas.

Kad visa funkcijas $z=f(x, y)$ reljefa virsma ir “applūdināta”, virs “ūdens” būs palikuši tikai virtuālie dambji, kas veido robežas starp digitālā attēla segmentējamajiem apgabaliem (3-46. att.).

Sliekšņu metode un ūdensšķirtņu metode ir divas populārākās, bet ne vienīgās no plašā digitālo attēlu segmentācijas metožu klāsta. Ir daudz dažādu segmentācijas tehnoloģiju, kas galvenokārt izmanto signālapstrādes morfoloģiskā formālisma metodes. Ar tām un citām tālīzpētes lietojumiem noderīgām tehnoloģijām var iepazīties, studējot vairākkārt minēto un lietpratīgi uzrakstīto R. Gonzalesa un R. Vuda monogrāfiju [23].



3-45. att. Virtuālie dambji ūdensšķirtņu metodes šķēlumā.



3-46. att. Ūdensšķirtņu metodes grafiska vizualizācija [23].

3.4. Attēlu interpretācija un klasifikācija (19. lekcija)

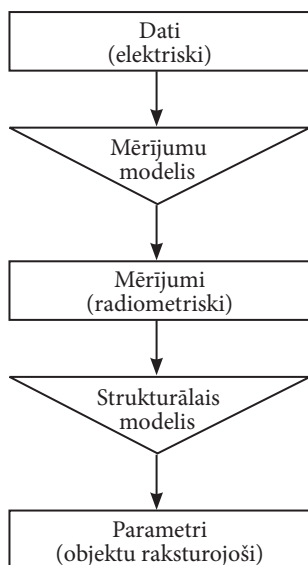
3.4.1. Kopsavilkums

Attēlu interpretācijas un klasifikācijas metodes veido tādu kā signālapstrādes teorijas savienojumu ar specifiski tālzipētei raksturīgām metodēm. Iepazīsimies ar interpretācijas galvenajām problēmām un to risināšanas veidiem. Vērtēsim tālzipētes attēlu vadītās un nevadītās klasifikācijas metodes. Iepazīsimies ar atbalsta datiem un to izmantošanu, kā arī klasifikācijas rezultātu precizitātes novērtēšanas paņēmieniem.

3.4.2. Izpratne par interpretāciju

Tālzipētes izpratnē par attēlu interpretāciju sauc attēlā identificējamo objektu (tostarp arī parādību) atbilstības noteikšanu reāliem objektiem (parādībām) uz pētāmās planētas (Zemes) virsmas. Attēlu interpretācija ietver gan kvalitatīvo komponenti, t. i., objektu reģistrāciju, gan kvantitatīvo komponenti – objektu struktūras jeb parametru noteikšanu. Tas ir ļoti sarežģīts un daudzveidīgs process, ko ir grūti formalizēt. Izpratne par to veidojas, sākot izstrādāt attēlu interpretācijai paredzētus algoritmus un datorprogrammas, kas ir piederīgi tādai komplicētai datorzinātņu jomai kā mākslīgais intelekts. Tādēļ praktiski interpretācijas procesu visbiežāk īsteno interaktīvi, t. i., operatoram – cilvēkam (interpretatoram) kopīgi strādājot ar datoru, kas aprīkots ar speciālu programmatūru – interpretācijas rīkiem. Šādā gadījumā attēlu interpretācijas procesa veiksmi parasti nosaka: (1) interpretatora prasmes un pieredze; (2) attēlu kvalitāte un informācijas daudzums tajos; (3) pētāmo (interpretējamo) objektu (parādību) īpašības.

Kādēļ tas viss ir tik sarežģīti? Attēlu interpretācijas procesā tiek veikta iegūto datu at-



3-47. att. Kvantitatīvās interpretācijas secība.

bilstības noteikšana (pakārtošana) identificējamo objektu parametriem. Taču jāņem vērā, ka vairākus gadījumus mūs interesē tādi objekti (vai parādības), ko nav iespējams tieši izmērīt ar tālzipētes metodēm un tehnoloģijām. Piemēram, mūs var interesēt ūdens piesārņotība, veģetācijas blīvums vai citi specifiski attēlā identificējamo objektu parametri, kuru vietā ar izmantoto sensoru palīdzību ir veikti radiometriski (visbiežāk spožuma, skat. 1.2.5. sadaļu) mērījumi. Lai sasaistītu iegūtos mērījumus ar pētāmo objektu parametriem, veido matemātiskos modeļus, ko dēvē par strukturālajiem modeļiem. Mēs jau nedaudz apskatījām dažu šādu modeļu veidošanas principus, kad iepazināmies ar difūzo izkliedi atmosfērā (skat. 1.7.5. sadaļu) un spožuma temperatūru (skat. 1.7.6. sadaļu), kā arī runājom par mikroviļņu Braga izkliedes modeli (skat. 1.4.6. sadaļu). Taču reāli tālzipētes strukturālie modeļi ir visai komplicēti un atkarīgi no daudziem, tostarp blakus apstākļu noteiktiem parametriem.

Tomēr tā ir tikai daļa no patiesās problēmas. Jāņem vērā arī tas, ka tālzipētē izmantotie sensori neregistrē radiometriskus fizikālus lielumus, bet gan elektriskos lielumus (lādiņus un/vai spriegumus no fotoelektrisko matricu elementiem vai radaru uztvērējiem). Šie elektriskie lielumi (saukti par datiem) ir adekvāti jāpārveido par radiometriskajiem mērījumiem, izmantojot citus matemātiskos modeļus, ko dēvē par mērījumu modeļiem. Tālzipētes mērījumu modeļus veido, izmantojot gan lietoto sensoru kalibrēšanas fizikālos modeļus un to parametrus, gan arī digitālo attēlu restaurācijas algoritmus (skat. 3.3.2.–3.3.4. sadaļu).

Attēlu kvantitatīvās interpretācijas vispārīgā secība redzama 3-47. att. No iegūtajiem tālzipētes datiem (reģistrētajām elektrisko lielumu vērtībām) ar mērījumu modeli aprēķina radiometrisko lielumu jeb mērījumu vērtības. Pēc tam ar strukturālo modeli no mērījumiem aprēķina analizējamos objektus raksturojošo parametru vērtības. Tātad interpretācijas rezultāts ir atkarīgs ne tikai no iepriekš minētajiem trim veiksmes nosacījumiem, bet arī no šo divu matemātisko modeļu prasmīgas izvēles un to precizitātes.

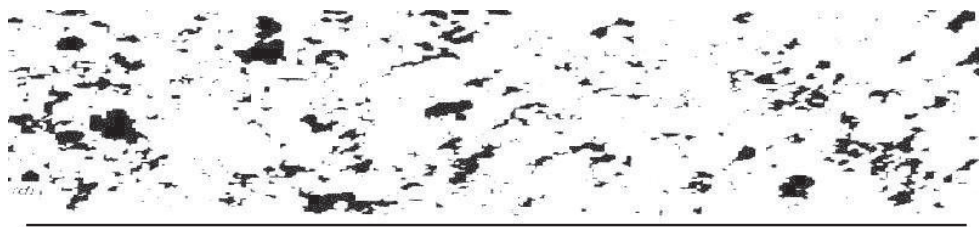
3.4.3. Fraktālie efekti

Cits apstāklis, kas var būtiski apgrūtināt un ietekmēt tālzipētes datu interpretāciju, ir ģeotelpisko objektu nereti fraktālā daba [31]. Fraktāla struktūra piemīt upju noteces baseiniem, kalniem un to grēdām, ūdenstilpju krasta līnijām, kā arī daudziem citiem ģeogrāfiskiem objektiem uz mūsu planētas virsmas. Kā piemēru apskatīsim lielu ezeru grupu Somijas vidienē (Saimā apgabalā), tās satelītattēli (binārā formā) ar dažādu izšķirtspēju redzami 3-48. un 3-49. att. Šāda ezeru grupa veido ģeogrāfisku fraktālu struktūru, un tās (deterministiskie) parametri ir būtiski atkarīgi no fraktālās pašlīdzības diapazona. Pieņemsim, ka mums no 3-48. un 3-49. att. redzamajiem satelītattēliem jānosaka trīs šo ezeru grupu raksturojošie parametri, proti: (1) ar ūdeni klātā attēlotās teritorijas relatīvā daļa (procentos); (2) ezeru skaits un (3) ezeru vidējais izmērs (platība) attēlotajā teritorijā.

Izrādās, šo relatīvi vienkāršo kvantitatīvās interpretācijas problēmu nav viegli atrisināt, jo rezultāts ir ļoti atkarīgs no izmantotajam attēla izšķirtspējas (tai nav nekāda sakara ar analizējamā objekta parametriem). Attēlos ar zemāku izšķirtspēju (3-49. att.) identificējamo ezeru skaits ir nenoliedzami mazāks nekā attēlos ar augstāku telpisko izšķirtspēju (3-48. att.), tādējādi mainīsies arī ezeru vidējās platības novērtējums un kopējās ar ūdeni



3-48. att. Saimā apgabala ezeru zeme Somijā (augsta izšķirtspēja).



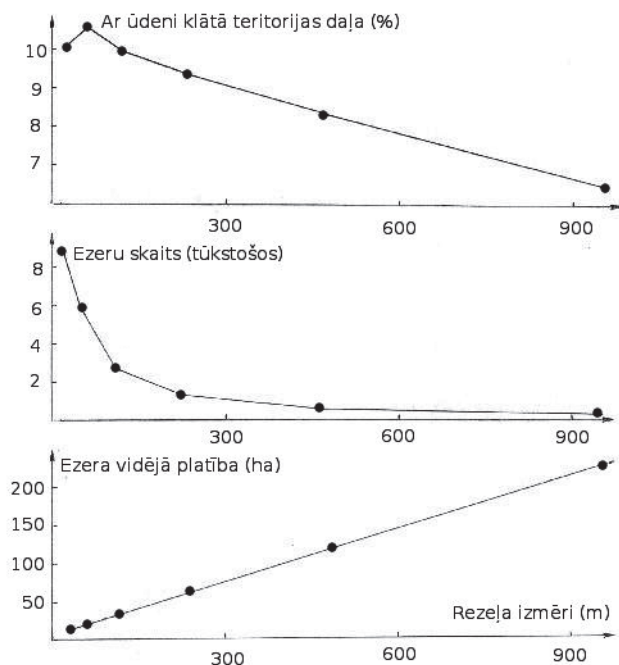
3-49. att. Saimā apgabala ezeru zeme Somijā (zema izšķirtspēja).

klātās teritorijas relatīvā daļa. Ezeru sistēmas parametru atkarība no izmantoto satelītattēlu izšķirtspējas redzama 3-50. att., un tā ir visai būtiska.

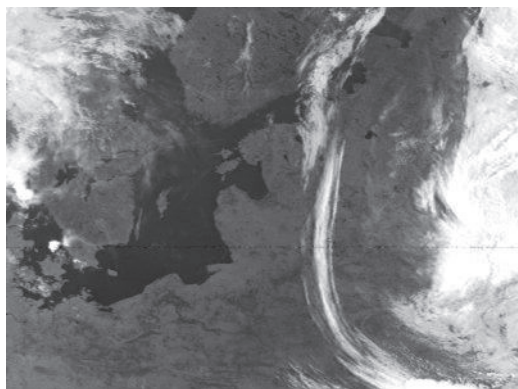
Taču ir arī pilnīgi skaidrs, ka ezeru grupas kā ģeogrāfiska objekta parametri nevar būt un tie arī nav atkarīgi no izmantoto tālzipētes attēlu īpašībām, tostarp izšķirtspējas. Tādā gadījumā varbūt 3-50. att. redzamo parametru atkarība no attēla izšķirtspējas ir jātraktē kā interpretācijas sistemātiska kļūda. Izrādās, ka tomēr ne, jo ezeru grupa veido fraktālu struktūru, kuras parametri, kas raksturo ezeru skaitu, vidējo platību un kopējo ar ūdeni klāto teritorijas daļu, ir deterministiski noteikti tikai ar nosacījumu, ka ir definēts minimālais ezera izmērs (kādā, teiksim, virsmas laukuma nozīmē). Par ezeru dēvē neizzūdošu ierobežotu ūdenstilpi, bet ne katru, jo arī pelķe ir ierobežota (un dažreiz ilgstoši neizzūdoša) ūdenstilpe. Sadzīviski mēs viegli novērtējam robežu starp pelķi un ezeru (vai dīķi), taču, veicot kvantitatīvus mērījumus vai kvantitatīvu interpretāciju, šī robeža jādefinē iepriekš un pilnīgi viennozīmīgi. Citādi ar interpretācijas rezultātiem iespējams manipulēt, kas nereti arī notiek, tādējādi samazinot vai pilnīgi reducējot šo rezultātu jēgu un nozīmi. Diemžēl šāda veida interpretācijas problēmas ir raksturīgas visu veidu fraktālas struktūras ģeogrāfiskajiem objektiem.

Nobeigumā atzīmēsim, ka tālzipētes satelītattēlus (gan multispektrālos, gan radarattēlus) bieži nosacīti iedala trīs grupās:

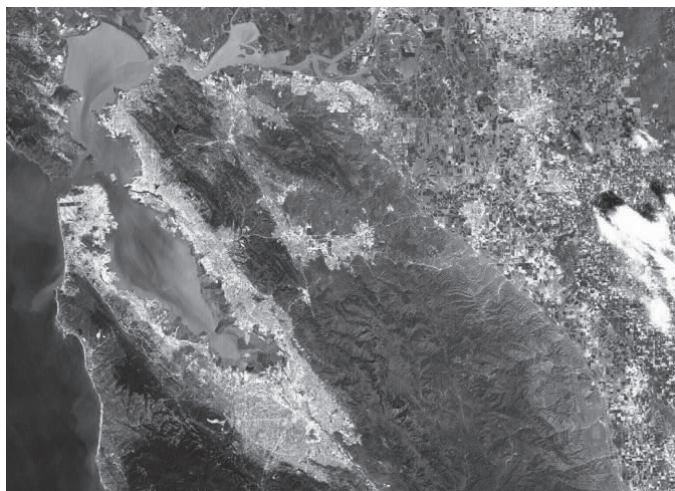
- zemas telpiskās izšķirtspējas attēli (rezeļu izmērs 100 m līdz 3000 m), 3-51. att.;
- vidējas telpiskās izšķirtspējas attēli (rezeļu izmērs 10 m līdz 100 m), 3-52. att.;
- augstas telpiskās izšķirtspējas attēli (rezeļu izmērs 1 m līdz 10 m), 3-53. att.



3-50. att. Ezeru sistēmas parametru atkarība no attēla izšķirtspējas.



3-51. att. Baltijas jūras zemas telpiskās izšķirtspējas attēls (*NOAA*).



3-52. att. Sanfrancisko līča vidējas telpiskās izšķirtspējas attēls (*LANDSAT*).



3-53. att. Denveras priekšpilsētas augstas telpiskās izšķirtspējas attēls (*SPOT*).

3.4.4. Interpretācijas veidi

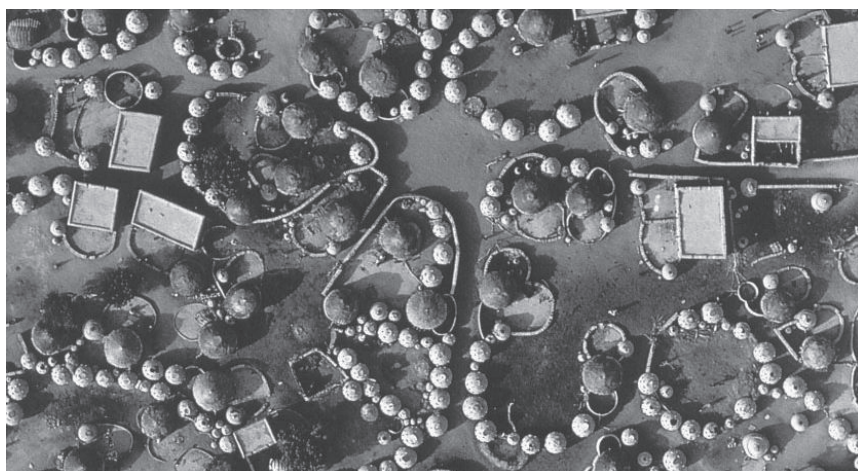
Tālizpētes attēlu interpretācijas veidus var iedalīt divās grupās:

- spontānā jeb intuitīvā interpretācija;
- loģiskā jeb analītiskā interpretācija.

Spontāno interpretāciju visbiežāk izmanto vizuālajā režīmā, kad interpretators atpazīst meklējamo objektu, balstoties iepriekšējā pieredzē. Tādējādi šis interpretācijas veids automātiski pieņem, ka interpretētāja rīcībā ir kaut kāda papildu informācija (t. s. atbalsta dati) par objektu, pēc kuras objekts tiek atpazīts. Interpretators bez šādas papildu informācijas objektu spontāni atpazīt nespēj. 3-54. att. satelītattēlā redzams dubļiem applūdis ciems pie Nigēras upes (Āfrikā), kurā grūti interpretēt baltos, sēnēm līdzīgos objektus, kas ievērojamā skaitā saskatāmi mājokļu tuvumā. Taču interpretatoram, kas jau saskāries ar šādiem objektiem, to identifikācija nekādas problēmas nesagādās.

Loģisko interpretāciju izmanto gan vizuālajā, gan datorizētajā (automātiskā un pus-automātiskā) režīmā, kad rezultātu nav izdevies iegūt vai nu algoritmisku problēmu, vai atbalsta datu nepietiekamības dēļ. Šis interpretācijas veids izmanto t. s. interpretācijas atslēgas (pazīmes), kuru secīga izmantošana bieži ļauj iegūt sekmīgu rezultātu. Vispāratzītas ir šādas septiņas interpretācijas atslēgas:

- **objekta forma** (atsevišķos gadījumos objekta forma ir tik unikāla, ka ļauj atpazīt objektu bez citu interpretācijas atslēgu izmantošanas, piemēram, skat. 3-16. att., kurā redzamā ēka nešaubīgi interpretējama kā ASV Aizsardzības ministrija¹³ jeb Pentagon);
- **objekta izmērs** (objekta izmēri jāvērtē kopā ar informāciju par attēla mērogu vai citām izmēru raksturojošām pazīmēm, piemēram, autoceļa platumu var novērtēt, salīdzinot to ar automašīnu izmēriem, kas ir zināmi);
- **objekta krāsa jeb tonis** (melnbaltu attēlu gadījumā – objekta pelēkā līmeņa intensitāte, taču tonis krāsu attēliem īstenībā ir daudz ietilpīgāka interpretācijas atslēga, jo to veido vairāku atslēgu kopa – šī toņa krāsu komponentes);



3-54. att. Dubļiem applūdis afrikāņu ciems pie Nigēras upes [33].

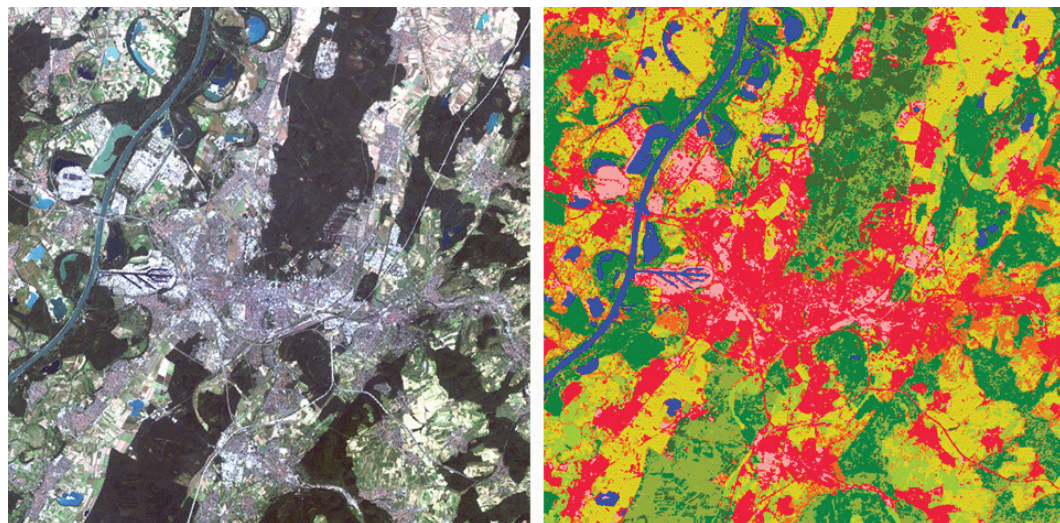
13 Jāatzīmē, ka Ķīnā ir uzbūvēta otra šādas formas ēka.

- **objekta tekstūra** (tekstūru nosaka daudzu sīku objektu klātbūtne attēlā, kas paši nav atšķirami nepietiekamas telpiskās izšķirtspējas dēļ, to var raksturot kā gludu, rievainu, graudainu u. tml.);
- **objekta zīmējums**¹⁴ (tas raksturo objekta komponentu telpiskā izvietojuma īpatnības, piemēram, koncentrisks vai radiāls komponentu izvietojums, rūtaina to izvietojuma struktūra u. tml.);
- **objekta atrašanās vieta** (gan horizontālā, gan vertikālā nozīmē, vietas piesaiste ļauj interpretācijai izmantot kartes un citu ģeotelpisko informāciju, arī fotogrammetriskās metodes);
- **asociācijas** (dažādu attēla objektu starpā ļauj, piemēram, viegli atpazīt autofurgonu uz ceļa vai autostāvvietā (skat. 3-53. att.), bet ne klajā laukā vai tuksneša vidū).

Loģiskās attēlu interpretācijas algoritmi (reizēm komplicēti) tiek veidoti, izmantojot vienas vai vairāku interpretācijas atslēgu iesaisti. Viena no visbiežāk lietotajām attēlu loģiskās interpretācijas metodēm ir attēlu klasifikācija.

3.4.5. Nevadītā klasifikācija

Pirms klasifikācijas metožu analīzes ir jānoskaidro, kas ir klases (tālīzpētes nozīmē) un ko saprot ar jēdzienu klasifikācija. Par klasēm dēvē lielus, relatīvi homogēnus ģeogrāfiskus objektus (t. s. zemes jeb faktiskās klases) un to reprezentācijas tālīzpētes attēlos (t. s. attēla jeb formālās klases). Tādi ir meži, labības lauki, ganības, jūras un ezeri, tuksneši un tamlīdzīgi objekti (bet ne atsevišķas ēkas, automašīnas u. c. sīki objekti). Klasifikācija savukārt ir process, kura mērķis ir transformēt attēlu par tematisku datu (formālo klašu) kopu jeb specializētu karti, kurā klases ir interpretētas un atdalītas (skat. 3-55. att.). Klasifikācijas process ir relatīvi vienkāršs un formalizējams attēlu loģiskās interpretācijas speciālgadījums, ko tādēļ bieži uztic veikt datoriem.



3-55. att. Digitālā attēla zemes lietojuma klasifikācijas piemērs.

14 Angļu val. – *pattern*.

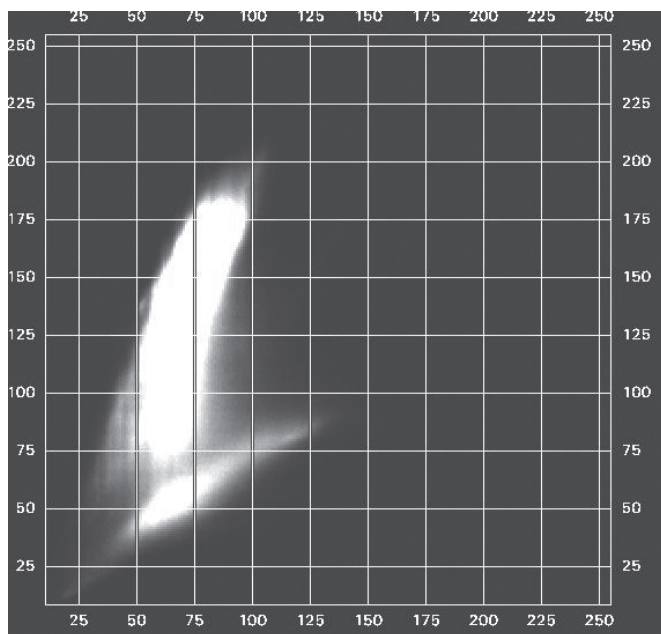
Nevadītās klasifikācijas pamatdoma ir veikt attēla segmentāciju (skat. 3.3.5.–3.3.11. sadaļu), šādi iegūt formālu attēla klašu kopu un tad, izmantojot atbalsta datus, interpretēt attēla klašu un zemes klašu savstarpējo atbilstību. Līdz ar to nevadītās klasifikācijas algoritmi būtībā ir segmentācijas algoritmi, kas papildināti ar atbalsta datu piesaisti un izmantošanu klašu atbilstības, t. i., interpretācijas veikšanai. Taču nevadītā klasifikācija labi darbojas tikai ar nosacījumu, ka formālo klašu skaits M ir lielāks par faktisko klašu skaitu K , t. i., $M > K$. Tad viena faktiskā klase tiek interpretēta kā viena vai vairākas attēla klases, un klasifikācijas rezultāts parasti ir veiksmīgs.

Taču, lietojot sliekšņu metodi, kas balstās uz histogrammu izmantošanu segmentācijas veikšanai, bieži iegūst nelielu¹⁵ formālo klašu M skaitu un nereti $M < K$. Šādos gadījumos nevadītā klasifikācija ir neveiksmīga, jo vairākas faktiskās klases nav atdalāmas un vienozīmīgi interpretējamas. Sliekšņu metodes segmentācijas algoritmu var pilnveidot, iesaistot tajā vairāku interpretācijas atslēgu (ne tikai pikseļu intensitāšu) izmantošanu. Piemēram, kā otru interpretācijas atslēgu var izvēlēties tekstūru, un tās raksturošanai noder pikseļu intensitāšu dispersija σ^2 (vai vidējā kvadrātiskā kļūda σ) zem saprātīgi izvēlētas ($m \times n$) izmēra maskas, proti,

$$\bar{z} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} z_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} (z_i - \bar{z})^2 \quad (3.27.)$$

Divu interpretācijas atslēgu (teiksim, pikseļa intensitātes z un tekstūras parametra σ) gadījumā iespējams aprēķināt divdimensionālas (2D) histogrammas, t. i., attēlot pikseļu



3-56. att. Attēla pikseļu vērtību 2D fāzu telpas (histogrammas) piemērs [33].

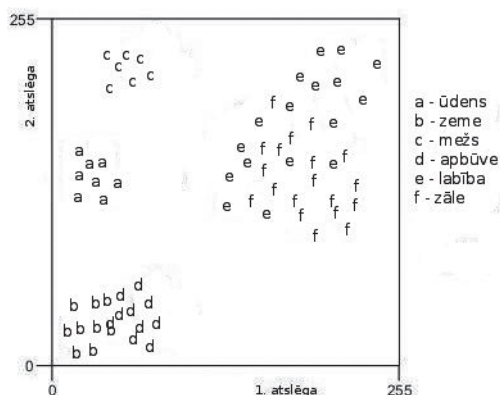
15 Ūdensšķirtņu metode gluži pretēji bieži izraisa t. s. hipersegmentāciju, tādēļ ir piemērotāka nevadītās klasifikācijas veikšanai.

stāvoكلي 2D fāžu telpā, par kuras koordinātām kalpo izvēlēto interpretācijas atslēgu raksturlielumi. 3-56. att. pa x asi attēlotas pikseļa intensitātes vērtības z (pirmā atslēga), pa y asi – tekstūru raksturojošā vidējā kvadrātiskā kļūda σ (otrā atslēga), histogrammu formējošais pikseļu skaits reprezentēts ar gaišuma intensitāti 2D fāžu telpas koordinātu plaknē. Redzam, ka fāžu telpā ir noformējušies divi atdalāmi klasteri, kas atbilst divām izteiktām attēla klasēm. Turklāt redzams arī tas, ka, izmantojot viendimensionālu histogrammu (pa x asi), šis attēla klases segmentēt nav iespējams. Divdimensionālās sliekšņu metodes segmentācijas algoritmus parasti veido, aproksimējot iegūtos klasterus ar elipsēm, jo šādi algoritmi labi saskaņojas ar korelāciju teorijas metodēm.

Izmantojot 2D segmentāciju, ko vairāku interpretācijas atslēgu izmantošanas gadījumā nav grūti vispārināt arī N -dimensionālām fāžu telpām, var iegūt daudz labākus un precīzākus segmentācijas rezultātus. Īpaši efektīvi šāda pieeja darbojas, izmantojot objekta krāsas (tona) interpretācijas atslēgu. Jo, kā jau iepriekš minēts, objekta krāsas toni nosaka visu analīzei izmantoto N multispektrālo kanālu pikseļu intensitāšu vērtības, t. i., krāsa (tonis) ir uzskatāms par N -dimensionālu interpretācijas atslēgu “saišķi”. To izmantojot, tiek formētas N -dimensionālas spektrālās fāžu telpas un veidoti atbilstoši un efektīvi segmentācijas un klasifikācijas algoritmi.

3.4.6. Vadītā klasifikācija

Vadītā klasifikācija atšķiras no nevadītās ar to, ka vispirms tiek identificētas visas faktiskās klases un katrā no tām izvēlēti klasei tipiski apmācības apgabali (kas sastāv no vairākām atbalsta datu vienībām). Šie apgabali (to vienības) savukārt tiek identificēti attēlos, un tikai to pikseļu vērtības tiek izmantotas klasteru aprēķināšanai iepriekš apskatītajās N -dimensionālajās fāžu telpās. Tādējādi katrs no klasteriem garantēti raksturo kādu no identificētajām faktiskajām klasēm (skat. 3-57. att.). Ja klasteri nepārklājas, tos iespējams segmentēt. Komplicētāka situācija veidojas, klasteriem saplūstot, kā 3-57. att. redzamajā gadījumā tas ir ar zāles (f) un labības (e) klasēm. Lai atdalītu šīs klases, nepieciešama kādas citas (vēl neizmantotas) interpretācijas atslēgas lietošana. Apmācības apgabalu klasterus, līdzīgi kā iepriekš, bieži aproksimē ar elipsēm (vai elipsoīdiem N -dimensionālajā gadīju-



3-57. att. Faktisko klašu apmācības apgabalu 2D klasteri.

mā), aprēķinot šo elipsu centrus un citus parametrus. Šo klasifikācijas fāzi dēvē par algoritma apmācīšanu.

Tikai pēc tam vadītās klasifikācijas metodē tiek veikta segmentācija, izmantojot daudzdimensionālu sliekšņu metodi, analizējot attēla pikseļu tuvumu šādi atdalīto un formalizēto apmācības apgabalu klasteriem N -dimensionālā fāžu telpā. Līdz ar to tiek nodrošināta visu identificēto faktisko klašu klātbūtne un interpretācija satelītattēlā. Vadītās klasifikācijas pozitīvā iezīme ir tā, ka pirms segmentācijas iespējams novērtēt, vai interpretācijas atslēgas un apmācības apgabali ir izvēlēti veiksmīgi. Ja tā nav, tad nepieciešamības gadījumā tos vēl iespējams mainīt.

3.4.7. Atbalsta dati un to loma

Atbalsta dati, ko izmanto interpretācijas un klasifikācijas veikšanai, var būt ļoti dažādi. Tie var būt:

- dati, kas speciāli iegūti īpaši izvēlētās vietās (tie bieži ir spektrālie dati, jo spektrālās fāžu telpas ir vienas no visvairāk izmantotajām gan vadītās, gan nevadītās klasifikācijas algoritmos un metodēs);
- no citiem avotiem iegūta informācija (internets, statistikas dati, kartogrāfiskais materiāls u. c.);
- citu tālzipētes mērījumu vai interpretācijas rezultāti (piemēram, no aeroplatformām).

Taču galvenā atbalsta datu kopīgā īpašība (salīdzinājumā ar tālzipētes datiem) ir tā, ka tiem (1) ir mazs pārklājums (tie ir lokalizēti) un (2) tiem ir augsta izšķirtspēja (tie ir precīzi). Turklāt jāņem vērā, ka atbalsta datu iegūšana ir dārga, tā veido ap 30 % no tālzipētes informācijas produktu vērtības. Satelītdatiem ir tendence kļūt lētākiem, bet atbalsta datu ieguves izmaksas nesamazinās, tādējādi nākotnē šīs izmaksu daļas relatīvā ietekme būs vēl lielāka.

Pirms atbalsta datu iegūšanas ir jāizvēlas tā pārklājuma daļa¹⁶, kas nosaka, cik liela pētāmā apgabala daļa tiks noklāta ar atbalsta datiem. Ņemot vērā atbalsta datu ieguves augstās izmaksas, pārklājuma daļu tālzipētes datiem bieži izvēlas robežās no 0,01 % līdz 1 %. Pēc tam jāizvēlas atbalsta datu vienību skaits un to izmēri. Nav jēgas izvēlēties vienības ar lineārajiem izmēriem y , kas mazāki par rezeļa izmēriem d , īstenībā arī tādas ir pārāk sīkas, jo jāreķinās ar pozicionēšanas kļūdām, kuru lielums s nav mazāks par $d/2$. Rūpīgāka analīze rāda, ka ir lietderīgi izvēlēties vismaz $y = d + 2s \approx 2d$ izmēra atbalsta datu vienības. Teorētiski, ja izvēlēta pārklājuma daļa un atbalsta datu vienības izmēri (zināms to laukums), tad, izdalot vienu ar otru, iegūst šo vienību skaitu. Taču vienību skaits L nedrīkst būt pārāk mazs, jo tad neizdosies atklāt klasifikācijas kļūdas. Klasifikācijas kļūdu atklāšanas varbūtību iespējams izrēķināt teorētiski, ja zināms L un klasifikācijas kļūdas varbūtība. Tālzipētes datiem klasifikācijas kļūdu neatklāšanas varbūtība nedrīkst pārsniegt 10 % līdz 15 %, kartogrāfisko datu klasifikācijas gadījumos 5 %. Lai to nodrošinātu, vienību skaitam katrā klasē jābūt aptuveni robežās no $L_{\min} = 15$ līdz $L_{\max} = 60$.

Atbalsta datu vienības parasti izvēlas vienā no diviem veidiem:

- vienādas un regulāras (ģeometriskā nozīmē, t. i., vienādus riņķus, kvadrātus, taisn-

¹⁶ Angļu val. – *sampling fraction*.

stūrus u. tml.);

- dažādas un neregulāras.

Strādājot ar vienādām un regulārām atbalsta datu vienībām, ir jāsaskaras ar problēmu, ka šīs vienības ir grūti precīzi lokalizēt, jo tās nav saistītas ar kādām ģeogrāfiskām struktūrām. Turklāt tajās var būt dažādu klašu elementi, jo var atrasties uz klašu robežām. Tad atbalsta datu vienības parasti izvieto vai nu regulāri, vai arī stohastiski, t. i., izmantojot 2D gadījuma punktu ģeneratoru satelītattēlā redzamajā Zemes virsmas apgabalā.

Otrajā gadījumā (vienības dažādas un neregulāras) lokalizācija ir veicama viegli, jo par vienībām parasti izvēlas kādus administratīvi vai ģeogrāfiski determinētus objektus (bieži satelītattēlos viegli identificējamus zemes īpašumus vai to daļas). Nav problēmu arī ar klašu pārklāšanos, jo šādas vienības parasti ir homogēnas. Nepieciešamības gadījumā iespējams atbalsta datus viegli pārbaudīt vai pārmērīt. Zināmas problēmas var radīt tikai šo atbalsta datu statistiskā nehomogenitāte vienību dažādā izmēra, formas un izvietojuma dēļ. Jo šajā gadījumā atbalsta datu vienību izvietojums ir neregulārs un parasti atbilst stratificētās stohastiskās klasifikācijas [4] nosacījumiem.

3.4.8. Klasifikācijas precizitātes novērtēšana

Tālīzpētes attēlu klasifikācijas rezultāts ir ļoti atkarīgs gan no izvēlēta segmentācijas algoritma, gan no izmantotajiem atbalsta datiem. Izmantojot atšķirīgus algoritmus un atbalsta datus, nereti iegūst arī atšķirīgus klasifikācijas rezultātus (skat. 3-58. att.). Tādēļ, lai novērtētu klasifikācijas rezultāta precizitāti, tiek veikta to pārbaude, izmantojot atbalsta datu vienības. Var izmantot gan algoritma apmācības procesā (vadītās klasifikācijas gadījumā) izmantotās vienības, gan arī speciālu kontrolapgabalu vienības. Otrais variants ir vairāk iesakāms, jo klasifikācijas rezultātu novērtējums pēc apmācības apgabalu vienībām var dot pārāk optimistisku rezultātu. Attēlu klasifikācijas rezultātu novērtējumu ir pieņemts raksturot ar t. s. klasifikācijas kļūdu matricām, kādas redzamas 3-59. un 3-60. att.

Kļūdu matricās ar A, B, C, D, E, F apzīmētas faktiskās (zemes) klases, ar a, b, c, d, e, f – formālās (attēla) klases. Matricas pirmajā rindīnā uzrādīts, cik atbalsta datu vienību, kas klasificētas kā piederīgas formālajai (a) klasei, īstenībā atbilst dažādām faktiskajām klasēm. Līdzīga informācija ir arī citās kļūdu matricas rindīnās. Savukārt matricas pirmajā kolonnā redzams, cik atbalsta datu vienību, kas pieder faktiskajai (A) klasei, ir klasificētas kā piederīgas dažādām formālajām (attēla) klasēm. Līdzīgi ir arī citās šīs matricas kolonnās.

Izmantojot kļūdu matricas, tiek rēķināti arī citi klasifikācijas precizitāti raksturojoši



3-58. att. Klasifikācijas rezultātu atšķirību piemērs [33].

lielumi. Par interpretētāja precizitāti katrai faktiskajai (zemes) klasei sauc šīs matricas diagonālā elementa (kas raksturo pareizi klasificēto vienību skaitu) dalījumu ar atbilstošās kolonnas pilno vienību skaitu. Par faktiskajai klasei atbilstošo izlaišanas (jeb omisijas) kļūdu sauc šīs kolonnas nediagonālo elementu summas (kas raksturo nepareizi klasificēto vienību skaitu) dalījumu ar atbilstošās kolonnas pilno vienību skaitu. Par lietotāja precizitāti katrai formālajai klasei sauc šīs matricas diagonālā elementa (kas raksturo pareizi klasificēto vienību skaitu) dalījumu ar atbilstošās rindiņas pilno vienību skaitu. Par formālajai klasei atbilstošo apstiprinājuma (jeb komisijas) kļūdu sauc šīs rindiņas nediagonālo elementu summas (kas raksturo nepareizi klasificēto vienību skaitu) dalījumu ar atbilstošās rindiņas pilno vienību skaitu. Savukārt klasifikācijas kopējo precizitāti aprēķina kā kļūdu matricas visu diagonālo elementu summas (kas raksturo pilno pareizi klasificēto vienību skaitu) dalījumu ar visu kontrolei izmantoto atbalsta datu vienību skaitu.

Tādējādi interpretētāja precizitāte raksturo varbūtību, ka tas, kas faktiski ir “ūdens”, patiešām ir klasificēts kā “ūdens”. Savukārt lietotāja precizitāte raksturo varbūtību, ka tas, kas ir klasificēts kā “ūdens”, patiesībā arī ir “ūdens”. Abu iepriekšējo attēlu (3-59. att. un 3-60. att.) skaitlisko vērtību salīdzināšana uzskatāmi parāda, ka klasifikācijas precizitātes novērtējums, izmantojot apmācības apgabala vienības, ir optimistiskāks, nekā izmantojot speciāli izvēlētu kontrolapgabalu vienības.

Precīzākai klasifikācijas rezultātu kvantitatīvai novērtēšanai tālizpētē nereti izmanto t. s. “*kappa*” statistiku [34], saskaņā ar kuru klasifikācijas precizitāti izsaka formula

$$\kappa = \frac{p - e(x)}{1 - e(x)} \quad (3.28.)$$

Klases	A	B	C	D	E	F	Kopā	Komisijas kļūda %	Lietotāja precizitāte %
a (ūdens)	48	0	1	0	0	0	49	2	98
b (zeme)	0	5	0	2	0	0	7	29	71
c (mežs)	0	0	31	4	0	0	35	11	89
d (apbūve)	0	2	0	13	0	0	15	13	87
e (labība)	0	0	0	4	34	8	46	26	74
f (zāle)	0	0	4	2	6	36	48	25	75
Kopā	48	7	36	25	40	44	200		
Omisijas kļūda %	0	29	14	48	15	18			84
Interpretētāja precizitāte %	100	71	86	52	85	82			Vispārīgā precizitāte %

3-59. att. Klasifikācijas kļūdu matrica, izmantojot apmācības apgabalu vienības.

Klases	A	B	C	D	E	F	Kopā	Komisijas kļūda %	Lietotāja precizitāte %
a (ūdens)	23	0	0	1	0	0	24	4	96
b (zeme)	0	22	0	9	0	0	31	29	71
c (mežs)	0	0	36	23	0	1	60	40	60
d (apbūve)	0	10	0	40	1	0	51	22	78
e (labība)	0	0	5	13	19	8	45	58	42
f (zāle)	0	0	2	8	4	22	36	39	61
Kopā	23	32	43	94	24	31	247		
Omisijas kļūda %	0	31	16	57	21	29			66
Interpretētāja precizitāte %	100	69	84	43	79	71			Vispārīgā precizitāte %

3-60. att. Klasifikācijas kļūdu matrica, izmantojot kontrolapgabalu vienības.

kur p – normēta kļūdu matricas diagonālo elementu x_{ii} summa

$$p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^K x_{ii}$$

K – analizējamo klašu skaits, L – izmantoto kontrolapgabalu vienību skaits. Savukārt

$$e(x) = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^K (x_{i+} x_{+i})$$

kur x_{i+} – kopīgais vienību skaits rindīnā ar indeksu i , x_{+i} – kopīgais vienību skaits kolonnā ar indeksu i . Tādējādi

$$\kappa = \frac{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^K x_{ii} - \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^K (x_{i+} x_{+i})}{1 - \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^K (x_{i+} x_{+i})} = \frac{L \sum_{i=1}^K x_{ii} - \sum_{i=1}^K (x_{i+} x_{+i})}{L^2 - \sum_{i=1}^K (x_{i+} x_{+i})} \quad (3.29.)$$

Izmantojot formulu (3.29.) 3-60. att. redzamajai kļūdu matricai, iegūstam $\kappa = 0,57$, kas ir sliktāks klasifikācijas novērtējums nekā šīs matricas kopējā precizitāte. Tas ir tādēļ, ka iepriekšējie precizitātes novērtējumi izmantoja tikai kļūdu matricas diagonālos elementus, kamēr “*kappa*” statistikas novērtējumā ņemta vērā arī matricas nediagonālo elementu ietekme (t. i., izlaišanas un apstiprinājuma kļūdas). Bez apskatītajiem lieto arī citus statistiskus parametrus klasifikācijas rezultātu precizitātes raksturošanai.

3.4.9. Nobeiguma piezīmes

Lai arī klasifikācijas rezultātu novērtējumi, kas iegūti ar kļūdu matricām, reizēm izskatās visai viduvēji, tas nenozīmē, ka specifiskiem lietotājiem tie ir slikti vai neprecīzi. Tādēļ bez apskatītajiem klasifikācijas precizitātes rādītājiem atbalsta datu vienību līmenī (to nereti dēvē par pikseļu līmeni) izmanto arī analizējamo vienību (teiksim, zemes gabalu vai citu ģeogrāfisko vienību) identifikācijas un klasifikācijas precizitāti. Šajā gadījumā atsevišķas datu vienības (pikseļi) var būt klasificētas kļūdaini, ja tikai tas nenojauc analizējamo vienību pareizu klasifikāciju.

Analizētās, ar segmentāciju saistītās klasifikācijas metodes izmanto pieeju, ka interpretācijas atslēgas tiek piemērotas katra atsevišķa pikseļa parametru vērtībām (t. s. pikseļu orientētie algoritmi). Taču, izvērtējot 3.4.4. sadaļā uzskaitītās interpretācijas atslēgas, redzams, ka bez objekta krāsas (toņa) un nosacīti arī objekta tekstūras, citas atslēgas pikseļu līmenī vispār nav izmantojamas. Lai strādātu ar tām, ir izveidotas atšķirīgas interpretācijas metodes un algoritmi, ko sauc par objektorientētiem algoritmiem. Tie parasti ir daudz komplicētāki, bet arī efektīvāki interpretācijas algoritmi, kas ļauj datorizēti identificēt kompleksus attēla objektus, ne tikai veikt tā klasifikāciju. Šo algoritmu veidošanai izmanto matemātiskās modelēšanas nestrukturētos modeļus, pazīstamākie no kuriem ir neironu tīklu algoritmi.

3.5. Mākslīgie neironu tīkli un klasifikācija (20. lekcija)

3.5.1. Kopsavilkums

Iepazīsimies ar mākslīgajiem neironu tīkliem un tos veidojošajiem elementiem – perceptroniem. Analizēsim perceptronu apmācības algoritmus lineāri atdalāmu un lineāri neatdalāmu tēlu klasēm (fiksētā inkrementa algoritmu). Daudzlīmeņu neironu tīkla gadījumam detalizēti apskatīsim būtisko atpakaļapmācības algoritmu. Nobeigumā tiks sniegts pārskats par atšķirīgas arhitektūras neironu tīkliem, attēlu klasifikācijai svarīgo konvolūcijas neironu tīklu, konvolūcijas un grupēšanas slāņiem un dziļo apmācību.

3.5.2. Nestrukturētā modelēšana

Iepriekš apskatītā tālīzpētes attēlu klasifikācija bija strukturēta, t. i., tika izmantots noteikts klasifikācijas modelis, proti, attēla segmentācija, lietojot iepriekš izvēlētas interpretācijas atslēgas. Process tika iesākts ar šī modeļa parametru (interpretācijas atslēgu) vērtību noteikšanu, izmantojot atbalsta tēlus (prototipus) no dažādām attēla klasēm. Šo parametru noteikšanas procedūru dēvē par klasifikatora apmācību, un, kad tā veikta, klasifikācijas veiksmi nosaka izvēlēta modeļa atbilstība īstenībai. Ja apmācības fāzē varētu iekļaut arī modeļa izveidi (strukturēšanu), tad varētu sagaidīt labākus klasifikācijas rezultātus.

Šāda veida risinājumus piedāvā t. s. nestrukturētā (matemātiskā) modelēšana¹⁷, un tās viens no būtiskiem instrumentiem ir mākslīgie neironu tīkli – elementāru nelineāru skaitļošanas elementu (perceptronu) sistēmas, kuru organizācija atgādina neironu savienojumu dzīvu būtnu smadzenēs (ciktāl mēs to izprotam).

Interese par mākslīgajiem neironu tīkliem (NT) radās 1943. gadā pēc Vorena Makaloha un Voltera Pitsa publikācijas [59], kurā analizēts binārs mākslīgais NT. 20. gadsimta 50. un 60. gados sākās “apmācāmu mašīnu” teorijas matemātisko metožu izstrāde, kas sākotnēji šķita visai cerīga arī klasifikācijas problēmu risināšanā [23]. Taču šī teorija tās sākuma posmā nebija izmantojama NT apmācības algoritmu izstrādei. Tas izraisīja vilšanos un pētījumu finansējuma apsūkumu [60]. Taču vēlāko gadu atklājumi deva pozitīvus rezultātus un ir atjaunojuši interesi par “apmācāmajām mašīnām” un ar tām saistītajiem algoritmiem. Pēdējo gadu sasniegumi datorzinātnē un pastiprināta interese par mākslīgā intelekta un lielo datu apstrādes algoritmiem ir ievērojami stimulējuši arī nestrukturētās matemātiskās modelēšanas progresu, un tā ir kļuvusi par populārās “mašīnmācīšanas” vienu no centrālajām sastāvdaļām.

3.5.3. Perceptrons divām tēlu klasēm

Mākslīgo neironu tīklu (NT) arhitektūra ir veidota līdzīgi neironu savienojumu struktūrai dzīvu būtnu smadzenēs (3-62. att.), taču šī struktūra ir vienkāršota un regularizēta, tādēļ nevajadzētu pārspīlēt līdzību starp mākslīgajiem NT un cilvēka smadzenēm. Māks-

¹⁷ Mūsdienās tā kļuvusi populāra, pateicoties t. s. “mašīnmācīšanai” (angļu val. *machine learning*).

līgos neironu tīklus veido no algoritmiskiem elementiem, ko sauc par perceptroniem [23]. Tie savukārt sastāv no divām komponentēm: summatora un aktivācijas elementa.

Šo konceptu un tā lietojuma pamatidejas mūsdienu traktējumā pirmais piedāvāja [73] amerikāņu fiziologs un matemātiķis Frenks Rozenblats (1928–1971).

Perceptrona ievaddatus parasti veido kāda objekta deskriptoru vektors (jeb tēls), kur par deskriptoriem sauksim izvēlēto interpretācijas atslēgu vērtības $\underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^{T18}$. Perceptrona summators aprēķina šī tēla deskriptoru svarotu summu

$$I(\underline{x}) = \sum_{i=1}^n w_i x_i = \underline{w}^T \underline{x}$$

kur w_i sauc par perceptrona svaru koeficientiem (vai vienkārši svāriem). Savukārt aktivācijas elements nelineāri transformē funkcijas $I(\underline{x})$ vērtību un noformē to kā skalāru perceptrona izvades vērtību (t. i., tā darbības rezultātu) formā¹⁹

$$O(\underline{x}) = h_b(I(\underline{x}) + b)$$

kur h_b – aktivācijas funkcija, kas atkarīga arī no skalāra parametra b , ko sauc par aktivācijas nobīdi. Ņemot to vērā, perceptrona matemātisko modeli var apvienot formā

$$O = h_b(I + b) = h_b\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right)$$

Aktivācijas elements var realizēt dažādas aktivācijas funkcijas h_b , tostarp transformāciju uz bināro kodu, piemēram, formā

$$h_b(\underline{x}) = \begin{cases} +1 & \text{if } (I + b) > 0 \\ -1 & \text{if } (I + b) < 0 \end{cases}$$

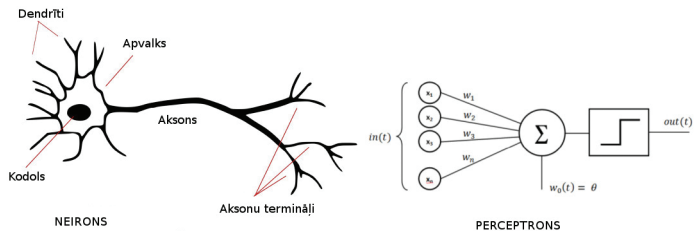
Tādējādi viens perceptrons spēj sagrupēt tēlus divās klasēs (kurām šajā gadījumā atbilst tā izvades vērtības +1 un -1), savukārt vienādojums

$$I(\underline{x}) + b = 0$$

definē n -dimensionālu hiperplakni deskriptoru fāžu telpā, kas atdala šīs divas klases.



3-61. att. Frenks Rozenblats.



3-62. att. Bioloģiskās nervu šūnas un perceptrons.

18 Ar T šeit apzīmēta vektora (matricas) transponēšana.

19 Šeit ar I un O apzīmētas aktivācijas elementa ievades un izvades vērtības (angļu val. *Input* un *Output*).

Par perceptrona apmācību sauc tādu tā svaru vektora $\underline{w}$ un aktivācijas nobīdes b vērtību atrašanu, kas atbilstoši apskatītajam algoritmam veic pareizu tēlu sagrupēšanu klasēs. Perceptrona apmācīšanai izmanto abu apskatāmo klašu atbalsta tēlus (prototipus), kuros ir marķieri (iezīmes), t. i., piederības zīmes vienai vai otrai no minētajām klasēm.

3.5.4. Perceptronu apmācības algoritmi

Lineāri atdalāmu klašu gadījums

Aktivācijas nobīdi b nereti iekļauj svaru vektorā $\underline{w}$ kā $(n+1)$ elementu, deskriptoru vektoram šādā gadījumā arī pievieno $(n+1)$ elementu, kas identiski vienāds ar 1. Tad perceptrona matemātisko modeli var pārveidot

$$O = h\left(\sum_{i=1}^{n+1} w_i y_i\right) = h(\underline{w}^T \underline{y})$$

kur $\underline{y}^T = \{x_1, \dots, x_n, 1\}$, $\underline{w}^T = \{w_1, \dots, w_n, b\}$, kas no algoritmiskā viedokļa ir nedaudz kompaktāk un ērtāk nekā iepriekš apskatītā forma.

Analizējot perceptronu apmācības iespējas, dažādi autori [23, 70] ir secinājuši, ka lietderīgi rīkoties šādi – izvēlamies patvaļīgu paplašinātā svaru vektora sākuma tuvinājumu $\underline{w}_{(0)}$. Ja k -tajā apmācības solī atbalsta tēls (prototips) $\underline{y}_{(k)} \in K_1$, t. i., pieder klasei K_1 , bet binārās aktivācijas funkcijas vērtība ir negatīva $h_{(k)} = -1$ (t. i., klasifikācija veikta nepareizi), tad paplašināto svaru vektoru koriģē formā

$$\underline{w}_{(k+1)} = \underline{w}_{(k)} + \alpha \underline{y}_{(k)}$$

kur $\alpha = \text{const}$ (t. s. korekcijas inkrements). Ja savukārt $\underline{y}_{(k)} \in K_1$ un $h_{(k)} = +1$ vai arī $\underline{y}_{(k)} \in K_2$ un $h_{(k)} = -1$ (t. i., klasifikācija veikta pareizi), tad paplašināto svaru vektoru nemaina. Visbeidzot, ja $\underline{y}_{(k)} \in K_2$ bet $h_{(k)} = +1$ (t. i., klasifikācija veikta nepareizi), tad paplašināto svaru vektoru koriģē formā

$$\underline{w}_{(k+1)} = \underline{w}_{(k)} - \alpha \underline{y}_{(k)}$$

Iterācijas veic, izmantojot visus atbalsta tēlus vairākas reizes tik ilgi, kamēr paplašinātais svaru vektors vairs nemainās. Šo algoritmu sauc par fiksētā inkrementa algoritmu, un tas konverģē pēc galīga soļu skaita, ja atbalsta tēlu klases K_1 un K_2 ir lineāri atdalāmas, t. i., tēlu fāžu telpā eksistē hiperplakne, kas šīs klases precīzi atdala.

Lineāri neatdalāmu klašu gadījums

Lineāri neatdalāmu klašu gadījumos visbiežāk izmanto mazāko kvadrātu metodi, t. i., meklē tādu paplašināto svaru vektoru, kas minimizē skalāru funkcionāli

$$J(\underline{w}) = \frac{1}{2} \left(\underline{r} - \underline{w}^T \underline{y} \right)^2$$

uz visiem izmantojamajiem atbalsta tēliem. Šeit $\underline{r}$ – vērtība (zināma), kādu vēlamies iegūt katram atbalsta tēlam, lai sekmīgi atdalītu divas to klases. Īstenojot gradienta metodi, nav grūti pierādīt [23, 71], ka šādā gadījumā nonākam pie algoritma (ar inkrementu $\alpha = \text{const} > 0$)

$$\underline{w}_{(k+1)} = \underline{w}_{(k)} - \alpha \frac{\partial J}{\partial \underline{w}} \bigg|_{\substack{\underline{w}=\underline{w}_{(k)} \\ \underline{y}=\underline{y}_k}}$$

kur

$$\frac{\partial J(\underline{w})}{\partial \underline{w}} = -(r - \underline{w}^T \underline{y}) \underline{y}$$

proti,

$$\underline{w}_{(k+1)} = \underline{w}_{(k)} + \alpha \left(r_k - \underline{w}_{(k)}^T \underline{y}_k \right) \underline{y}_k$$

savukārt r_k vērtības zināmas katram prototipam (atbalsta tēlam) un caur tiem attiecināmas uz k -to iterāciju.

Definējot lielumu $e_{(k)}$, kas raksturo sistemātisko kļūdu, ko rada paplašinātā svaru vektora $\underline{w}_{(k)}$ lietošana atbalsta tēlam (prototipam) $\underline{y}_k$ (skat. funkcionāļa J definīciju)

$$e_{(k)} = r_k - \underline{w}_{(k)}^T \underline{y}_k$$

Pēdējo izteiksmi var pārveidot formā

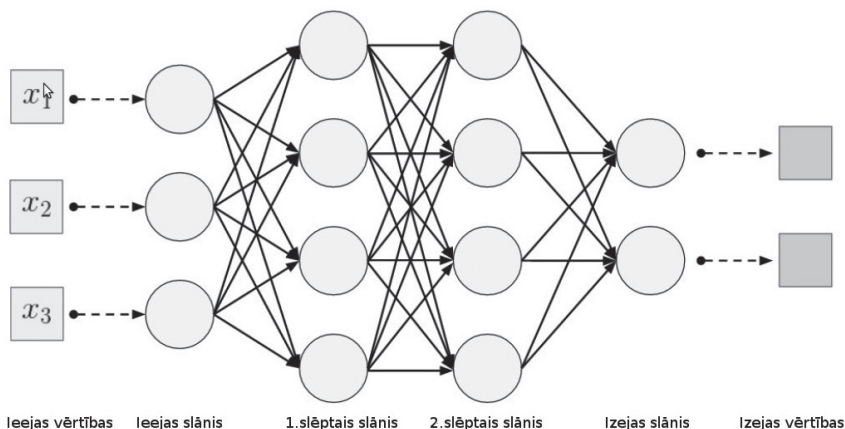
$$\underline{w}_{(k+1)} = \underline{w}_{(k)} + \Delta \underline{w}_{(k)}$$

$$\Delta \underline{w}_{(k)} = \alpha e_{(k)} \underline{y}_k$$

Pēdējās trīs formulas reprezentē delta korekcijas algoritmu [61], un nav grūti pierādīt, ka tas īsteno jau minēto gradienta metodi. Šo algoritmu darbina ciklā, kamēr kļūdas $e_{(k)}$ nostabilizējas minimālā līmenī uz atbalsta tēlu kopas. Algoritma konverģence nav pierādīta, taču tas reāli darbojas ar gradienta metodei piemītošajām īpatnībām (proti, iespējama konverģence uz lokāliem minimumiem). Inkrementu α parasti izvēlas no diapazona $0,1 \leq \alpha \leq 1,0$, iterācijas veic pa visiem atbalsta tēliem vairākas (nereti daudzas) reizes.

3.5.5. Daudzlīmeņu neironu tīkli

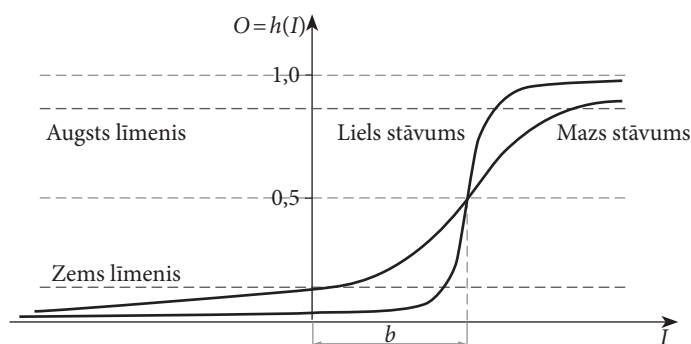
No perceptroniem formē mākslīgos (matemātiskos) neironu tīklus un veido tiem atbilstošus apmācības algoritmus [23, 74]. Iepazīšanos ar tiem sāksim ar pilnīgi savienotajiem (sajūgtajiem) neironu tīkliem, kuru arhitektūra parādīta 3-63. att.



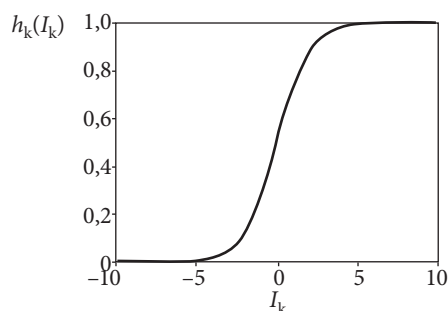
3-63. att. Pilnīgi savienota (sajūgtā) neironu tīkla arhitektūra.

Pilnīgi sajūgtā NT katra perceptrona summatora ieejā nonāk visu iepriekšējā slāņa perceptronu izejas vērtības. Savukārt tā izejas vērtība tiek nodota visu nākamā slāņa perceptronu summatoriem. Ieejas slānī parasti izvēlas tik mezglu, cik liela ir izmantoto ieejas tēlu dimensionalitāte, izejas slānī – tik, cik ir izejas klašu skaits. Aktivācijas funkciju visbiežāk izvēlas gludu (t. i., bez lauzumiem vai pārrāvumiem), lai to būtu iespējams diferencēt visos tās punktos. Bieži, bet ne visos gadījumos kā aktivācijas funkciju lieto t. s. sigmoīdu, t. i., funkciju

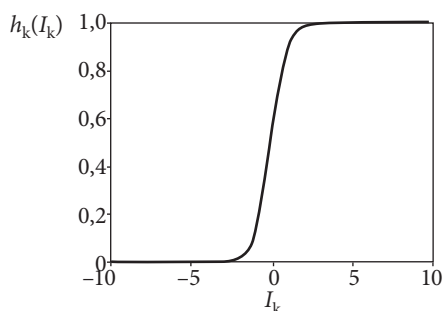
$$h_j(I_j) = \frac{1}{1 + e^{-(I_j - b_j)/s}}$$



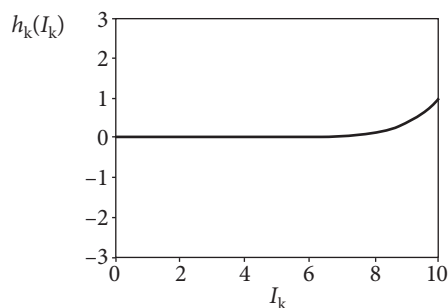
3-64. att. Dažāda stāvuma s vērtību sigmoīdas grafiki.



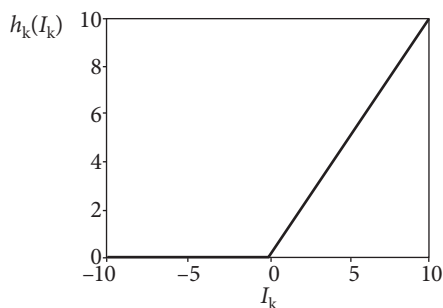
(a) Sigmoīda



(b) Hiperboliskais tangenss



(c) Softmax



(d) ReLU

3-65. att. Biežāk lietoto aktivācijas funkciju grafiki.

kur I_j – aktivācijas elementa ieejas vērtība katrā j -tā slāņa perceptronā (ar indeksu j), b_j – aktivācijas nobīde, s raksturo sigmoīdas stāvumu.

Kā aktivācijas funkciju lieto ne tikai sigmoīdu, bet arī virkni citu funkciju, proti, lineāru funkciju, hiperbolisko tangensu, kalibrēto lineārās vienības funkciju “ReLU” jeb $h_j(I_j) = \max(0, I_j)$, kā arī t. s. *softmax* funkciju, kuras vērtības raksturo matemātisko varbūtību, ar kādu klasificējama objekts pieder konkrētajai klasei.

Piemērotas aktivācijas funkcijas izvēle dažādiem NT slāņiem ir svarīga, lai īstenotu sekmīgus to apmācības algoritmus un nepieļautu t. s. NT pārtrenēšanu jeb pielāgošanos mērījumu trokšņiem (stohastiskajām kļūdām).

3.5.6. Atpakaļapmācības algoritms

Apmācīta NT izejā īstajai klasei K_j atbilstošajā mezglā jābūt “augstam” signāla līmenim, citos mezglos – “zemam”. Apmācības algoritmam ir jānosaka (jāaprēķina) visas svaru koeficientu w_{jk} vērtības visos NT slāņos, kā arī aktivācijas nobīdes b_j tā, lai NT darbotos (t. i., veiktu klasifikāciju) pareizi. Šī algoritma pamatidejas pirmo reizi tika publicētas 1986. gadā [72], šeit tās izklāstītas saskaņā ar publikāciju [23].

Apskatīsim trīs secīgus NT slāņus un apzīmēsim tos ar indeksiem J, P un Q. Pēdējā (izejas) slānī Q varam ieviest vidēji kvadrātisko funkcionāli

$$J = J_Q = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{N_Q} (r_q - O_q)^2$$

ko centīsimies minimizēt, koriģējot svaru matricas elementus w_{qp} (Q slāņa perceptroniem ar N_p ieejām no iepriekšējā P slāņa) līdzīgi tam, kā to darijām iepriekš (t. i., izmantojot gradienta metodi).

$$\Delta w_{qp} = -\alpha \frac{\partial J}{\partial w_{qp}}$$

kur

$$\frac{\partial J}{\partial w_{qp}} = \frac{\partial J}{\partial I_q} \frac{\partial I_q}{\partial w_{qp}}$$

un

$$\frac{\partial I_q}{\partial w_{qp}} = \frac{\partial}{\partial w_{qp}} \sum_{p=1}^{N_p} w_{qp} O_p = O_p$$

Tātad

$$\Delta w_{qp} = -\alpha \frac{\partial J}{\partial I_q} O_p = \alpha \delta_q O_p$$

kur

$$\delta_q = -\frac{\partial J}{\partial I_q} = -\frac{\partial J}{\partial O_q} \frac{\partial O_q}{\partial I_q}$$

No funkcionāla definīcijas

$$\frac{\partial J}{\partial O_q} = -(r_q - O_q)$$

un

$$\frac{\partial O_q}{\partial I_q} = \frac{\partial h_Q(I_q)}{\partial I_q} = h'_Q(I_q)$$

Tādējādi

$$\Delta w_{qp} = \alpha \delta_q O_p = \alpha (r_q - O_q) h'_Q(I_q) O_p$$

Šajā izteiksmē visi lielumi ir zināmi, jo “pareizās atbildes” r_q atbalsta tēliem ir zināmas. Tātad Δw_{qp} var izrēķināt un izmantot svaru matricas elementu w_{qp} koriģēšanai. Taču iekšējos (jeb slēptajos) neironu tīkla slāņos šādi rīkoties diemžēl nevar, jo tur “pareizās atbildes” nav zināmas. Šis apstāklis bija viens no galvenajiem iemesliem, kas pagājušā gadsimta nogalē izraisīja jau pieminēto intereses apsūkumu par NT, jo bez apmācības algoritmiem NT nav izmantojami. Tādēļ rūpīgāk apskatīsim iepriekšējo P slāni, kas atrodas pirms Q slāņa un kuram svaru matricas elementu korekciju aprēķināšanai zināmi visi lielumi, izņemot

$$\delta_p = -\frac{\partial J_p}{\partial I_p} = (r_p - O_p) h'_P(I_p)$$

jo nav zināmas r_p vērtības (iekšējās jeb slēptās “pareizās atbildes”). Tādēļ rīkosimies citādi:

$$\delta_p = -\frac{\partial J_p}{\partial I_p} = -\frac{\partial J_p}{\partial O_p} \frac{\partial O_p}{\partial I_p} = -\frac{\partial J_p}{\partial O_p} h'_P(I_p)$$

Savukārt

$$-\frac{\partial J_p}{\partial O_p} = -\sum_{q=1}^{N_Q} \frac{\partial J_p}{\partial I_q} \frac{\partial I_q}{\partial O_p} = \sum_{q=1}^{N_Q} \left(-\frac{\partial J_p}{\partial I_q} \right) \frac{\partial}{\partial O_p} \sum_{p=1}^{N_P} w_{qp} O_p = \sum_{q=1}^{N_Q} \left(-\frac{\partial J_p}{\partial I_q} \right) w_{qp} = \sum_{q=1}^{N_Q} \delta_q w_{qp}$$

jo

$$\frac{\partial J_p}{\partial I_q} = \frac{\partial J}{\partial I_q} = \delta_q$$

tādēļ, ka nav specifiska J_p , kas ir jāminimizē, ir viens un tas pats vidēji kvadrātiskais funkcionālis J , ko cenšamies minimizēt katrā NT slānī. Tātad

$$\Delta w_{pj} = \alpha \delta_p O_j$$

$$\delta_p = h'_P(I_p) \sum_{q=1}^{N_Q} \delta_q w_{qp}$$

kur NT slānis ar indeksu J atrodas pirms slāņa ar indeksu P , un apmācības procesu šādā veidā (atpakaļvirzienā) varam turpināt arī tālāk līdz pat ieejas slānim. Izveidojas pat ļoti vienkāršs algoritms (skat. pēdējās divas formulas slānim P , ja tas ir iekšējais jeb slēptais slānis). Ja slānis P ir pēdējais (t. i., izejas slānis), tad

$$\delta_p = h'_P(I_p) (r_p - O_p)$$

Protams, arī apmācīts NT var nedot pareizu klasifikācijas rezultātu, kas visbiežāk izpaužas kā neviennozīmīgi signālu līmeņi NT izejā, t. i., vairāki “augsti” līmeņi izejā, vai arī neviens. Jāizvairās arī no jau pieminētās tīkla “pārtrenēšanas”.

3.5.7. Konvolūcijas neironu tīkli

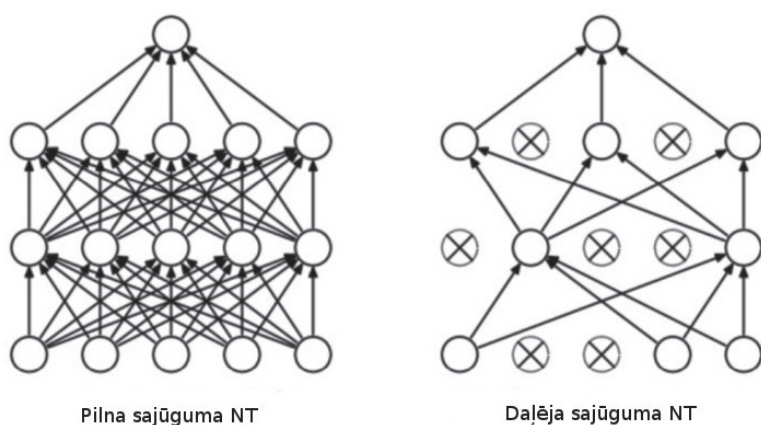
Mākslīgos NT izmanto arī tālīzpētes attēlu klasifikācijai. Šajā gadījumā kā tēlus var apskatīt atsevišķus pikselus (to spektrālo komponentu vektorus). Taču tad veidojas ārkārtīgi apjomīgi NT. Jau 256×256 pikseļu attēlā ir 65 536 ieejas tēli ar 256 intensitāšu līmeņiem,

kas sešu spektrālo kanālu gadījumā veido $\sim 10^8$ parametru kopu. Strādājot ar lielākiem attēliem, situācija kļūst vēl dramatiskāka un izmantot pilna sajūguma klasiskos NT ir vienkārši neiespējami, jo datu analīzes veikšanai nepieciešams tehniski nepieejams datorresurss. Lai no šīs problēmas izvairītos, lieto no bioloģijas (smadzeņu fizioloģijas) pārmantotus algoritmiskus risinājumus.

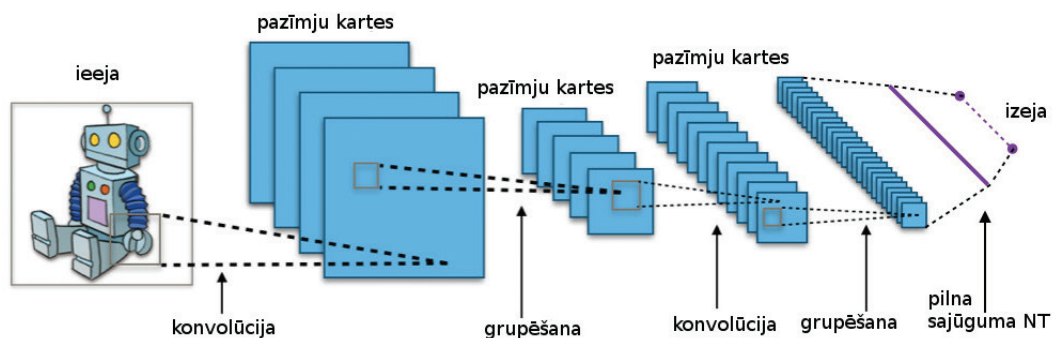
Pirmais risinājums. Piesaistīt atsevišķus analizējamā attēla apgabalus tikai daļai no izmantotā NT ieejas mezgliem (perceptroniem), kā arī perceptronu sasaisti tīklā īstenot tikai daļēji. Taču daļēja sajūguma NT veidošana (t. i., tīkla retināšana) jāveic apdomīgi un saprātīgi, lai nenojauktu tā funkcionalitāti.

Otrais risinājums. Strādājot ar lieliem tālzipētes attēliem, ir lietderīgi kā tēlus izmantot nevis atsevišķus pikselus, bet lielākus attēla fragmentus (blokus) no dažādām attēla klāšēm, uzskatot, ka šo tēlu īpašības ir līdzīgas (statistiski invariantas) visā attēlā. Šādu pieeju dēvē par translācijas invarianci, un tās izmantošana ļauj atpazīt objektus dažādos attēla apgabalos, dažādos apgaismojuma apstākļos, ar dažādām objektu deformācijām, rotācijas, mēroga maiņas, aizsegumiem un citiem apgrūtināšiem apstākļiem.

Attēlu klasifikācijai tālzipētē visbiežāk izmanto konvolūcijas NT, kuru tipiska arhitektūra (t. i., daļējā sajūguma struktūra) parādīta 3-67. att. Konvolūcijas NT izstrādi iedvesmoja 1968. gada pētījumi fizioloģijā [75], kas bija veltīti neironu organizācijai pērtiķu smadzenēs, īpaši saistībā ar redzes neironu arhitektūru.



3-66. att. Pilna un daļēja sajūguma (retināts) neironu tīkls.



3-67. att. Konvolūcijas neironu tīkla arhitektūra.

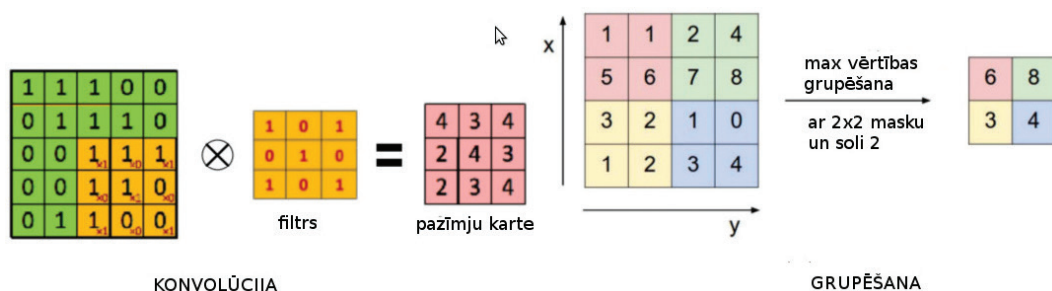
Pirms klasiskā (pilnīgi sajūgtā) konvolūcijas NT ir virkne slāņu, ko veido t. s. konvolūcijas slāņi un grupēšanas slāņi. Konvolūcijas slānis apstrādā $(n \times m)$ izmēra attēla fragmentu (bloku) ar $(a \times b)$ izmēra konvolūcijas filtriem (maskām) un apstrādes rezultātu iesūta NT nākamajā slānī kā $((n - a + 1) \times (m - b + 1))$ izmēra attēlu. Šādi konvolūcijas filtri var būt vairāki, kas nošķir attēlā dažādus tā objektus vai īpašības²⁰.

Grupēšanas slāņi savukārt samazina ar konvolūcijas slāņiem iegūtos attēlus (aprēķinot vidējās, maksimālās vai minimālās vērtības to regulāriem apakšapgabaliem). Ar grupēšanas operācijām tiek aprēķināts konvolūcijas slāņu detektēto īpašību blīvums dažādos attēla apgabalos. Grupēšanas slāņu īpatnība ir tā, ka tie nav jāapmāca, tādējādi tas ir viens no risinājumiem, kā vienkāršot izmantojamā NT algoritmisko komplikētību.

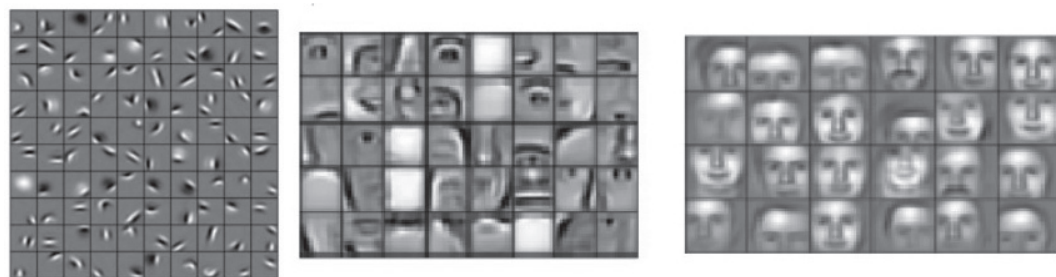
Konvolūcijas slāņos kā aktivācijas funkciju bieži lieto ReLU (skat. 3-65. att.) funkciju. Šo slāņu izvadē iegūst t. s. pazīmju kartes jeb attēlus, kam ir tikai tās sākotnējā attēla pazīmes, kas ir atdalītas ar lietotā konvolūcijas filtra (maskas) palīdzību. Pazīmju karšu analīze ir viens no veidiem, kā izprast, kādas attēla pazīmes izmantotais konvolūcijas NT ir iemācījies.

Secīgs konvolūcijas un grupēšanas slāņu lietojums ļauj no atbalsta tēliem noteikt arvien augstāka līmeņa attēla objektu pazīmes, jo grupēšanas rezultātā tiek apvienotas vairākas pazīmes, sintezējot kvalitatīvi augstāka līmeņa pazīmes, kā tas redzams 3-69. att.

Pēc konvolūcijas un grupēšanas slāņiem konvolūcijas NT seko viens vai vairāki pilnīgi sajūgtie slāņi, pēdējais no kuriem izvada meklēto klasifikācijas rezultātu.



3-68. att. Konvolūcijas un grupēšanas operāciju piemēri.



3-69. att. Pazīmju kartes dažāda līmeņa konvolūcijas slāņos.

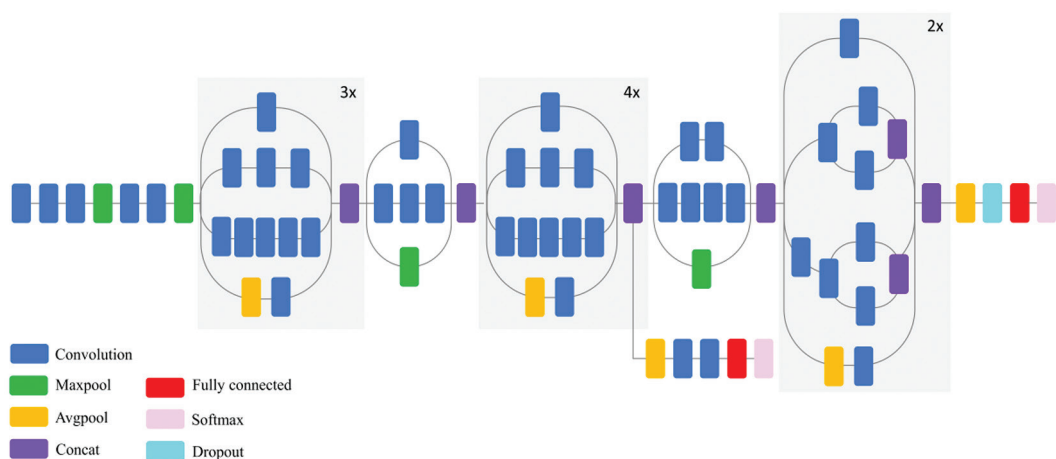
²⁰ Patiesībā, attēla objektu un/vai to īpašību detektēšanai un nošķiršanai ir jālieto korelācijas funkcija, taču tās aprēķināšanai izmanto tālzipētē plaši lietoto konvolūcijas operāciju (kā matemātisko darbību). Vairāk skat. 2.5.5. sadaļā.

3.5.8. Tiklu arhitektūra un dziļā apmācība

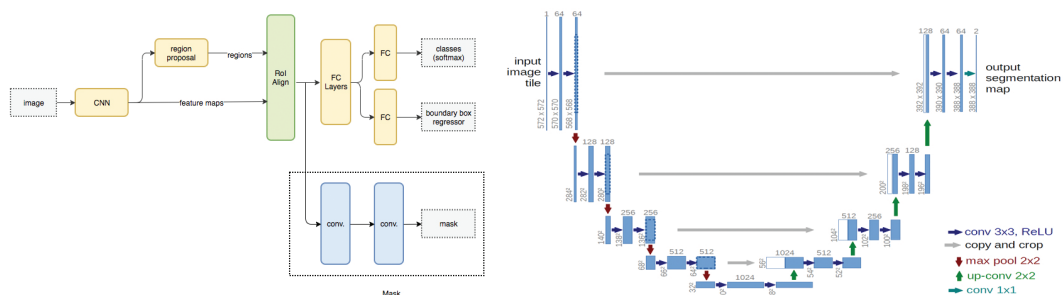
Daļēji sajūgtos neironu tiklus var veidot dažādos veidos atkarībā no apstrādājamo attēlu īpašībām, apstrādes mērķiem, izmantoto tēlu veidiem un citiem datu apstrādes nosacījumiem.

Pilsētvides analīzes tālzpētes lietojumos klasifikācija nereti nozīmē specifisku objektu (ēku) klātbūtnes identificēšanu. Šādiem uzdevumiem piemērots ir *Google Net* konvolūcijas NT “*InceptionV3*”, kā arhitektūra redzama 3-70. att. Tam raksturīgi īpaši moduļi, kam vienā NT slānī ir dažādu izmēru konvolūcijas filtri. Objektu detektēšanai attēlos populārs ir arī neironu tikls “*YOLO*”, kas ievades datus sadala blokos un novērtē katra bloka atbilstību interesējošajiem objektiem. Rezultātā NT ne tikai iezīmē objektu robežām atbilstošus taisnstūrus, bet arī klasificē šos objektus.

Kompleksas arhitektūras daļēji sajūgtie neironu tikli nereti veic gan attēla segmentāciju, gan tā klasifikāciju, kas zināmā mērā nojauc robežu starp šiem diviem procesiem. Tiek izstrādātas jaunas klasifikācijas tehnoloģijas, kas īpaši piemērotas mākslīgā intelekta uzdevumu veikšanai. Viena no tādām ir populārā semantiskās segmentācijas metode [76], kas veic ne tikai attēla segmentāciju, bet arī klasifikāciju pikseļu līmenī, papildus izmantojot



3-70. att. Konvolūcijas NT “*InceptionV3*” arhitektūra [<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/1119/htm>].



3-71. att. Daļēji sajūgtā NT “*Mask RCNN*” un “*U-Net*” arhitektūra [<https://jonathan-hui.medium.com/image-segmentation-with-mask-r-cnn-eb6d793272>; <https://lmb.informatik.uni-freiburg.de/people/ronneber/u-net>].

noteiktas loģiskas sakarības. Šī metode ir viena no datorredzes pamatmetodēm, kurai ir daudz dažādu izmantošanas jomu.

Daļēji sajūgtajos NT var būt iestrādāti dažādi specifiski slāņi ar noteiktām īpašībām:

- izmešanas slāņi, kas katrā apmācības soli piešķir nulles vērtības daļai no svaru matricu elementiem, lai novērstu tīkla pārtrenēšanu;
- lokāli savienoti slāņi, kuru svara matricu koeficienti netiek kopīgioti dažādiem attēla apgabaliem (t. i., netiek lietota translācijas invariance visam attēlam, bet tikai tā apgabaliem) un katram tiek izmantota unikāla konvolūcijas filtru kopa;
- t. s. rekurentie slāņi, rezultātu apvienošanas slāņi un dažādas citas algoritmiskas konstrukcijas.

Šādu kompleksas struktūras daļēji sajūgtu NT apmācības algoritmi, protams, atšķiras no iepriekš apskatītajiem pilna sajūguma NT apmācības algoritmiem, un to kopumu dēvē par dziļo apmācību. Taču dziļās apmācības algoritmi arī bieži izmanto jau minēto gradienta metodi (nereti tās skaitliskajā interpretācijā), kas nosaka virkni līdzības elementu dziļās apmācības algoritmos. Taču to konkrētā realizācija, kas atkarīga no izmantojamo NT struktūras un arhitektūras, var izrādīties visai atšķirīga.



3-72. att. Tālpētes attēla semantiskās segmentācijas piemērs.

3.6. Satelīti un aeroplatformas (21. lekcija)

3.6.1. Kopsavilkums

Šajā lekcijā iepazīsimies ar satelītiem un to orbītām, ņemot vērā, ka izmantoto satelītu orbītu īpašības ietekmē tālīzpētes datus, un ar to ir jārēķinās, veicot šo datu interpretāciju un apstrādi. Apskatīsim galvenās tālīzpētes satelītu orbītas – Saules sinhronās orbītas, precīzās atkārtojamības orbītas, kā arī ģeostacionāro, ģeosinhrono un citas bieži izmantotas satelītu orbītas. Nobeigumā tiks sniegts īss pārskats par aeroplatformu izmantošanas īpatnībām tālīzpētē.

3.6.2. Satelīti un to orbītas

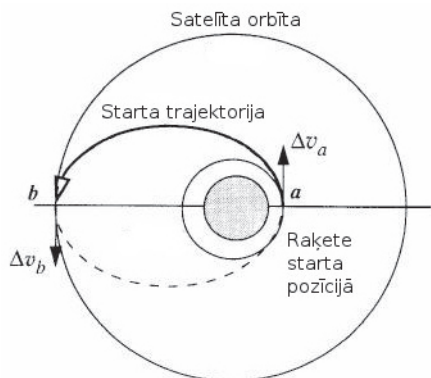
Tālīzpētes datus visbiežāk iegūst no satelītiem (t. s. kosmiskajām platformām) vai arī no lidmašīnām un droniem (t. s. aeroplatformām). Tādējādi izmantoto satelītu orbītu īpatnības atstāj iespaidu arī uz iegūtajiem tālīzpētes datiem, un tas jāņem vērā, veicot šo datu interpretāciju. Tādēļ vispirms iepazīsimies ar satelītu orbītām un to galvenajām kopīgajām īpašībām.

Satelītus orbītās ievada ar reaktīvajām ierīcēm (raķetēm vai kosmoplāniem), to kustības pamatsakarība ir t. s. Ciolkovska vienādojums [35]

$$\Delta v = u \ln \frac{m_i}{m_f}, \quad m_e = m_i - m_f \quad (3.30.)$$

kur m_i – raķetes kopīgā sākuma (t. i., starta) masa, m_e – raķetes beigu (jeb derīgās kravas) masa, m_f – raķetes degvielas masa, u – raķetes reaktīvā dzinēja gāzu izplūdes ātrums.

Ievadot satelītu orbītā, tā ātruma pieaugumu visefektīvāk būtu realizēt divos punktos (a un b), taču reāli tas tiek veikts nepārtraukti, kamēr darbojas raķetes reaktīvais dzinējs²¹. Zemes gravitācijas lauka gadījumā ir viegli aprēķināt, ka satelīta ātrumam, lai tas sasniegtu relatīvi zemu (ap 200 km virs Zemes virsmas) riņķveida orbītu, jābūt aptuveni



3-73. att. Satelīta ievadišanas orbītā shēma.

²¹ Vienkāršības dēļ apskatām tikai vienpakāpes raķetes izmantošanas gadījumu.

$$v = \Delta v = \Delta v_a + \Delta v_b \approx 8,4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Taču, palaižot raķetes no ekvatoram tuviem kosmodromiem, iespējams izmantot arī Zemes rotācijas radīto ātrumu $\Delta v_e \approx 0,5 \text{ km/s}$, un tādējādi ar reaktīvā dzinēja palīdzību satelītam, ko ievada ekvatoriālā orbītā, ir jāpiešķir mazāks ātruma pieaugums, proti $\Delta v_r \approx 7,9 \text{ km/s}$. No šī viedokļa Zemes ekvatoram tuvu starta platformu (piemēram, Eiropas Kosmosa aģentūras (ESA) kosmodroma Kuru, Franču Gviānā, Dienvidamerikā) izmantošana ir enerģētiski izdevīgāka nekā poliem tuvu kosmodromu gadījumā. Taču tas ir atkarīgs arī no izvēlētas orbītas tipa, jo polārās orbītās satelītus enerģētiski izdevīgāk ir ievadīt tieši no Zemes poliem tuviem kosmodromiem (piemēram, Pļeseckas kosmodroma Krievijā).

No Ciolkovska vienādojuma (3.30.), ņemot vērā, ka tipisku mūsdienu reaktīvo dzinēju gadījumos $u \approx 2,4 \text{ km/s}$, un $\Delta v \approx 8 \text{ km/s}$, varam aprēķināt, ka $m_e \approx 0,04 m_i$, t. i., raķetes masas 96 % veido degvielas masa m_f un tās lietderības koeficients m_e/m_i ir tikai 4 %. Tas ir sliktāks lietderības rādītājs nekā, piemēram, tvaika lokomotīvei. Tādēļ vienpakāpes raķešu vietā reāli izmanto daudzpakāpju raķetes vai kosmoplānus, jo tiem minētie lietderības koeficienti ir ievērojami augstāki.

Satelītu orbītas nereti iedala šādās četrās grupās:

- *LEO (Low Earth Orbits)* jeb zemās orbītas ar attālumu no Zemes virsmas 200 km līdz 2000 km;
- *MEO (Medium Earth Orbits)* jeb vidēja augstuma orbītas ar attālumu no Zemes virsmas 2000 km līdz 35 800 km;
- *GEO (GEostationary Orbit)* jeb ģeostacionārā orbīta ar attālumu no Zemes virsmas 35 800 km;
- *HEO (High Eccentricity Orbits)* jeb orbītas ar lielu ekscentricitāti.

Pašreizējā pasaulē ļaudīgākā raķete *Falcon Heavy* spēj ievadīt *LEO* orbītās satelītus ar masu līdz 60 tonnām un apmēram uz pusi mazākas masas satelītus *GEO* orbītā (jo tam nepieciešama papildu degviela).

No debess mehānikas [36], kā arī astronomijas [10] un satelītnavigācijas [13] kursiem ir zināms, ka t. s. Keplera orbītas tuvinājumā satelīta orbīta ir reprezentējama ar elipsi orbitālās koordinātu sistēmas (skat. minētos literatūras avotus) (ξ, η) plaknē (3-74. att.). Šīs elipses vienādojums polārajās koordinātās ir uzrakstāms formā

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \nu} \quad (3.31.)$$

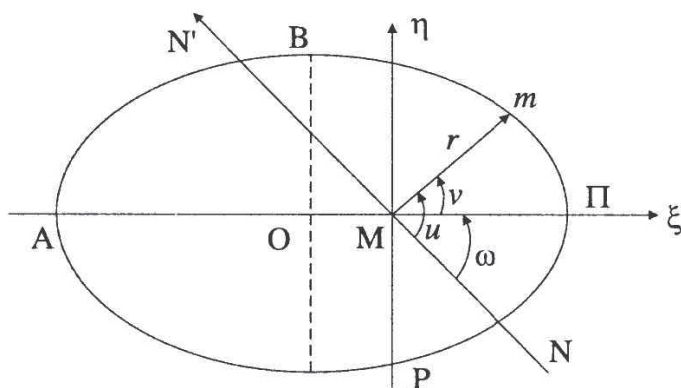
kur m – satelīts, M – Zemes masas centrs, O – orbītas centrs, $a = AO = OII$ – orbītas lielā pusass (nogriežni $b = OB$ sauc par orbītas mazo pusasi), e ir šīs orbītas ekscentricitāte, ko definē sakarības

$$e = \sqrt{2\beta - \beta^2}, \quad \beta = \frac{a-b}{a} \quad (3.32.)$$

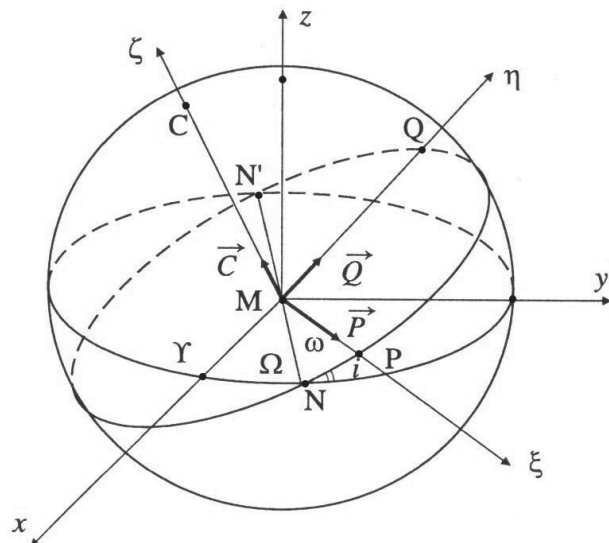
Lielumu β dēvē par aplūkojamās orbītas saspiedumu. Zemes masas centram M tuvāko orbītas punktu Π sauc par tās perigeju, tālāko punktu A – par tās apogeju. Satelīta stāvokli uz orbītas raksturo ar leņķiem ω (perigeja argumentu), u (platuma argumentu) un ν (patieso anomāliju), ar τ apzīmē (zīmējumā nav attēlots) laika momentu, kurā satelīts izlido caur savas orbītas perigeju Π . Perigeja argumentu ω un platuma argumentu u mēra orbītas plaknē no t. s. mezglu līnijas NN' , pa kuru šķēļas satelīta orbītas plakne ar Zemes ekvatora

plakni.

Orbitālās koordinātu sistēmas $(\xi, \eta, \zeta)^{22}$ stāvokli attiecībā pret kvaziinerciālo otro ekvatoriālo koordinātu sistēmu (x, y, z) [10], kā to pieņemts darīt analītiskajā ģeometrijā (skat. 3-75. att.), raksturo ar t. s. Eilera leņķiem [37], proti, i (orbītas inklināciju), Ω (uzlēcošā mezgla garumu) un jau pieminēto ω (perigeja argumentu). 3-75. att. redzami arī otrās ekvatoriālās koordinātu sistēmas orti (vienības vektori) $\vec{P}$, $\vec{Q}$ un $\vec{C}$, kā arī pavasara ekvinokcijas punkts γ un orbītas pols C [10]. Satelītam kustoties ap sfērisku planētu, kas apmierina Stoksa teorēmas [10] nosacījumus, seši orbītas formu (a un e), tās orientāciju (i , Ω un ω) un satelīta stāvokli uz tās (τ) raksturojošie parametri $\{a, e, i, \Omega, \omega, \tau\}$, ko sauc par orbītas Keplera elementiem, ir konstantes, kas ļauj aprēķināt satelīta koordinātas jebkuram brīvi izvēlētam laika momentam, ar samērā vienkāršu algoritmu [10, 13, 36]. Tiesa, šis algoritms ietver vienu algebriski transcendentu vienādojumu, t. s. Keplera vienādojumu [10, 13]



3-74. att. Satelīta orbītas Keplera tuvinājums.



3-75. att. Orbitālā un otrā ekvatoriālā koordinātu sistēma.

²² Orbitālās koordinātu sistēmas ζ ass iet caur Zemes masas centru M un ir vērsta perpendikulāri satelīta orbītas plaknei.

$$E - e \sin E = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} (t - \tau) \quad (3.33.)$$

kur

$$\tan \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2} \quad (3.34.)$$

savukārt

$$\mu = fM_{\oplus}$$

šeit f – gravitācijas konstante, $M_{\oplus}$ – Zemes masa, starpmainīgo lielumu E dēvē par satelīta ekscentrisko anomāliju.

Tālīzpētē galvenokārt (bet ne vienmēr) izmanto satelītus riņķveida orbītās, kam $e=0$. Šādā gadījumā pieminētais algoritms vienkāršojas, jo

$$\nu = E = n(t - \tau)$$

kur lielumu

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (3.35.)$$

sauc par satelīta īpaškustību²³, jo to ar satelīta apriņķošanas periodu P saista viegli pierādāma sakarība

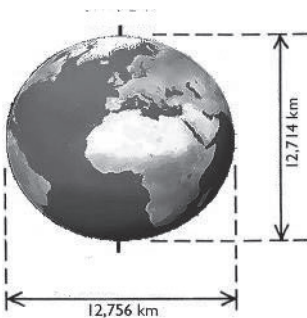
$$P = \frac{2\pi}{n} \quad (3.36.)$$

Taču Zemes forma nav sfēriska, bet daudz tuvāka figūrai, ko sauc par rotācijas elipsoīdu (3-76. att.). Līdz ar to Zeme neapmierina Stoksa teorēmas [10] nosacījumus, un arī tās gravitācijas lauks nav sfēriski simetrisks.

Atceramies [10, 13], ka tuvināti (neņemot vērā no ģeogrāfiskā garuma λ atkarīgos locēkļus) Zemes gravitācijas lauka potenciālu apraksta formula

$$U = \frac{\mu}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{R_0}{r} \right)^n P_n(\sin \varphi) \right\}$$

kur $\mu = fM_{\oplus}$ (f – gravitācijas konstante, $M_{\oplus}$ – Zemes masa), (r, φ) – satelīta sfēriskās koordinātas, R_0 – Zemes ekvatoriālais radiuss, P_n – Ležandra polinomi [6, 8], J_n – bezdimensijoni Zemes gravitācijas lauka harmoniskie koeficienti. Lai arī harmoniskie koeficienti ir visai nelieli (lielākais no tiem $J_2 \sim 10^{-3}$), kā arī saskaņā ar (3.32.) aprēķinātais Zemes ģeo-



3-76. att. Zemes elipsoidālā forma un tās raksturlielumi.

²³ Klasiskajā mehānikā tās apzīmēšanai nereti lieto terminu “cikliskā frekvence”.

metriskais saspiedums ir tikai $\beta_{\oplus} \cong 0,3 \%$, šie faktori ir ievērojamu satelīta Keplera orbītas elementu izmaiņu (t. s. perturbāciju) iemesls [13]. Neiedziļinoties detaļās, atzīmēsim, ka vislielākā ietekme ir t. s. sekulārajām (laikam proporcionālajām) un t. s. īsperioda perturbācijām. Ievērojamākās no Zemes saspieduma izraisītajām sekulārajām perturbācijām ir šādas:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= -\frac{3}{4} J_2 n \left(\frac{R_0}{a} \right)^2 \frac{5 \cos^2 i - 1}{(1 - e^2)^2} \\ \dot{\Omega} &= \frac{3}{2} J_2 n \left(\frac{R_0}{a} \right)^2 \frac{\cos i}{(1 - e^2)^2} \\ \Delta n &= -\frac{3}{4} J_2 n \left(\frac{R_0}{a} \right)^2 \frac{3 \cos^2 i - 1}{(1 - e^2)^{3/2}}\end{aligned}\quad (3.37.)$$

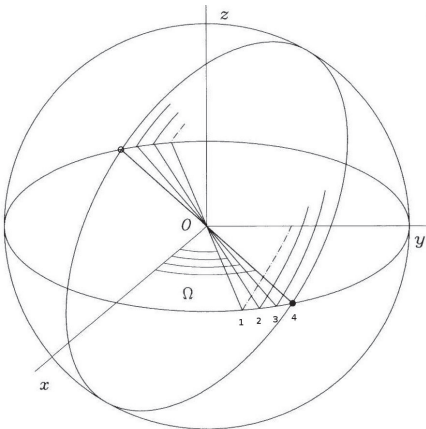
Savukārt īsperioda perturbācijas ar harmoniskajam koeficientam J_2 proporcionālu amplitūdu parādās visiem sešiem satelīta orbītas Keplera elementiem.

Otrā no formulām (3.37.) rāda, ka leņķis Ω (satelīta orbītas uzlēcošā mezgla garums, skat. 3-75. att.), ko veido mezglu līnija NN' ar virzienu uz pavasara ekvinokcijas punktu γ , mainās proporcionāli laikam ar leņķisko ātrumu $\dot{\Omega}$. Tas nozīmē, ka satelīta orbītas plakne lēni rotē (precesē) ap asi Oz , kas sakrīt ar Zemes rotācijas asi (3-77. att.).

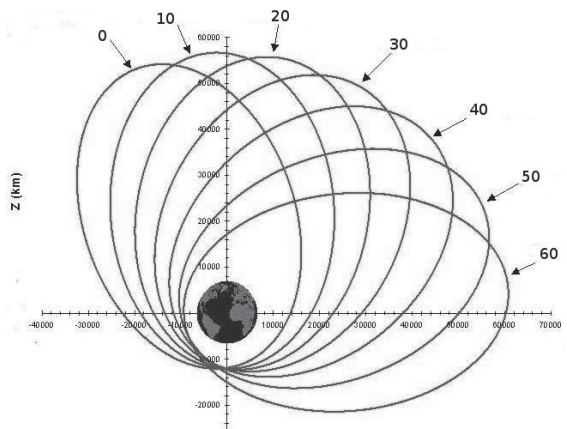
Katrā nākamajā apriņķojumā ap Zemi (3-77. att. redzami četri šādi apriņķojumi) satelīta orbītas plakne ir nobīdījusies pa Zemes ekvatoru par leņķi $\dot{\Omega}P$, kur P – satelīta apriņķošanas periods.

Pirmā no formulām (3.37.) rāda, ka leņķis ω (satelīta orbītas perigeja arguments, skat. 3-74. att.), ko veido mezglu līnija NN' ar virzienu uz perigeju, arī mainās proporcionāli laikam ar leņķisko ātrumu $\dot{\omega}$. Tas nozīmē, ka satelīta orbīta lēni rotē savā orbītas plaknē (3-78. att.).

Katrā nākamajā apriņķojumā ap Zemi (3-78. att. redzami 60 šādi apriņķojumi) satelīta orbīta ir pagriezusies par leņķi $\dot{\omega}P$, kur P – satelīta apriņķošanas periods. Leņķu $\dot{\Omega}P$ un $\dot{\omega}P$ skaitliskās vērtības atsevišķos gadījumos var izrādīties stipri lielas, t. i., vairāki grādi viena satelīta apriņķojuma laikā ap Zemi.



3-77. att. Orbītas plaknes rotācija (precesija) ap Zemes rotācijas asi Oz .



3-78. att. Orbītas rotācija satelīta orbītas plaknē.

Trešā no formulām (3.37.) ir interpretējama kā satelīta īpaškustības (3.34.) un apriņķošanas perioda (3.35.) izmaiņa, ko izraisa Zemes gravitācijas lauka saspiedums. Satelīta apriņķošanas periods šajā gadījumā ir aprēķināms atbilstoši formulai

$$P = \frac{2\pi}{n + \Delta n} \quad (3.38.)$$

kur n un Δn nosaka attiecīgi formulas (3.34.) un (3.37.).

3.6.3. Ģeostacionārā un ģeosinhronā orbīta

Ģeostacionārā orbīta ir ļoti specifiska un unikāla satelītu orbīta, jo satelīti šādā orbītā ir nekustīgi attiecībā pret Zemes virsmu. Lai nodrošinātu šādu satelītu stāvokli, ir jāizņemto riņķveida orbīta ($e=0$) Zemes ekvatora plaknē ($i=0$) ar satelītu apriņķošanas periodu $P = P_{\oplus}$, kur $P_{\oplus} = 23^h, 9345$ – Zemes rotācijas ap savu asi periods attiecībā pret zvaigznēm (3-79. att.).

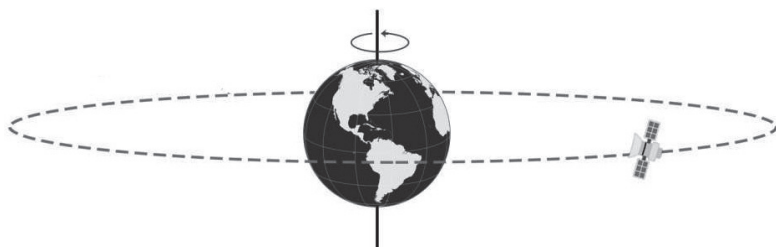
Formulas (3.34.) un (3.35.) ļauj aprēķināt, ka ģeostacionārās orbītas lielajai pusasij a_{gs} jāapmierina vienādojums

$$2\pi\sqrt{\frac{a_{gs}^3}{\mu}} = P_{\oplus} \quad (3.39.)$$

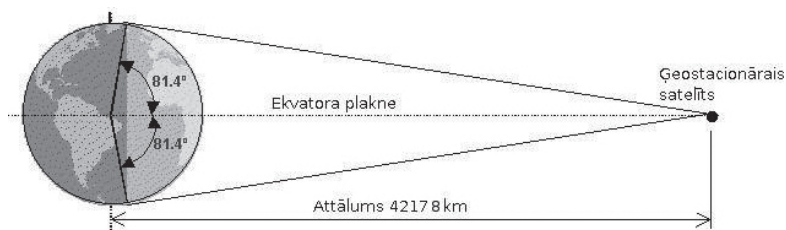
no tā izriet, ka $a_{gs} = 42178$ km jeb $h_{gs} = a_{gs} - R_0 = 35800$ km, kur $R_0 = 6378$ km – Zemes ekvatoriālais radiuss, h_{gs} – ģeostacionāro satelītu ģeometriskais augstums virs Zemes virsmas.

Satelītus ģeostacionārajā orbītā intensīvi izmanto satelīttelekomunikāciju sektorā, jo sakarus ar tiem, tātad – telekomunikāciju pakalpojumus, iespējams nodrošināt, izmantojot nekustīgas antenas. Taču šādus satelītus izmanto arī satelītnavigācijas sistēmās, kā arī tālīzpētē. No tālīzpētes viedokļa lietderīgi atcerēties (3-80. att.), ka maksimālā centrālā leņķa vērtība Zemes virsmas apgabalā, ko iespējams novērot, izmantojot satelītu ģeostacionārajā orbītā, ir 81.4° . Taču reāli iespējams izmantot tikai 55° līdz 65° lielus centrālos leņķus, jo attēlu malās, kur šo leņķu vērtības ir lielākas, atmosfēras ietekme kļūst traucējoši liela.

Ja satelīts ir ievadīts orbītā, kuras apriņķošanas periods $P = P_{\oplus}$ un orbītas inklinācija



3-79. att. Ģeostacionārā orbīta.



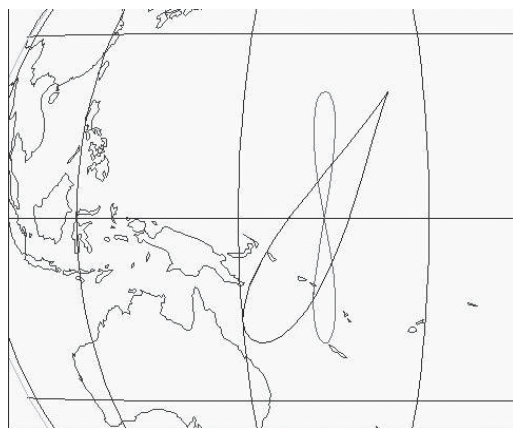
3-80. att. Ģeostacionārās orbītas ģeometrija.

$i \neq 0$, šādu orbītu sauc par ģeosinhrono orbītu (3-81. att.). Arī orbītas ekscentricitāte e ģeosinhrono orbītu gadījumā var būt atšķirīga no nulles.

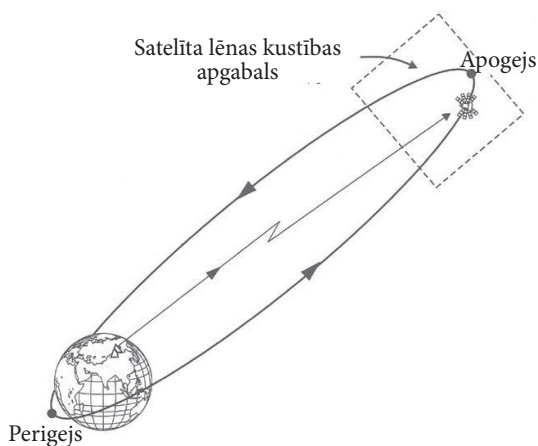
Pie mazas orbītas ekscentricitātes subsatelīta punkts (satelīta centrālā projekcija uz Zemes virsmas) aptuveni vienmērīgi pārvietojas pa astotniekam līdzīgu trajektoriju uz Zemes virsmas. Pie lielas orbītas ekscentricitātes minētā astotnieka cilpas ir atšķirīga izmēra, un subsatelīta punkta kustība ir izteikti nevienmērīga. Tālīzpētē šādas orbītas izmanto samērā reti.

3.6.4. "Molnijas" un "Tundras" tipa orbītas

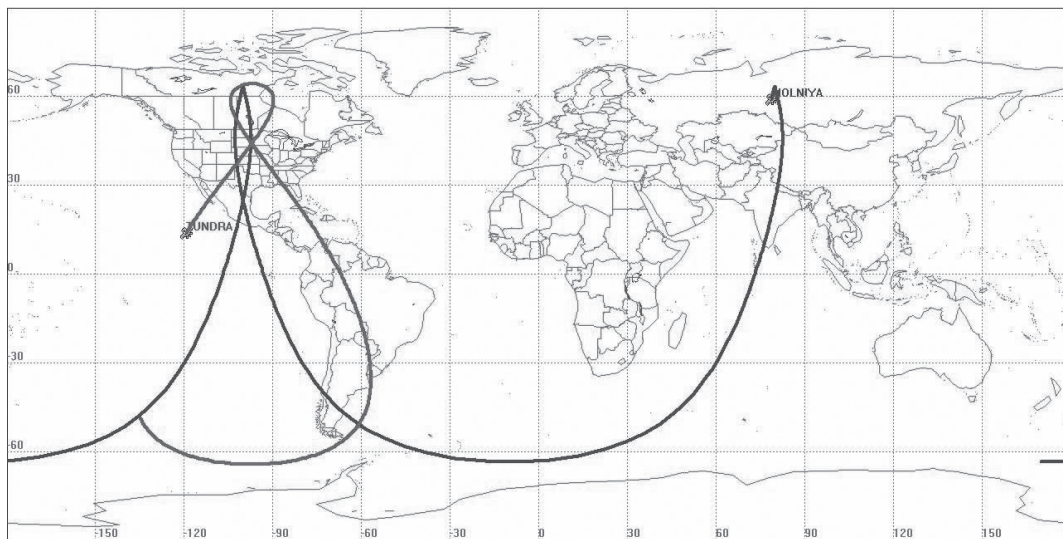
Lai tālīzpētes režīmā ilgstoši strādātu virs kāda polārā ($\varphi \neq 0$) apgabala ar centra ģeogrāfiskajām koordinātām (φ_0, λ_0), ir lietderīgi izmantot izteikti eliptiskas (HEO) orbītas ar apogeju virs minētā apgabala centra (3-82. att.), jo HEO orbītu apogēja apkārtnē satelīta



3-81. att. Ģeosinhrono orbītu centrālās projekcijas.



3-82. att. Tālīzpētes vai telekomunikāciju satelīta HEO orbīta.



3-83. att. "Molnijas" un "Tundras" tipa orbītu projekcijas uz Zemes virsmas.

kustība ir lēna un satelīts relatīvi ilgi uzturas virs pētāmā Zemes apgabala.

“Molņijas” tipa orbītām satelīta apriņķošanas periodu izvēlas aptuveni 12 h jeb, precīzāk, $P = 0,5P_{\oplus}$, kam saskaņā ar (3.39.) atbilst orbītas lielā pusass $a_m = 26\,560$ km. Orbītas ekscentricitāti parasti izvēlas $e \cong 0,74$, lai perigeja augstums būtu $h_p \cong 500$ km. Savukārt orbītas inklinācija i viennozīmīgi jāizvēlas tā, lai orbīta nerotētu savā orbītas plaknē (skat. 3-78. att.) un tās apogejs neslidētu projām no pētāmā Zemes apgabala. To var nodrošināt, ja atbilstoši formulām (3.37.) orbītas perigeja argumenta atvasinājums $\dot{\omega} = 0$ jeb

$$1 - 5 \cos^2 i = 0$$

un $i = 63.4^\circ$. Šādas orbītas nodrošina, ka 8 līdz 10 stundas divu apriņķošanas periodu laikā satelīts atrodas virs pētāmā Zemes apgabala ar centra ģeogrāfiskajām koordinātām $(\varphi_0, \lambda_0)^{24}$. Lai nodrošinātu satelītu nepārtrauktu klātbūtni virs pētāmā apgabala, parasti izmanto trīs sinhronizētus satelītus “Molņijas” tipa orbītās, kas realizē $3 \cdot 8^h = 24^h$ pārklājumu.

Lai izvairītos no tā, ka satelīti “Molņijas” tipa orbītās tikai vienā no diviem apogeejiem atrodas virs pētāmā apgabala, izmanto līdzīgas HEO orbītas ar apriņķošanas periodu $P = P_{\oplus}$, proti, nerotējošas ($\dot{\omega} = 0$) ģeosinhronas HEO orbītas, ko sauc par “Tundras” tipa orbītām (3-83. att.).

“Molņijas” un “Tundras” tipa orbītas visvairāk izmanto satelītu telekomunikāciju sistēmās, taču arvien biežāk ģeosinhronās “Tundras” tipa orbītas izmanto arī satelītnavigācijas un tālīzpētes satelītu sistēmās.

3.6.5. Saules sinhronās orbītas

Virknē tālīzpētes lietojumu ir jādetektē un jānovērtē izmaiņas laikā, kas notikušas pētāmajā Zemes apgabalā. Šādu analīzi parasti veic, salīdzinot tālīzpētes attēlus vai citus mērījumus, kas iegūti atšķirīgos laika momentos. Taču izmaiņu detektēšanu un īpaši novērtēšanu apgrūtina dažādi blakusapstākļi, kuru ietekme uz mērījumiem (attēliem) bieži ir ievērojami lielāka nekā pašu izmaiņu radītās pārmaiņas šajos mērījumos (attēlos). Vislielākā traucējošā ietekme ir atšķirīgiem apgaismojuma apstākļiem un ar tiem saistītajām ēnu izmaiņām, kas klājas virsū citai analizējamajās tālīzpētes attēlos esošajai informācijai. Tādēļ identisku (vai gandrīz identisku) apgaismojuma apstākļu nodrošināšana salīdzināmajos attēlos ir svarīgākais nosacījums sekmīgai izmaiņu detektēšanai un novērtēšanai.

Ja satelīta uzlecošā mezgla garums $\Omega = \text{const}$ (ar zvaigznēm saistītajā otrajā ekvatoriālajā koordinātu sistēmā), tad Zemes orbitālās kustības dēļ leņķis starp orbītas plakni un virzienu uz Sauli ir mainīgs (skat. 3-84. att. ar indeksu (0) apzīmēto orbītu četros gadalaikos). Gada laikā, kad Zeme veic vienu pilnu apgriezību ap Sauli, šis leņķis izmainās par 360° . Tas nozīmē, ka šādām orbītām apgaismojuma apstākļi, kas ietekmē tālīzpētes mērījumu interpretāciju, ir nepārtraukti mainīgi atkarībā no mūsu planētas (Zemes) mainīgā stāvokļa uz savas heliocentriskās orbītas attiecībā pret virzienu uz Sauli.

Lai izvairītos no mainīgiem apgaismojuma apstākļiem, jāizmanto cita veida orbītas, kurām leņķis starp orbītas plakni un virzienu uz Sauli ir nemainīgs (skat. 3-84. att. ar indeksu (s) apzīmēto orbītu četros gadalaikos). Šādas orbītas plakne lēni rotē attiecībā pret zvaigznēm, saglabājot nemainīgu leņķi ar virzienu uz Sauli.

²⁴ Pēc viena apriņķošanas perioda $P \approx 12$ h Zemes rotācijas dēļ satelīts otras 8 līdz 10 stundas pavadīs virs cita apgabala planētas otrā pusē.

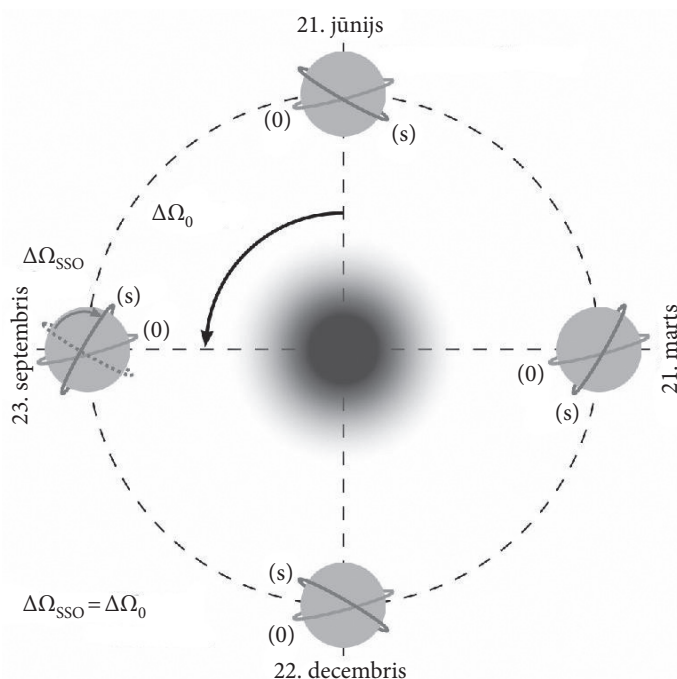
Ja orbītas (s) plakne būtu fiksēta līdzīgi orbītas (0) plaknei (skat. 3-84. att. stāvokli 21/06, t. i., vasaru), tad rudenī (stāvokli 23. septembrī) tās plakne atrastos ar punktēto līniju iezīmētajā stāvoklī. Taču, ja orbītas (s) plakni pagriežam par leņķi $\Delta\Omega_{SSO} = \Delta\Omega_0$, kur $\Delta\Omega_0$ – leņķis, par kādu pārvietojusies Zeme savā orbitālajā kustībā ap Sauli, tad leņķis starp šīs (s) orbītas plakni un virzienu uz Sauli būs tāds pats, kā vasarā (stāvokli 21. jūnijā). Ja orbītas plaknes griešana notiek nepārtraukti, tad leņķis starp to un virzienu uz Sauli visu laiku saglabājas nemainīgs, nodrošinot nemainīgus apgaismojuma apstākļus tālīzpētes datiem, kas iegūti, izmantojot šādu orbītu.

Lai šādu orbītas plaknes griešanos nodrošinātu, jābūt spēkā nosacījumam (skat. (3.37.))

$$\dot{\Omega} = \frac{3}{2} J_2 n \left(\frac{R_0}{a} \right)^2 \frac{\cos i}{(1 - e^2)^2} = \dot{\Omega}_0 \quad (3.40.)$$

kur $\dot{\Omega}_0 = 360$ [grādi/gadā]. Ja izmanto riņķveida orbītas, kurām $e = 0$ (kā to bieži arī dara), tad nosacījums (3.40.) saista orbītas elementus $i(a)$ jeb satelīta inklināciju i ar riņķveida orbītas augstumu h virs Zemes virsmas (3-85. att.). Piemēram, inklinācijai $i = 99^\circ$ atbilst $h = 800$ km augsta heliosinhrona riņķveida orbīta, ko bieži izmanto tālīzpētes sistēmās.

Heliosinhronās orbītas, ko dēvē arī par Saules sinhronajām orbītām, ir ļoti populāras tālīzpētes satelītu orbītas, jo tās nodrošina nemainīgus apgaismojuma apstākļus un salīdzināmus tālīzpētes datus jebkurai vietai uz Zemes, kur mērījumus veic šādā orbītā strādājošs satelīts. Tiesa, šie apgaismojuma apstākļi būs atšķirīgi dažādām vietām uz Zemes virsmas, bet vieni un tie paši vienai un tai pašai vietai, ko pārlido satelīts.



3-84. att. Satelītu orbītu stāvoklis attiecībā pret virzienu uz Sauli.

3.6.6. Precīzās atkārtojamības orbītas (LANDSAT)

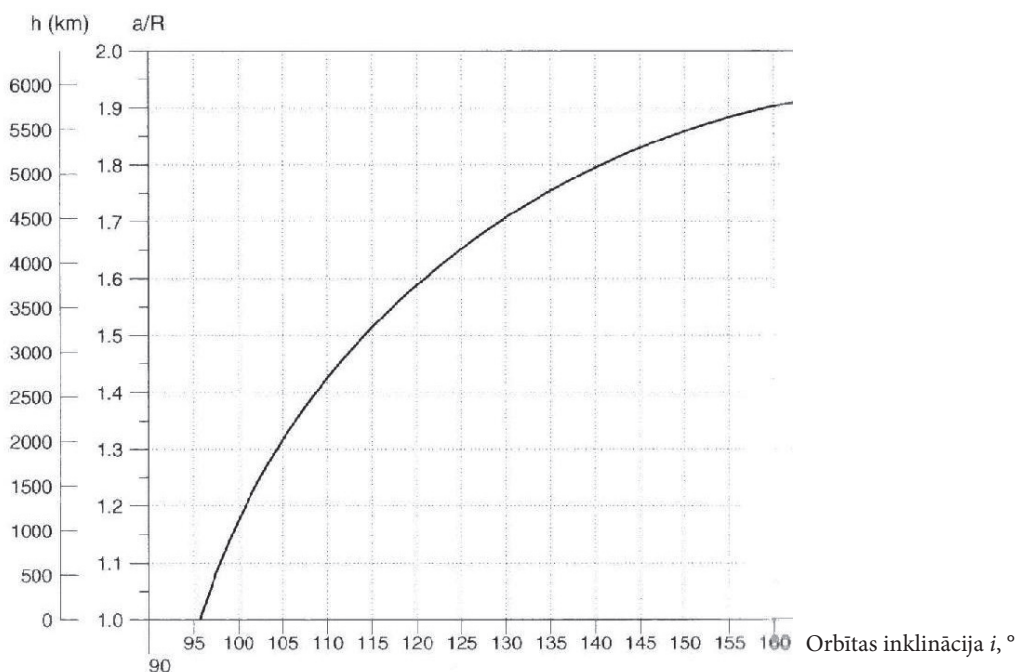
Heliosinhronisms nenodrošina to, ka satelīts patiešām atkārtoti pārlido pētāmo Zemes apgabalu pa precīzi vienu un to pašu trajektoriju, bet, ja kaut nedaudz atšķiras pārlidojuma trajektorijas, nedaudz atšķirsies arī apgaismojuma apstākļi. Lai satelīts pārlidotu vienu un to pašu Zemes apgabalu pa precīzi tādu pašu trajektoriju kā iepriekš, tā apriņķošanas periods P jāizvēlas atbilstoši nosacījumam

$$\frac{P}{P_{\oplus}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.41.)$$

kur N_1 un N_2 – veseli skaitļi. Šādā gadījumā pēc noteikta skaita apriņķojumu (ne lielāka par reizinājumu $N_1 N_2$) satelīta trajektorija attiecībā pret Zemes virsmu precīzi atkārtosies. Šādas orbītas sauc par precīzās atkārtojamības orbītām. Veselos skaitļus N_1 un N_2 izvēlas, projektējot orbītu tā, lai tai būtu kādas vēlamas īpašības. Kad N_1 un N_2 šādi ir izvēlēti, formula (3.41.) ļauj noteikt satelīta apriņķošanas periodu P , savukārt formulas (3.34., 3.35.) – aprēķināt orbītas lielo pusasi a formā

$$a = \sqrt[3]{\frac{\mu P^2}{4\pi^2}}$$

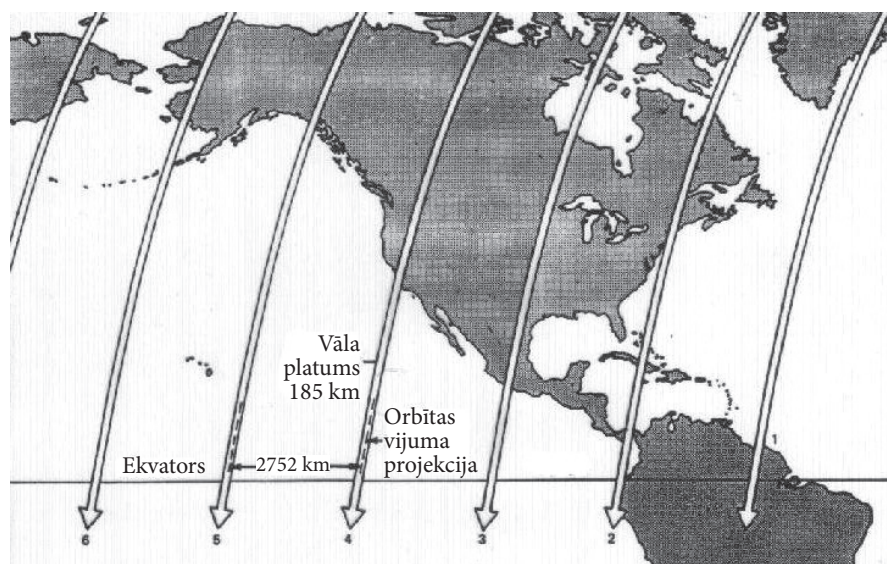
Tālāk, lai nodrošinātu heliosinhronismu, izmantojot nosacījumu (3.40.), jāizvēlas pareiza orbītas inklinācija i (to var darīt arī, izmantojot 3-85. att. redzamo grafiku), un šādi tad arī ir uzkonstruēta vēlamā precīzās atkārtojamības Saules sinhronā orbīta ar nulles ekscentricitāti. Pārējos orbītas elementus (Ω un τ) var izvēlēties patvaļīgi, ņemot vērā to, ka perigeja arguments ω riņķveida orbītām nav stingri definēts, un to parasti izvēlas vienādu ar nulli.



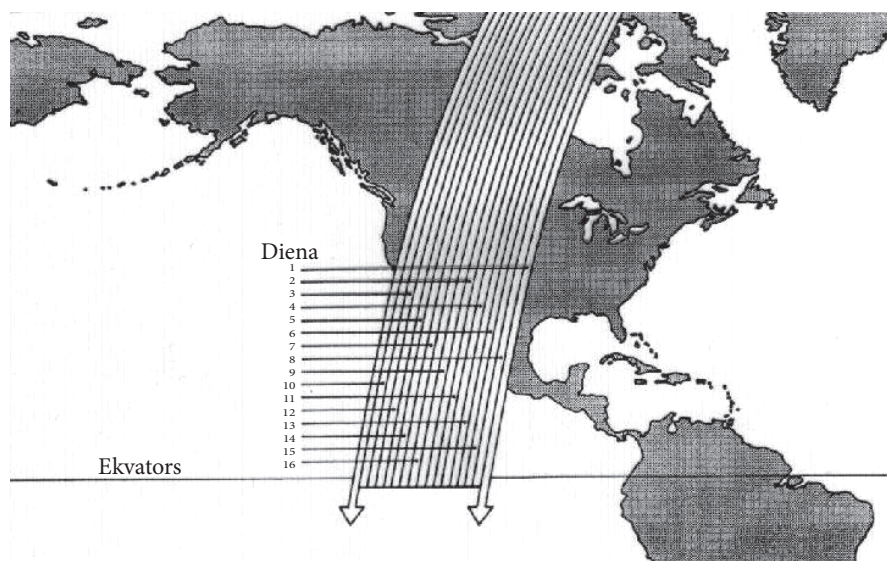
3-85. att. Heliosinhronās riņķveida orbītas augstuma atkarība no orbītas inklinācijas.

Tipisku precīzās atkārtojamības Saules sinhrono orbītu izmanto NASA *LANDSAT* sērijas tālzpētes satelītiem, kuriem $N_1 = 16$, $N_2 = 233$. Tas nozīmē, ka katrs *LANDSAT* satelīts ar 233 vijumiem 16 dienās pārklāj visu Zemes virsmu (izņemot nelielus polāros apgabalus) ar 185 km platām joslām (3-86. att. un 3-87. att.).

Katra josla tiek eksponēta ar secīgiem kvadrātiskiem ($185 \text{ km} \times 185 \text{ km}$) vidējas izšķirtspējas multispektrālajiem (parasti 10 līdz 12 kanālu) kadriem, kas gan nedaudz pārklājas, formējot ($185 \text{ km} \times 170 \text{ km}$) lielus attēlus. Katru attēlu uzņem (skenē) 25 sekundes un numurē ar diviem parametriem – orbītas vijuma numuru un kadra numuru vijumā. No *LANDSAT* tālzpētes satelītu attēliem nereti veido arī mozaīkas, un tie ir pieejami gan ko-



3-86. att. *LANDSAT* satelīta sešu secīgu vijumu projekcijas uz Zemes virsmas (NASA).



3-87. att. *LANDSAT* satelītu dienas pirmā vijuma izvietojums pa dienām (NASA).

merciālai, gan nekomerciālai izmantošanai.

LANDSAT satelītu riņķveida orbītas ir izvietotas vidēji $h = 705$ km augstumā virs Zemes virsmas, to inklinācija $i = 98.2^\circ$, bet satelītu apriņķošanas periods ir $P = 98.9$ min. Pirmais “*LANDSAT-1*” satelīts tika palaists 1972. gada 23. jūlijā no Vandenbergas GKS bāzes ar raķeti *Delta-900*. No šī laika *LANDSAT* satelītu sērija turpinās nepārtraukti, un ikviens no aktīvajiem satelītiem katrās 16 dienās nodrošina vidējas izšķirtspējas multispektrālo visas Zemes virsmas monitoringu.

Līdzīgi tiek projektētas un realizētas arī daudzu citu tālīzpētes satelītu precīzās atkārtamības Saules sinhronās orbītas ar nulles ekscentricitāti.

3.6.7. Citas specifiskas orbītas un orbitālie manevri

Dažādu tālīzpētes satelītu specifiskie uzdevumi ir saistīti ar specifisku orbītu izvēli un ne vienmēr tās ir Saules sinhronās orbītas. Pētot paisuma un bēguma parādības pasaules okeānos, izmantojot satelītaltimeorus, ir svarīgi, lai satelīta pārlidojums ziemeļu virzienā (t. s. N vijums) būtu nobidīts par 90° pa ģeogrāfisko garumu attiecībā pret pārlidojumu dienvidu virzienā (t. s. S vijumu), lai varētu reģistrēt paisuma/bēguma parādību ortogonālās komponentes (satelītu *Jason* un *Topex-Poseidon* misijas). To realizē, piemēklējot atbilstošu satelīta apriņķošanas periodu P (jeb saskaņā ar (3.34., 3.35.) atbilstošu orbītas lielo pusasi a) tādu, lai Zeme satelīta apriņķošanas pusperioda laikā pagrieztos par vajadzīgo leņķi, proti, 90° . Detalizētākai paisuma/bēguma parādību izpētei (tām piemīt četri galvenie periodi $12^h, 421, 23^h, 934, 12^h, 000, 25^h, 819$) izvēlas tādus satelītu apriņķošanas periodus, kas nedaudz atšķiras no šīm vērtībām, lai mērījumi regulāri (ar nelielu nobīdi) pārklātu visus pētāmo fenomenu apgabalus.

Atmosfēras un Saules vēja pretestības (berzes) rezultātā notiek enerģijas disipācija, un tās dēļ satelīta orbītas lielā pusass a katrā apriņķojumā samazinās par lielumu

$$\Delta a \cong \frac{4\pi S \rho a^2}{m} \quad (3.42.)$$

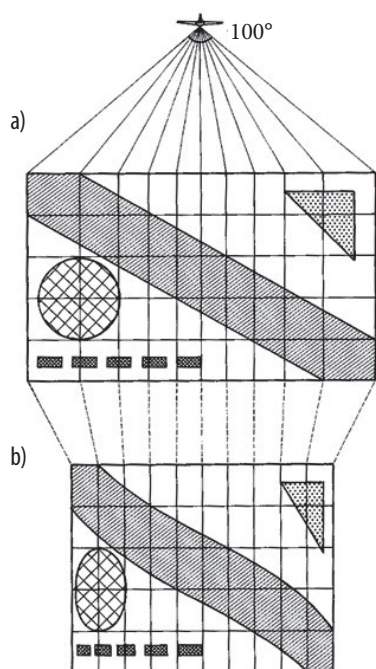
kur S – satelīta šķēsgriezuma laukums, m – satelīta masa, ρ – apkārtējās vides blīvums. Šis efekts ir vislielākais, satelītam lidojot caur perigeja apgabalu, jo vides blīvums ρ eksponenciāli pieaug apgrieztī proporcionāli attālumam no Zemes virsmas. *LANDSAT* satelītiem tipiski $m \cong 1700$ kg, $S \cong 10$ m², $h \cong 700$ km, $\rho \cong 10^{-13}$ kg/m³. Pēc formulas (3.42.) iegūstam $\Delta a \cong 0,4$ m jeb satelīts tuvojas Zemes virsmai aptuveni 5 m diennaktī. Neskatoties uz to, *LANDSAT* satelītu orbītu “mūža” ilgums tomēr ir liels (aptuveni 500 gadu). Taču, samazinoties orbītas augstumam, mainās tālīzpētes datu iegūšanas apstākļi, kas var negatīvi ietekmēt šo datu interpretāciju. Tādēļ orbītu korekcijai izmanto speciālus dzinējus, kas kompensē vides pretestības radītos enerģijas zudumus. Šādu dzinēju darbināšanai vairāku gadu garumā pietiek ar dažiem kilogramiem raķešu degvielas.

3.6.8. Aeroplatformas un to īpatnības

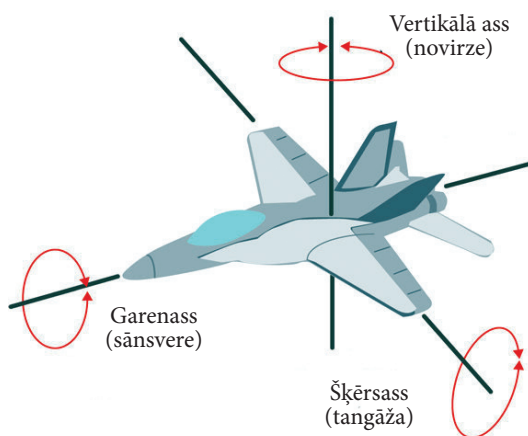
Tālīzpēte mūsdienu izpratnē ir sākusies ar pirmajām Parīzes aerofotogrāfijām (kas gan nav saglabājušās), ko no gaisa balona 1858. gadā ieguva franču fotogrāfs G. F. Turnašons, pazīstams arī ar pseidonīmu Nadars. Mūsdienās aeroplatformas (lidmašīnas un bezpilota

lidaparātus – dronus, retāk gaisa balonus vai citus lidaparātus) bieži izmanto tālīzpētes datu iegūšanai. Turklāt tās ir ne tikai fotogrāfijas, bet arī pilnvērtīgi multispektrālie (MSS) un mikroviļņu (radaru) mērījumi. Aeroplatformas ļauj īstenot praktiski jebkādu laika grafiku, strādāt zem mākoņiem, izvēlēties dažādus darba augstumus virs Zemes, kā arī viegli optimizēt vairākus citus tālīzpētes sistēmu parametrus. Arī izšķirtspēja (gan telpiskā, gan radiometriskā, gan spektrālā) ir augstāka, nekā izmantojot kosmiskās platformas. Taču, strādājot ar aeroplatformām, nākas saskarties ar papildu problēmām, kas nav raksturīgas satelītplatformām. Iepazīsimies ar galvenajām no tām.

(1) Pirmkārt, aeroplatformām raksturīgs mazs pārklājums un ar to saistītas lielas panorāmiskās distorsijas. Lai īstenotu iespējami lielu telpisko pārklājumu, aeroplatformās izmanto platu t. s. “vālu”²⁵, kura leņķiskie izmēri nereti sasniedz pat 100° un vairāk (3-88. att.). Pārlidojot un reģistrējot Zemes virsmas apgabalu ar noteiktas formas ģeometriskiem objektiem (3-88. att. (a) daļa), tiks iegūts attēls ar stipri izmainītu objektu ģeometrisku formu (3-88. att. (b) daļa). Riņķveida objekts būs reģistrēts kā eliptiskas formas objekts, vienādsānu trijstūris – kā neregulārs u. tml. Šādus aerofotogrāfiju perspektīvas radītus ģeometriskos kropļojumus sauc par panorāmiskajām distorsijām, un tās it kā nav grūti kompensēt (ņemt), izmantojot samērā vienkāršus ģeometriskus algoritmus. Taču šie algoritmi ir efektīvi lietojami tikai plakanas pētāmā apgabala virsmas gadījumos. Ja šai virsmai piemīt noteikts reljefs (kā tas ir vairumā gadījumu), elementārie panorāmisko distorsiju kompensācijas algoritmi dod kļūdainu rezultātu. Komplikētāku un precīzāku algoritmu izmantošanai nepieciešama pietiekami precīza informācija par pētāmā apgabala virsmas reljefu (t. i., precīzi digitālie augstuma modeļi vai fotogrammetrisko datu un teh-



3-88. att. Aeroplatformu panorāmiskās distorsijas.



3-89. att. Lidaparātu (aeroplatformu) neregulārās svārstības.

25 Angļu val. FOW – field of view.

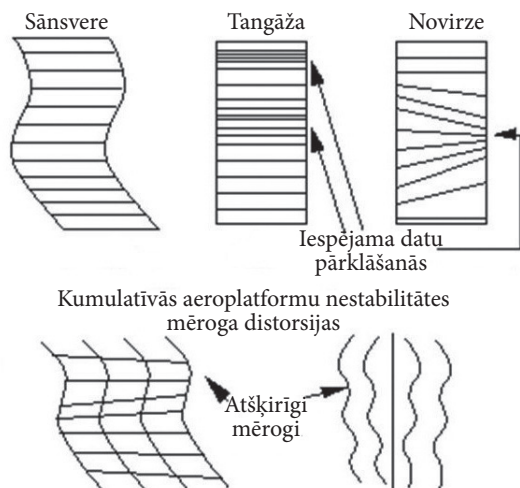
noloģiju izmantošana). Tas var ievērojami apgrūtināt precīzu tālzipētes datu interpretāciju salīdzinājumā ar gadījumiem, kad to iegūšanai ir izmantotas kosmiskās platformas.

(2) Otrkārt, aeroplatformas ir mazāk stabilas par kosmiskajām platformām. Lidmašīnas un citi lidaparāti pārvietojas atmosfērā, kurai dažāda mēroga termisko vertikālo un horizontālo cirkulāciju dēļ piemīt turbulence. Šī turbulence rada lidaparāta neregulāras svārstības (3-89. att.), ko dēvē par sānsveri²⁶, tangāžu²⁷ un novirzi²⁸.

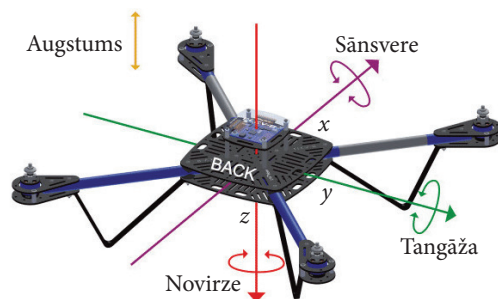
Šīs neregulārās svārstības rada specifiskas mēroga distorsijas iegūtajos tālzipētes attēlos, no kurām ir ļoti grūti (nereti neiespējami) atbrīvoties (3-90. att.).

Turbulences radītās neregulārās svārstības piemīt arī bezpilota lidaparātiem (droniem), to raksturošanai lieto identiskus jēdzienus (leņķus) un terminoloģiju (3-91. att.).

(3) Treškārt, aeroplatformu izmantošana parasti ir dārgāka, salīdzinot ar datu, kas iegūti no kosmiskajām platformām, izmaksām. Aeroplatformu piedāvātā informācija parasti ir telpiski ierobežotāka, kā arī tām ir īss darbības laiks (stundas), salīdzinot ar kosmiskajām platformām (gadi).



3-90. att. Aeroplatformu neregulāro svārstību radītās mēroga distorsijas.



3-91. att. Neregulāro svārstību raksturojums droniem.

²⁶ Angļu val. – *roll*.

²⁷ Angļu val. – *pitch*.

²⁸ Angļu val. – *yaw*.

3.7. Kartogrāfijas un fotogrammetrijas pamati (22. lekcija)

3.7.1. Kopsavilkums

Iepazīsimies ar galvenajiem kartogrāfisko projekciju veidiem: koniskajām, cilindriskajām un azimutālajām projekcijām, kā arī dažiem citiem bieži lietotiem projekciju veidiem. Īpaša uzmanība būs veltīta populārajai Merkatora transversajai projekcijai un tās izmantošanai. Nobeigumā pārskats par fotogrammetrijas galvenajām idejām un to lietošanas tehnoloģijām Zemes virsmas reljefa parametru noteikšanai.

3.7.2. Ievads kartogrāfijā

Kartogrāfija no matemātiskā viedokļa ir prasme projicēt vairākos virzienos liektu virsmu (Zemes vai kādas citas planētas virsmu) uz plakanas virsmas (kartes). Izcilais vācu matemātiķis Kārlis Fridrihs Gauss (1777–1855) savulaik pierādīja teorēmu, ka bez kropļojumiem tas nav izdarāms, precīza projekcija ir veicama tikai virsmām ar liekumu vienā virzienā (tādām kā cilindrs, konuss u. tml.). Tāpēc kartogrāfiskās projekcijas (kartes) nākas veidot tuvinātas, turklāt to visbiežāk cenšas darīt tā, lai pēc iespējas precīzāk attēlotu:

- vai nu attālumus (piemēram, autoceļu kartes);
- vai nu laukumus (piemēram, lauksaimniecisko platību kartes);
- vai arī leņķus (piemēram, jūrniecības kartes).

Izveidot kartes, kurās vienlaikus būtu precīzi attēloti gan attālumi, gan laukumi, gan leņķi, nav iespējams. Tādēļ nākas izmantot dažādas kartes, kurās lietoti dažādi projekciju paņēmieni. Taču realizēt tādas Zemes virsmas plakanas projekcijas, kurās precīzi tiek saglabāti vai nu attālumi, vai nu laukumi, vai nu leņķi, arī nepavisam nav vienkārši (kaut teorētiski tas ir iespējams). Tādēļ jau no seniem laikiem cilvēki veidojuši kartogrāfiskās projekcijas, balstoties apsvērumā “kā to vienkāršāk izdarīt”, un tikai tuvināti rūpējušies par attālumu, laukumu vai leņķu vērtību precīzu attēlošanu.

Papildu problēmas karšu veidošanā rada arī fakts, ka jāvienojas (jādefinē), ar kādu liektu virsmu tiek reprezentēta Zemes ģeogrāfiskā virsma. Ideāli būtu izmantot ģeoīdu [10], taču to ir ļoti grūti matemātiski formalizēt. Tādēļ daudz biežāk izmanto vai nu rotācijas elipsoīdu, vai arī (nelieliem Zemes virsmas apgabaliem) sfēras fragmentus jeb sferoīdus. Realitātē tas rada diezgan lielu sajukumu, jo dažādu valstu kartogrāfiskie dienesti nereti izmanto katrs savu sferoīdu, dažās valstīs pat vairākus. Daudzos gadījumos tādēļ radusies kartogrāfisko datu nesavietojamība un jāiegulda liels darbs šādas savietojamības nodrošināšanai.

Tādējādi kartogrāfiskās projekcijas cenšas realizēt vienā no četriem galvenajiem veidiem²⁹:

- **ekvidistanciālās** projekcijas (iespējami precīzi parāda attālumus);
- **konformās** projekcijas (iespējami precīzi attēlo leņķus);

²⁹ Protams, pastāv arī daudzi citi, retāk izmantoti kartogrāfisko projekciju realizācijas veidi.

- **vienādlaukumu** projekcijas (iespējami precīzi attēlo laukumus);
- **minimālo kļūdu** projekcijas (neko neattēlo precīzi, bet minimizē visas minētās neprecizitātes).

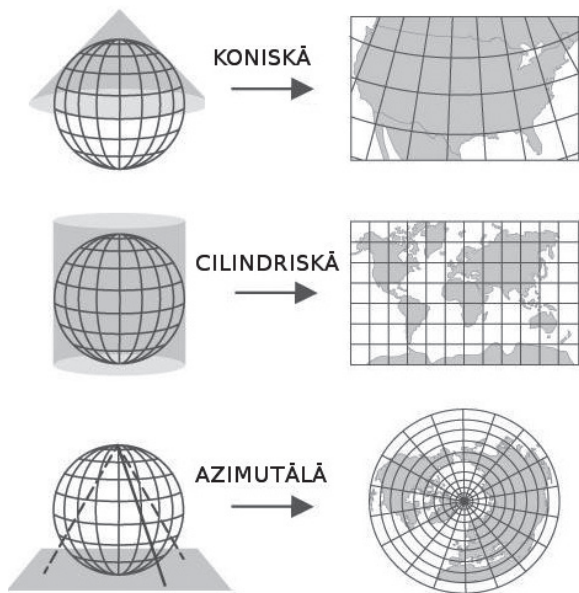
Lai šos mērķus kaut tuvināti sasniegtu un arī nodrošinātu savietojamību ar pagātnē veidoto kartogrāfisko materiālu, izmanto trīs galvenos projekciju veidus: koniskās projekcijas, cilindriskās projekcijas un azimutālās projekcijas (3-92. att.).

Konisko projekciju gadījumā Zemes virsmas punktus projicē uz īpaši izvēlētas un speciāli novietotas koniskas virsmas, kura pēc tam tiek “atritināta”, tādējādi formējot karti. Līdzīgu pieeju izmanto, projicējot Zemes virsmas punktus uz cilindriskas (cilindriskās projekcijas) vai arī plakanas (azimutālās projekcijas) virsmas.

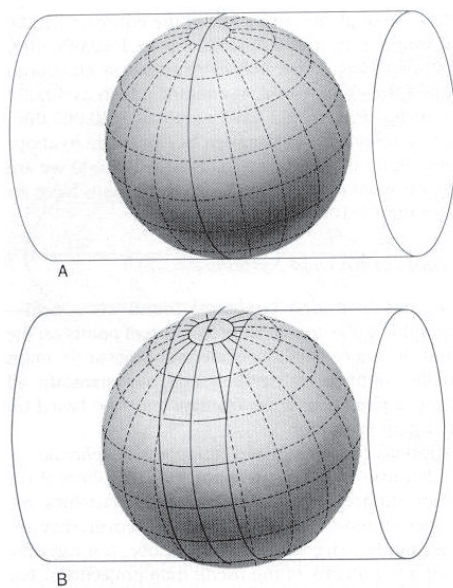
Cilindrisko projekciju gadījumā izmantoto cilindra ass visbiežāk tiek vērsta vai nu Zemes rotācijas ass virzienā, vai arī tai perpendikulāri. Otro gadījumu (3-93. att.), ko sauc par Merkatora transverso projekciju, izmanto visai bieži, turklāt cilindrs var gan pieskarties kādam Zemes virsmas meridiānam (gadījums A), gan arī nedaudz šķelt Zemes ķermeni (gadījums B).

Līdzīgas šķēļošas ģeometriskas konstrukcijas nereti lieto arī konisko projekciju realizācijas gadījumos.

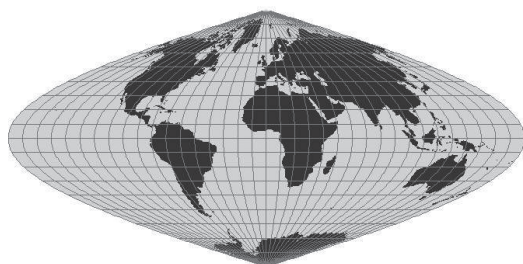
Ievada noslēgumā atzīmēsim, ka bez minētajām galvenajām ģeometriskajām projekcijām kartogrāfijā plaši izmanto arī daudzas citas ģeometriski komplicētākas projekcijas, tādas kā sinusoidālās vienādlaukumu projekcijas (3-94. att.), Robinsona projekcijas (3-95. att.) u. c.



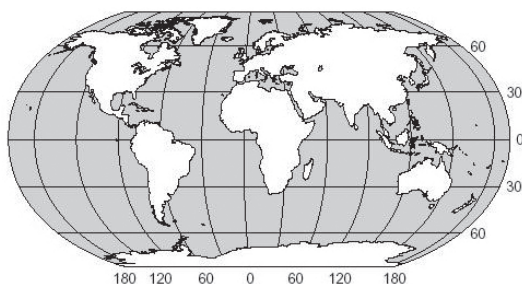
3-92. att. Galvenie kartogrāfisko projekciju veidi.



3-93. att. Merkatora transversā projekcija (cilindriskās projekcijas veids).



3-94. att. Sinusoidālā (vienādlaukumu) projekcija.



3-95. att. Robinsona kartogrāfiskā projekcija.

3.7.3. Azimutālās projekcijas

Azimutālo projekciju gadījumos Zemes virsmas punkti tiek tiešā veidā projicēti uz plaknes (kartes). Lai šādas projekcijas īstenotu, ir jāizvēlas: (a) punkts T, kurā projekcijas plakne pieskaras Zemes virsmai, un (b) projekcijas veids. Visbiežāk lietotie projekcijas veidi ir šādi (3-96. att.):

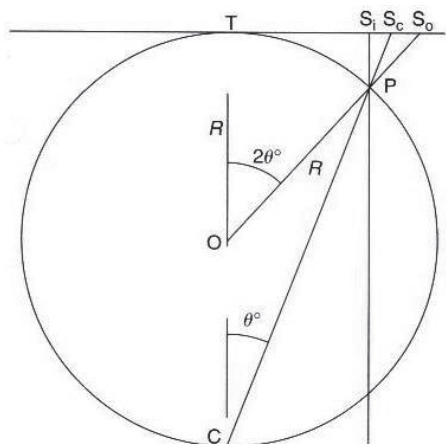
- **gnomiskā projekcija** (Zemes virsmas punkts P uz kartes tiek projicēts punktā S_0 , izmantojot taisni OPS_0 , kas savieno Zemes centru O ar projicējamo punktu P);
- **stereogrāfiskā projekcija** (Zemes virsmas punkts P uz kartes tiek projicēts punktā S_c , izmantojot taisni CPS_c , kas savieno punktam T diametriāli pretējo punktu C ar projicējamo punktu P);
- **ortogrāfiskā projekcija** (Zemes virsmas punkts P uz kartes tiek projicēts punktā S_i , izmantojot taisni, kas paralēla taisnei COT un iet caur projicējamo punktu P).

Ņemot vērā, ka minētie azimutālo projekciju veidi ir atšķirīgi, atšķirīgas būs arī to lietošanas rezultātā iegūtās kartes (3-97. att., 3-98. att. un 3-99. att.).

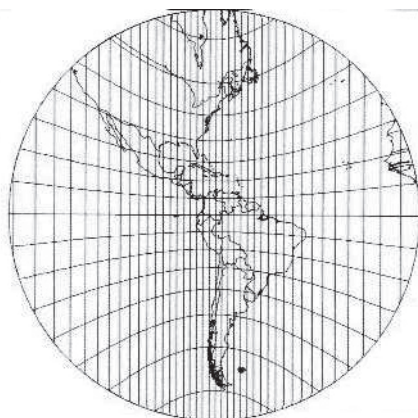
Gnomiskās projekcijas kartēs (3-97. att.) meridiāni redzami kā vertikālas taisnas līnijas. Ortogrāfiskās projekcijas kartēs (3-99. att.) kā taisnas horizontālas līnijas redzamas paralēles. Savukārt stereogrāfiskās projekcijas kartēs (3-98. att.) gan meridiāni, gan paralēles attēlotas kā liektas līnijas.

Azimutālās projekcijas nav ne īsti ekvidistanciālas, ne konformas, ne vienādlaukumu projekcijas. Tādēļ, lai kaut tuvināti pielāgotos kādam no šiem nosacījumiem, izmanto arī ģeometriski komplicētākus azimutālo projekciju veidus.

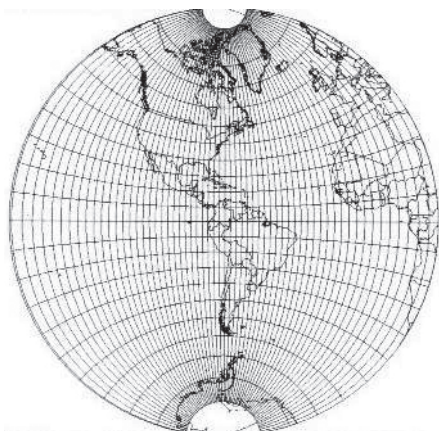
3-100. att. redzams, kā mainās attāluma vērtības (attālums kartē pret patieso attālumu uz Zemes virsmas) gnomiskās (G), stereogrāfiskās (S) un ortogrāfiskās (O) projekcijas gadījumā, atkarībā no projekcijas centrālā leņķa $2\theta^\circ$ (skat. 3-96. att.).



3-96. att. Azimutālo projekciju trīs galvenie veidi [4].



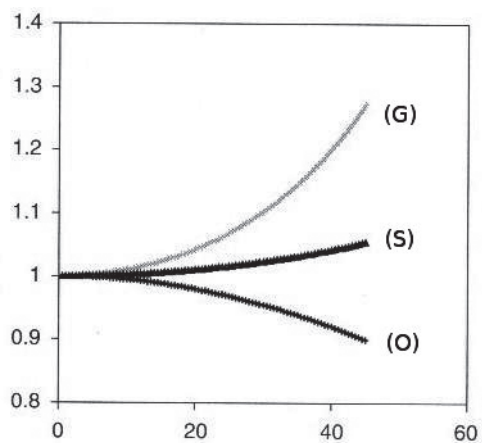
3-97. att. Gnomiskās projekcijas kartes piemērs [4].



3-98. att. Stereogrāfiskās projekcijas kartes piemērs [4].



3-99. att. Ortogrāfiskās projekcijas kartes piemērs [4].



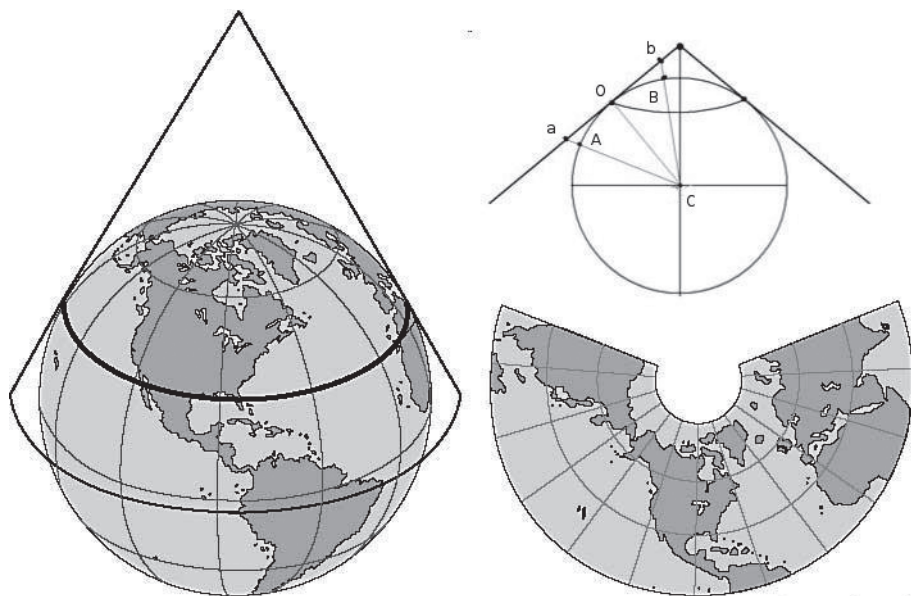
3-100. att. Attālumu attēlošanas kļūdas azimutālo projekciju gadījumos [4].

3.7.4. Koniskās projekcijas

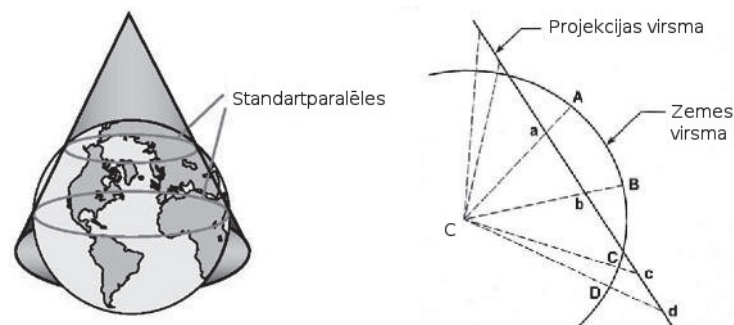
Konisko projekciju gadījumos Zemes virsmas punktus projicē uz konusa, kura ass sakrīt ar Zemes rotācijas asi, virsmas, izmantojot radiālo projekciju no Zemes centra C (3-101. att. labās puses augšējais attēls). Projekcijas virsmu – konusu – izvēlas tā, lai tas pieskartos Zemes virsmai pa t. s. standartparalēli (tumšā līnija 3-101. att. kreisajā attēlā), kuru var izvēlēties patvaļīgi. Atverot konusu un transformējot to plaknē, iegūst koniskās projekcijas karti (3-101. att. labās puses apakšējais attēls).

Neskatoties uz to, ka šīs projekcijas pamatdoma ir vienkārša, to tiešā veidā īsteno reti, jo tā nav pielāgota nevienam no iepriekš apskatītajiem saglabāšanās likumiem. Lai metodi pilnveidotu, visbiežāk to lieto, kā projekcijas virsmu izmantojot konusu, kas šķēļ Zemes virsmu pa divām standartparalēlēm (3-102. att.).

Nedaudz mainot arī projicēšanas metodi, iegūst atšķirīgas, bet lietošanai piemērotākas t. s. pseidokoniskās projekcijas, tādas kā (1) Alberta vienādlaukumu projekciju, (2) Lamberta konformo projekciju vai (3) antīko, jau Ptolemaja piedāvāto pseidokonisko ekvidis-



3-101. att. Koniskās projekcijas pamatprincips.



3-102. att. Koniskās projekcijas modifikācija.

tanciālo projekciju. Piemēram, Alberta vienādlaukumu pseidokonisko projekciju īsteno šāds algoritms:

$$\begin{aligned}x &= \rho \sin \theta \\y &= \rho_0 - \rho \cos \theta\end{aligned}\tag{3.43.}$$

kur

$$\begin{aligned}n &= \frac{1}{2}(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \\ \theta &= n(\lambda - \lambda_0) \\ C &= \cos^2 \varphi_1 + 2n \sin \varphi_1 \\ \rho &= \frac{\sqrt{C - 2n \sin \varphi}}{n} \\ \rho_0 &= \frac{\sqrt{C - 2n \sin \varphi_0}}{n}\end{aligned}$$

(λ, ρ) – punkta ģeogrāfiskās sfēriskās koordinātas uz Zemes virsmas (sfēriska Zemes modeļa tuvinājumā), (x, y) – šī paša punkta taisnleņķa koordinātas kartē (t. i., plakana-jā pseidokoniskajā Alberta projekcijā), φ_1 un φ_2 – izmantoto standartparalēļu ģeogrāfiskie platumi, (λ_0, φ_0) – projekcijas centrālā punkta, kuram atbilst kartes koordinātas $x=0$, $y=0$, ģeogrāfiskās sfēriskās koordinātas uz Zemes virsmas. Inverso transformāciju (t. i., ģeogrāfisko koordinātu uz sfēras φ un λ aprēķināšanu, ja zināmas kartogrāfiskās taisnleņķa koordinātas x un y) Alberta projekcijas gadījumā īsteno no (3.43.) atvasināms algoritms

$$\begin{aligned}\varphi &= \arcsin \frac{C - \rho^2 n^2}{2n} \\ \lambda &= \lambda_0 + \frac{\theta}{n}\end{aligned}\tag{3.44.}$$

kur

$$\begin{aligned}\rho &= \sqrt{x^2 + (\rho_0 - y)^2} \\ \theta &= \arctan \frac{x}{\rho_0 - y}\end{aligned}$$

savukārt pārējie lielumi ir identiski tiešajā tranformācijā izmantotajiem lielumiem.

Tādējādi kartogrāfisko projekciju var traktēt ne tikai no ģeometriskā viedokļa, bet arī kā noteiktu koordinātu transformācijas algoritmu, daļēji vai pilnīgi abstrahējoties no projekcijas ģeometriskās ainas. Tas ļauj daudz sekmīgāk īstenot iepriekš apskatītos saglabāšanās nosacījumus, taču pilnīga abstrakcija ne vienmēr ir vēlama no karšu salīdzināmības un savietojamības viedokļa, ņemot vērā daudzus, tostarp vēsturiskus, karšu veidošanas aspektus un tradīcijas.

3.7.5. Merkatora un Millera cilindriskās projekcijas

Cilindrisko projekciju (ar cilindra asi vērstu Zemes rotācijas ass virzienā), ko īsteno koordinātu transformācija

$$\begin{aligned}x &= R(\lambda - \lambda_0) \\ y &= R \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]\end{aligned}\tag{3.45.}$$

kur (λ, ρ) – punkta ģeogrāfiskās sfēriskās koordinātas uz Zemes virsmas (sfēriska Zemes modeļa tuvinājumā), (x, y) – šī paša punkta taisnleņķa koordinātas kartē, λ_0 – kartes centrālā meridiāna ģeogrāfiskais garums, R – izmantotā cilindra mēroga faktors (parasti $R = 1$, bet lieto arī citas R vērtības), sauc par Merkatora projekciju.

Līdzīgu cilindrisko projekciju

$$\begin{aligned}x &= R(\lambda - \lambda_0) \\ y &= R \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + k \frac{\varphi}{2} \right) \right]\end{aligned}\tag{3.46.}$$

ar fiksētām vērtībām $R = 5/4$, $k = 4/5$ sauc par Millera projekciju, un to var uzskatīt par Merkatora projekcijas speciālgadījumu.

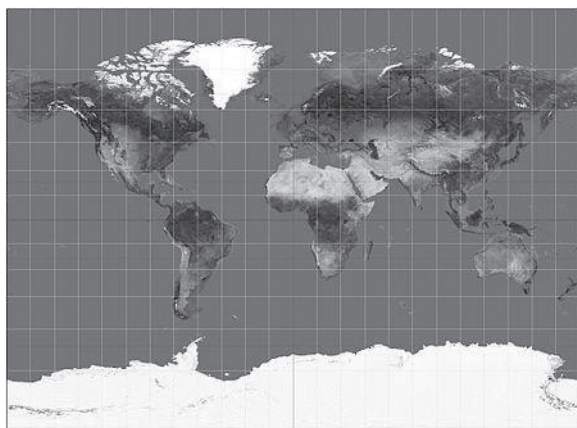
Lietojot abas šīs projekcijas, iegūst līdzīga izskata kartes ar visai atšķirīgiem mērogiem pie dažādām ģeogrāfiskā platuma vērtībām (3-103. att.).

Inverso transformāciju abiem gadījumiem īsteno formulas

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_0 + \frac{x}{R} \\ \varphi &= \frac{2}{k} \arctan \left(\exp \frac{y}{R} \right) - \frac{\pi}{2k}\end{aligned}\tag{3.47.}$$

kur $R = 5/4$ un $k = 4/5$ Millera transformācijas gadījumā, R – patvaļīgs un $k = 1$ – Merkatora transformācijas gadījumā.

Merkatora transformāciju ir ļoti viegli vispārināt rotācijas elipsoīda Zemes modeļa ga-



3-103. att. Merkatora/Millera kartogrāfiskā projekcija.

dijumam, kad tā ir uzrakstāma formā

$$x = R(\lambda - \lambda_0) \quad (3.48.)$$

$$y = R \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sqrt{\frac{1 - e_{\oplus} \sin \varphi}{1 + e_{\oplus} \sin \varphi}} \right]$$

kur $e_{\oplus}$ – Zemes formu aproksimējošā rotācijas elipsoīda ekscentricitāte. Mēroga faktoru šīs transformācijas (projekcijas) gadījumā nosaka formula

$$m = \frac{ds'}{ds} = \frac{R}{\cos \varphi} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

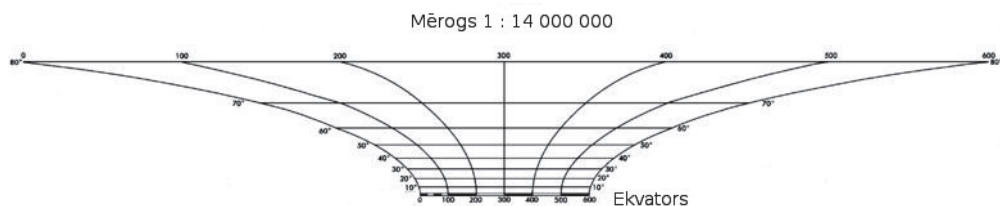
kur ds' – diferenciāls attālums projekcijā (kartē), ds – tam atbilstošais diferenciālais attālums uz elipsoīda. Šī visai mainīgā mēroga faktora atkarība no vietas ģeogrāfiskā platuma redzama 3-104. att.

Merkatora transversā projekcija

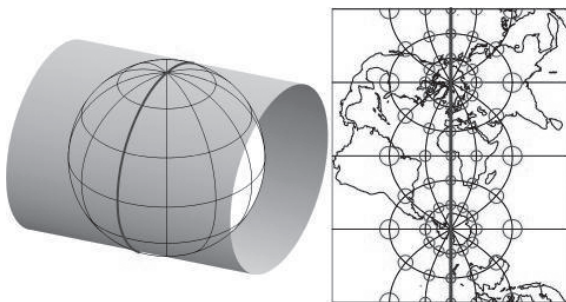
Kā jau atzīmēts 3.7.2. sadaļā, par Merkatora transverso projekciju sauc cilindrisko projekciju, kurā izmantotā cilindra ass vērsta perpendikulāri Zemes rotācijas asij. Tā ir kartogrāfijā plaši izmantota konformā projekcija (3-105. att.), un tās transformācijas algoritmi (tiešais un inversais) ir šādi³⁰

$$x = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+B}{1-B} \right) = \operatorname{arcth} B \quad (3.49.)$$

$$y = \arctan \left[\frac{\tan \varphi}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right] - \varphi_0$$



3-104. att. Merkatora projekcijas mēroga faktora atkarība no vietas ģeogrāfiskā platuma.



3-105. att. Merkatora transversā projekcija.

³⁰ Šeit bez trigonometriskajām funkcijām jāizmanto arī hiperboliskās funkcijas.

savukārt

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sin D}{\operatorname{ch} x}\right) \quad (3.50.)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \arctan\left(\frac{\operatorname{sh} x}{\cos D}\right)$$

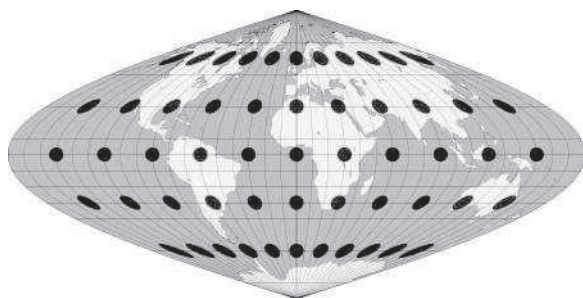
kur $B = \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0)$, $D = y + \varphi_0$, (φ_0, λ_0) – projekcijas centrālā punkta ģeogrāfiskās koordinātas.

Merkatora transversās projekcijas centrālā punkta ģeogrāfiskais garums λ_0 nosaka pieskarmeridiānu, pa kuru Zemes rotācijas asij perpendikulārais projekcijas cilindrs pieskaras Zemes virsmai (skat. 3-105. att.). Bez pieskarcilindriem Merkatora transversās projekcijas īstenošanai izmanto arī šķeļošos cilindrus, kā tas redzams 3-93. att.

Ar šo projekcijas veidu ir kartografēta visa mūsu planētas (Zemes) virsma ar 6° platām zonām pa ģeogrāfisko garumu λ un pārklājumu no $\varphi = -80^\circ$ līdz $\varphi = +84^\circ$. No šādām kartēm ir viegli veidot mozaīkas, kā tas redzams 3-106. att. (Eiropas reģionam).



3-106. att. Merkatora transversās projekcijas karšu mozaika.



3-107. att. Laukumu saglabāšanās sinusoidālās projekcijas kartēs.

3.7.6. Citi projekciju veidi

Bez apskatītajām īsteno un izmanto vēl daudz dažādas kartogrāfiskās projekcijas. Mīnēsīm vēl tikai vienu no tām – vienādlaikumumu sinusoidālo projekciju, ko definē ļoti vienkāršs transformācijas algoritms

$$x = (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi$$

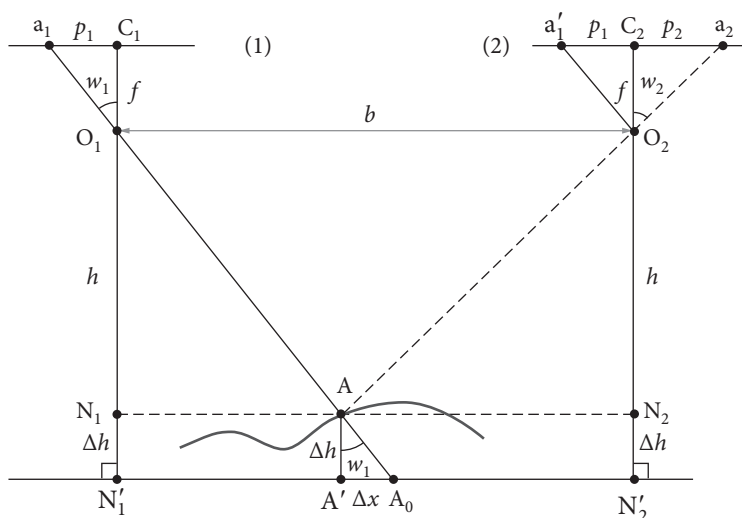
$$y = \varphi \tag{3.51.}$$

Pēc šīs projekcijas iegūst 3-94. att. redzamā veida kartes, kurās ģeogrāfiskie objekti deformējas, bet to laukumu izmēri saglabājas (3-107. att.).

3.7.7. levads fotogrammetrijā

Fotogrammetrija klasiskā nozīmē ir prasme veidot trīsdimensionālu (3D) struktūru (attēlu), izmantojot divus vai vairākus divdimensionālus (2D) attēlus. Taču tālāzpētē fotogrammetrijas metodes ir svarīgas arī, lai pareizi projicētu Zemes virsmas punktus uz kartēm, izmantojot dažādas kartogrāfiskās projekcijas. Lai saprastu problēmas būtību, apskatām 3-108. att. kreiso daļu, kurā shematiski attēlota tālāzpētes iekārta ar objektīvu O_1 augstumā h virs Zemes etalonvirsmas (ko reprezentē horizontālā ass) punkta N'_1 . Ar šo iekārtu reģistrē Zemes virsmas punktu A , kura attēls veidojas punktā a_1 uz sensora gaismas jutīgās virsmas (1).

Lai pareizi projicētu punktu A uz etalonvirsmas (kartes), ir jāzina tā augstums Δh virs šīs virsmas. Patiesi, ja punkts A atrodas uz etalonvirsmas, tad tas uz kartes jāprojicē punktā A_0 , bet, ja tas atrodas augstumā Δh virs etalonvirsmas, tad tas uz kartes jāprojicē citā punktā A', kas ir nobīdīts par horizontālu lielumu Δx attiecībā pret punktu A_0 . Ja patiesais augstums Δh nav zināms, tad punkta A precīzu horizontālo lokalizāciju īstenot nav iespējams. 3-108. att. redzamais trijstūris $\triangle AA_0A'$ ļauj viegli noteikt, kā ir saistīti horizontālās (Δx) un vertikālās (Δh) lokalizācijas parametri



3-108. att. Fotogrammetrisko efektu skaidrojums.

$$\Delta x = \Delta h \tan w_1$$

Attēla interpretatoram ir precīzi zināms sensora optiskās sistēmas fokusa attālums f , kā arī ir iespējams izmērīt punkta A attēla a_1 attālumu p_1 no aerofotogrāfijas t. s. optiskā centra C_1 . Tādējādi leņķi w_1 , kas nosaka taisnes O_1A stāvokli telpā, var aprēķināt (skat. trijstūri $\triangle O_1a_1C_1$)

$$\tan w_1 = \frac{p_1}{f}$$

un iegūstam sakarību

$$\Delta x = \frac{p_1}{f} \Delta h \quad (3.52.)$$

Taču uzzināt patieso Δh vērtību pēc viena satelītattēla (aerofotogrāfijas) nav iespējams, tādēļ fotogrammetrijā izmanto divus vai vairākus šādus attēlus. Apskatīsim gadījumu, kad mūsu rīcībā ir divi satelītattēli (3-108. att.) ar optiskajiem centriem C_1 un C_2 , kas atrodas bāzes attālumā b viens no otra, un vienkāršības labad veikti no vienāda augstuma h virs Zemes virsmas. Tad, līdzīgi kā iepriekš, varam aprēķināt leņķi w_2 un ar to saistīto taisni O_2A . Divu zināmu taisņu (O_1A un O_2A) krustpunkts ir viegli aprēķināms³¹, un tas nosaka viennozīmīgu punkta A stāvokli telpā, t. i., ļauj aprēķināt patiesās lokalizācijas parametru Δh un Δx vērtības. Patiesi, no līdzīgiem trijstūriem $\triangle O_1a_1C_1$ un $\triangle O_1AN_1$, kā arī $\triangle O_2a_2C_2$ un $\triangle O_2AN_2$ izriet

$$\frac{p_1}{f} = \frac{N_1A}{h - \Delta h}, \quad \frac{p_2}{f} = \frac{N_2A}{h - \Delta h}$$

ko saskaitot

$$\frac{p_1 + p_2}{f} = \frac{b}{h - \Delta h}$$

jo $N_1A + N_2A = b$ un, visbeidzot,

$$\Delta h = h - \frac{bf}{p_1 + p_2} = h - \frac{bf}{p} \quad (3.53.)$$

Formulas (3.53.) praktisku izmantošanu apgrūtina divi apstākļi. Pirmkārt, attālumus p_1 un p_2 ir grūti precīzi izmērīt, jo tos mēra attiecībā pret satelītattēlu optiskajiem centriem C_1 un C_2 , kuru precīza atrašanās vieta uz attēla ne vienmēr ir nosakāma. Otrkārt, ir visai komplicēti precīzi noteikt bāzes attālumu b (ar augstumu h situācija ir citāda, jo var izmantot precīzus satelītaltimetru mērījumu rezultātus). Pirmo problēmu ir viegli pārvarēt, savietojot (fiziski vai virtuāli) abus satelītattēlus (skat. 3-108. att. labo augšējo daļu) un izmērot attālumu $p_1 + p_2$ kā attālumu p starp punktiem a'_1 un a_2 uz savietotā attēla, ko iespējams izdarīt daudz precīzāk.

3.7.8. Vertikālo diferencu noteikšana

Lai izvairītos no neprecizitātēm, kas saistītas ar bāzes attāluma b iespējamām noteikšanas kļūdām, fotogrammetrijā bieži strādā ar objektiem, kuriem ir redzami un nomērami divi tā gali (augšējais A un apakšējais B, skat. 3-109. att.).

Spriežot līdzīgi kā iepriekš, nosakām minēto galu augstumus atbilstoši (3.53.)

31 Šo metodi sauc par triangulāciju.

$$\begin{aligned}\Delta h_A &= h - \frac{bf}{p_a} \\ \Delta h_B &= h - \frac{bf}{p_b}\end{aligned}\quad (3.54.)$$

No otrā vienādojuma (3.54.)

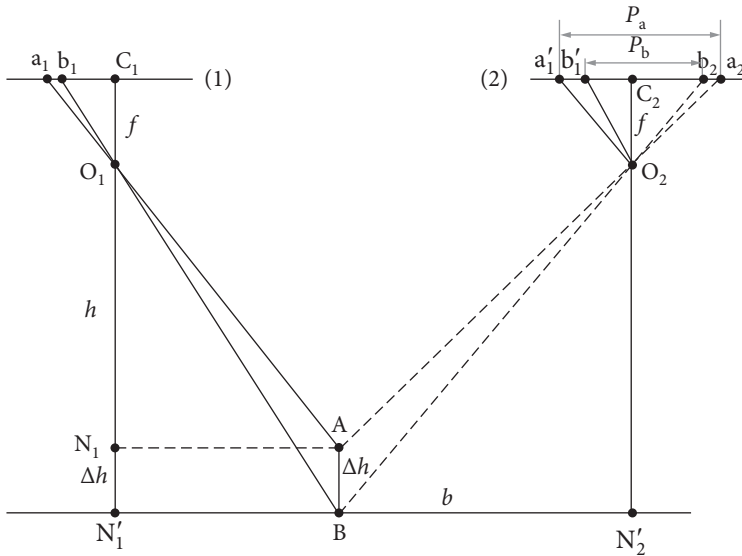
$$b = \frac{(h - \Delta h_B) p_b}{f}$$

ko, ievietojot pirmajā no vienādojumiem (3.54.),

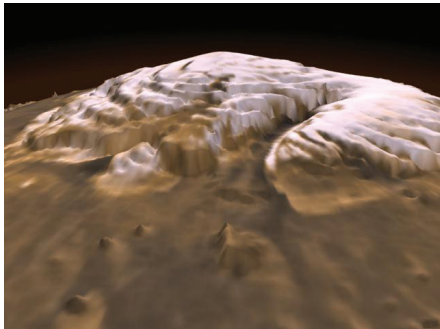
$$\Delta h_A = h \frac{\Delta p}{p_a} + \Delta h_B \frac{p_b}{p_a}$$

kur $\Delta p = p_a - p_b$ nereti dēvē par konkrētā objekta paralaksi. Izmantojot pēdējās divas formulas, iespējams noteikt analizējamā objekta vertikālo izmēru (augstumu)

$$\Delta h = \Delta h_A - \Delta h_B = (h - \Delta h_B) \frac{\Delta p}{p_a} \cong h \frac{\Delta p}{p_a} \quad (3.55.)$$



3-109. att. Vertikālo diferencu noteikšanas skaidrojums.



3-110. att. Marsa polārie ledāji ar pārspīlētu objektu augstumu (NASA).

ņemot vērā, ka $\Delta h_B \ll h$. Formula (3.55.) nav atkarīga no bāzes attāluma b , un to bieži izmanto fotogrammetriskajos algoritmos vertikālā reljefa aprēķināšanai.

Nobeigumā vēl dažas piezīmes. Lai akcentētu tieši vertikālā reljefa īpatnības, nereti veido 3D kartes (attēlus) ar daudzkārt pārspīlētu objektu augstumu (3-110. att.), ko aprēķina saskaņā ar formulu (3.55.), kurā patiesā h vērtība aizstāta ar daudz lielāku fiktīvu vērtību.

Turklāt jāņem vērā, ka reālos fotogrammetriskos algoritmos ir rūpīgi jānovērš sistemātiskās kļūdas, kas rodas no tālzipētes platformu augstumu diferencēm ($O_1N'_1 \neq O_2N'_2$), kā arī sensoru optisko asu dažādiem slīpumiem ($O_1N'_1 \nparallel O_2N'_2$). Tās īstenībā ir ļoti nopietnas problēmas, kuru neievērošana var izraisīt lielas satelītattēlu interpretācijas sistemātiskās kļūdas un neadekvātus rezultātus.

3.8. Ģeoreferencēšana un ģeotransformēšana (23. lekcija)

3.8.1. Kopsavilkums

Ģeoreferencēšana un ģeotransformēšana ļauj nodibināt atbilstību starp tālzipētes attēlu objektiem (to pikseļiem) un šo objektu (pikseļu) telpiskajām vai kartogrāfisko projekciju koordinātām. Lai to paveiktu, ir jānovērš dažādas attēlu distorsijas, jāreducē fotogrammetriskie efekti un jāveic vairākas citas ģeometriskas transformācijas. Viena no svarīgākajām aplūkojamo metožu lietošanas jomām ir t. s. ortoattēlu formēšana.

3.8.2. Problēmas nostādne un pamatjēdzieni

Tālzipētē izmantotie sensori “neko nezina” par kartogrāfiskajām projekcijām, tāpēc ar to palīdzību iegūto attēlu ģeometriskās īpašības var visai būtiski atšķirties no ģeogrāfisko karšu (t. i., kartogrāfisko projekciju) ģeometriskajām īpašībām. Tas nozīmē, ka ģeometriski nepārveidoti tālzipētes attēli tikai kvalitatīvā nozīmē (lai novērtētu vispārējo ģeogrāfisko situāciju), bet ne kvantitatīvā nozīmē ir izmantojami kā ģeogrāfiskās kartes. Lai novērstu šo nepilnību, ir jānodibina viennozīmīga atbilstība starp attēla jebkura objekta (pikseļa) koordinātām (x_i, y_i) ³², un šī objekta (pikseļa) kartogrāfiskajām koordinātām (x_k, y_k) (2D gadījumā) vai telpiskajām koordinātām (X, Y, Z) ³³ (3D gadījumā). Šādu koordinātu atbilstību visbiežāk realizē matemātiska algoritma (un tam atbilstošas datorprogrammas) formā, un šo procesu sauc par ģeoreferencēšanu.

Pēc tam, kad veikta ģeoreferencēšana (t. i., izstrādāts un pieejams izmantošanai minētais algoritms), analizējamo tālzipētes attēlu iespējams transformēt (pārrēķināt) citā digitālajā attēlā, kas atbilst noteiktas kartogrāfiskās projekcijas prasībām. Šo procesu tālzipētē dēvē par ģeotransformēšanu [33]. Ģeoreferencēšana un ģeotransformēšana, kas izmanto tas tālzipētes datus, ļauj formēt t. s. ģeotelpiskos datus, ko iespējams saglabāt ĢIS (ģeogrāfisko informācijas sistēmu) telpiski sinhronizētos slāņos.

Jāpiezīmē tikai, ka ģeoreferencēšanas un ģeotransformēšanas jēdzienus reizēm lieto nekonsekventi un dažkārt pat vienā un tajā pašā nozīmē, vai arī nereti jauc ar citiem līdzīgiem jēdzieniem (ģeokodēšanu u. c.).

3.8.3. Ģeoreferencēšanas afinās transformācijas

No ģeometriskā viedokļa tālzipētes attēlu iegūšanas nosacījumi ir vistuvāk ortometrisko projekciju (skat. 3.7.3. sadaļu) formēšanas nosacījumiem. Taču ir virkne atšķirību, un dažas no tām var būt visai ievērojamas. Ja sensors nav precīzi orientēts vertikālā virzienā, tad attēlos parādās slīpuma distorsijas, kas izpaužas kā perspektīvas kropļojumi, proti, kā

32 Šīs koordinātas nosaka konkrētā pikseļa atrašanās vieta digitālajā attēlā, proti, rindiņas un kolonnas indeksi (skat. 3.1.2. sadaļu).

33 Vai ar tām saistītajām sfēriskajām koordinātām (r, φ, λ) .

atšķirīgi mērogi dažādās attēla daļās (skat. 3-111. att. kreisās puses attēlu).

Specifiskas ģeometriskās distorsijas novērojamas arī ar CCD vektoru skenētos tālzipētes attēlos ar lielu telpisko pārklājumu (skat. 3-111. att. labās puses attēlu), kad Zemes rotācijas dēļ kvadrātisks Zemes virsmas apgabals attēlojas rombiska attēla formā. Šiem diviem lielajiem ģeometriskajiem kropļojumiem (distorsijām) vēl pievienojas fotogrammetriskie efekti (skat. 3.7.8. sadaļu), kā arī izmantoto optisko sistēmu radītās un citas mazāknozīmīgas distorsijas.

Ģeoreferencēšana (t. i., atbilstības nodibināšana starp attēla pikseļu koordinātām un tām atbilstošajām kartogrāfiskajām koordinātām) vispārējā veidā ir veicama formā

$$\begin{aligned}x_k &= f_x(x_i, y_i) \\ y_k &= f_y(x_i, y_i)\end{aligned}\quad (3.56.)$$

kur f_x un f_y – prasmīgi izvēlētas transformāciju funkcijas. Kā transformāciju funkcijas diezgan bieži izmanto lineāras funkcijas

$$\begin{aligned}x_k &= ax_i + by_i + c \\ y_k &= ex_i + fy_i + g\end{aligned}\quad (3.57.)$$

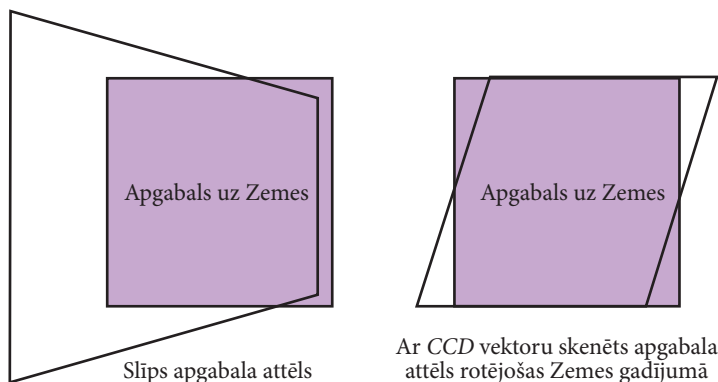
kas atkarīgas no sešiem parametriem (transformācijas konstantēm) a, b, c, e, f un g . Sakarības (3.57.) bieži reprezentē matricu formā

$$\begin{Bmatrix} x_k \\ y_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a & b \\ e & f \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c \\ g \end{Bmatrix}\quad (3.58.)$$

vai arī

$$\begin{Bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a & b & c \\ e & f & g \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{Bmatrix}\quad (3.59.)$$

Šāda veida lineāras transformācijas dēvē par afinām transformācijām, un tās reprezentē izmantoto koordinātu sistēmu sākuma punktu nobīdi, pagriezienu, mēroga maiņu un bīdes transformāciju. Afīno transformāciju speciālgadījums ir konformās transformācijas, kas nerepresentē bīdes transformāciju un ir atkarīgas tikai no četrām transformācijas kon-



3-111. att. levērojamākās tālzipētes attēlu ģeometriskās distorsijas.

stantēm (c, g, θ, s), proti, parametri a, b, e un f ir atkarīgi tikai no diviem lielumiem – leņķa θ , ko veido abu koordinātu sistēmu vienāda nosaukuma asis, un mērogu izmaiņas koeficienta s izmantotajās koordinātu sistēmās, formā

$$a = s \cos \theta$$

$$b = s \sin \theta$$

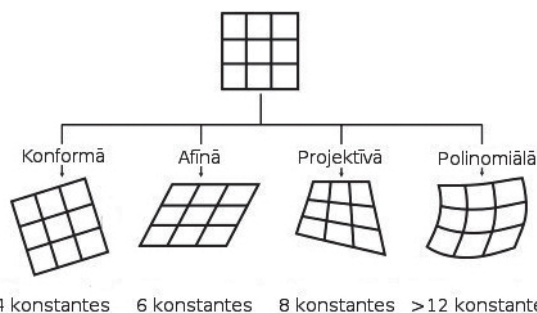
$$e = -s \sin \theta$$

$$f = s \cos \theta$$

Transformāciju funkciju parametrus (t. i., konstantes a, b, c, e, f un g) visbiežāk nosaka, izmantojot ģeogrāfiskos kontrolpunktus jeb atbalsta punktus. Par ģeogrāfiskajiem kontrolpunktiem parasti izvēlas kompakts un tālīzpētes attēlā labi saskatāmus objektus ar tādējādi precīzi zināmām attēla koordinātām x_i un y_i (ceļu krustojumus, tiltus, izteiktas ģeomorfoloģiskas struktūras vai citus līdzīgus veidojumus). Šiem objektiem uz Zemes speciāli tiek izmērītas precīzas GPS koordinātas un, izmantojot kartogrāfisko transformāciju formulas (skat. 3.7. nodaļu), aprēķinātas to kartogrāfiskās koordinātas x_k un y_k izvēlētais projekcijas sistēmā. Tas ļauj katram kontrolpunktam uzrakstīt divus (3.57.) lineārus vienādojumus, kur ir sešas nezināmas transformācijas konstantes. Trīs ģeogrāfiskie kontrolpunkti tādējādi ļauj uzrakstīt jau sešus vienādojumus minēto sešu nezināmo parametru aprēķināšanai. Izmantojot vairāk nekā trīs kontrolpunktus, transformācijas konstanšu aprēķināšanai lieto mazāko kvadrātu metodi [13]. Kad transformācijas funkciju parametri ir šādi aprēķināti, formulas (3.57.) ir lietojamas jebkuram attēla punktam (pikselim), lai noteiktu tā kartogrāfiskās koordinātas.

3.8.4. Citas ģeoreferencēšanas transformācijas

Taču afīnās un konformās ģeoreferencēšanas transformācijas aptver tikai daļu no iespējamām tālīzpētes attēlu deformācijām (skat. 3-112. att., kurā redzamas regulāra koordinātu tīkla deformācijas dažādu transformāciju gadījumos). Afīnās transformācijas diemžēl nav lietojamas pat slīpuma distorsiju kompensēšanai (3-111. att.) gadījumos, kad sensors nav precīzi orientēts vertikālā virzienā, nemaz nerunājot par nelineārajām distorsijām, kādas parādās, izmantojot komplicētas optiskās sistēmas. Tādēļ samērā bieži izmanto arī sarežģītākas koordinātu transformācijas funkcijas (3.56.).



3-112. att. Ģeoreferencēšanas transformāciju ģeometriskā interpretācija.

Lai ģeoreferencētu tālzipētes attēlus, kam raksturīgas slīpuma distorsijas, lieto šādas koordinātu transformācijas funkcijas:

$$\begin{aligned}x_k &= \frac{ax_i + by_i + c}{hx_i + ly_i + 1} \\y_k &= \frac{ex_i + fy_i + g}{hx_i + ly_i + 1}\end{aligned}\quad (3.60.)$$

kas atkarīgas no astoņiem parametriem (transformācijas konstantēm) a, b, c, e, f, g, h, l . Funkciju (3.60.) racionālā (t. i., daļveida) struktūra izriet no slīpo projekciju (3-113. att.) ģeometriskajām likumsakarībām.

Lai noteiktu astoņas transformācijas konstantes, pārveidojam sakarības (3.60.) formā

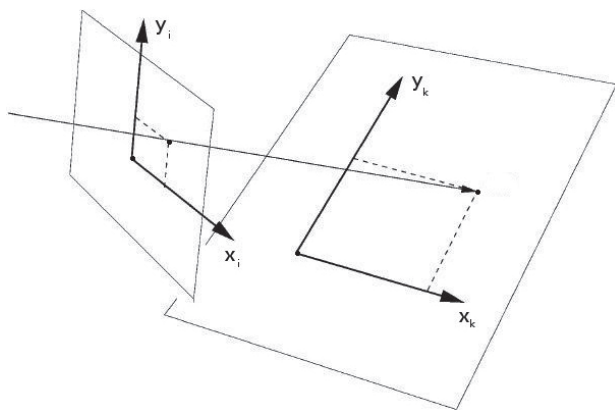
$$\begin{aligned}ax_i - hx_k x_i + by_i - lx_k y_i + c &= x_k \\ex_i - hy_k x_i + fy_i - ly_k y_i + g &= y_k\end{aligned}\quad (3.60.)$$

kas ir lineāras attiecībā pret nezināmajiem lielumiem a, b, c, e, f, g, h, l . Tādējādi ir jāizmanto vismaz četri ģeogrāfiskie kontrolpunkti, lai aprēķinātu šo konstanšu vērtības. Ja pieejamo kontrolpunktu skaits ir lielāks, līdzīgi kā afīno transformāciju gadījumos, lietojama mazāko kvadrātu metode.

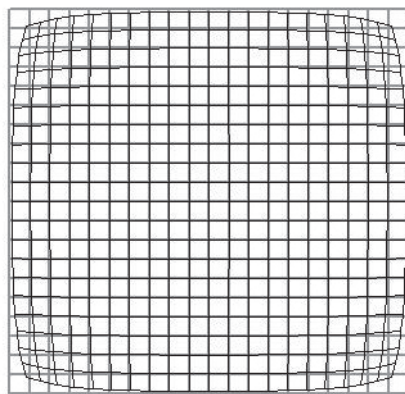
Taču, apstrādājot augstas izšķirtspējas tālzipētes attēlus, jārēķinās arī ar nelineārām distorsijām, kuru galvenais izcelsmes avots ir attēla iegūšanai izmantotā optiskā sistēma (3-114. att.). Šāda veida distorsiju kompensācijai visbiežāk izmanto polinomiālās transformācijas sakarības, vienkāršākā no kurām (jeb kvadrātiskā transformācija) ir atkarīga no 12 parametriem (transformācijas konstantēm $a, b, c, d, e, f, g, h, k, l, m, n$) un ir uzrakstāma formā

$$\begin{aligned}x_k &= a + bx_i + cy_i + dx_i y_i + ex_i^2 + fy_i^2 \\y_k &= g + hx_i + ky_i + lx_i y_i + mx_i^2 + ny_i^2\end{aligned}\quad (3.62.)$$

Transformācijas parametru noteikšana iespējama, izmantojot vismaz sešus ģeogrāfiskos kontrolpunktus vai arī lielāku to skaitu un lietojot mazāko kvadrātu metodi.



3-113. att. Slīpo projekciju ģeometriskā aina.



3-114. att. Tipiska optisko sistēmu nelineārā distorsija.

Vēl lielākas telpiskās izšķirtspējas sasniegšanai atsevišķos gadījumos ir lietderīgi izmantot arī augstākas kārtas polinomālās koordinātu transformācijas formulas vai arī (lai samazinātu formulās ietilpstošo parametru skaitu) formulas, kas izriet no distorsiju fizikālās modelēšanas rezultātiem. Piemēram, optisko sistēmu distorsijas apraksta šāds matemātiskais modelis [38]:

$$x'_i = x_i(1 + \delta_r)$$

$$y'_i = y_i(1 + \delta_r)$$

kur

$$\delta_r = \left((K_3 r_i^2 + K_2) r_i^2 + K_1 \right) r_i^2$$

un

$$r_i^2 = (x_i - x_{io})^2 + (y_i - y_{io})^2$$

Konstantes K_1 , K_2 un K_3 sauc par optiskās distorsijas koeficientiem (bieži $K_3 = K_2 = 0$), (x_{io}, y_{io}) – attēla optiskā centra (parasti attēla centrālā pikseļa) koordinātas. Šeit (x'_i, y'_i) – koriģētās pikseļa koordinātas, (x_i, y_i) – faktiskās pikseļa koordinātas.

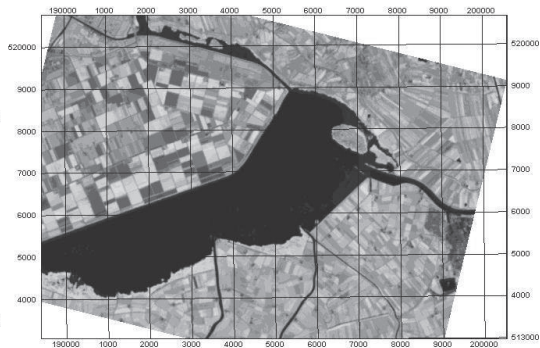
3.8.5. Ģeotransformēšana

Ģeoreferencēšanas rezultātus iespējams vizualizēt, uzklājot tālīzpētes attēlam kartogrāfisko koordinātu tīklu (3-115. att.), kas aprēķināts atbilstoši izmantotajām transformāciju funkcijām (3.56.). Taču šis koordinātu tīkls parasti nav ne lineārs, ne homogēns, ne arī orientēts pa attēla asīm. Tādēļ, lai turpmāk varētu sekmīgi strādāt ar ĢIS slāņiem, minētais attēls bieži ir jāpārreķina formā, kas nodrošina ĢIS slāņu sinhronizācijas iespēju, t. i., formā ar homogenizētu kartogrāfisko koordinātu sistēmu (3-116. att.). Šādu tālīzpētes attēla pārformēšanas (pārreķināšanas) procesu sauc par ģeotransformēšanu.

Ģeotransformēšanu veic, izmantojot jau iegūtās ģeoreferencēšanas koordinātu transformācijas formulas, ar kurām aprēķina katra izmantotā tālīzpētes attēla pikseļa kartogrāfiskās koordinātas. Tas ļauj uzkonstruēt transformētu attēla pikseļu režģi kartogrāfiskās projekcijas koordinātu sistēmā (3-117. att. augšējā daļa). Taču šis transformētais attēla pikseļu režģis nebūs regulārs, un to nav iespējams tiešā veidā reprezentēt kā digitālo attēlu



3-115. att. Ģeoreferencēts tālīzpētes attēls [33].



3-116. att. Ģeotransformēts tālīzpētes attēls [33].

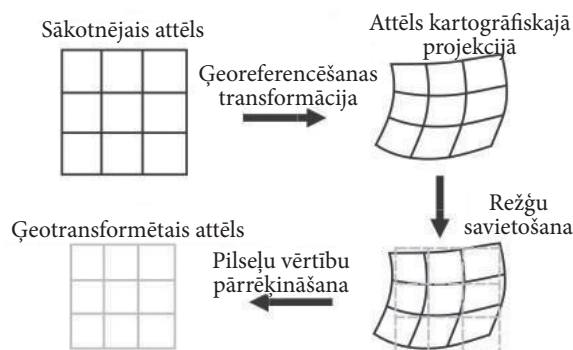
ar regulāru pikseļu izkārtojumu. Tādēļ ģeotransformācijas procesā veic formējamā (ģeotransformētā) attēla regulārā pikseļu režģa savietošanu (superpozīciju) ar kartogrāfiskās projekcijas plaknē transformētā sākotnējā attēla neregulāro pikseļu režģi (3-117. att. labā puse). Abu šo digitālo attēlu (regulārā un neregulārā) pikseļi savstarpēji nesakrīt, tāpēc ir jāaprēķina ģeotransformētā attēla pikseļu intensitātes jeb pelēkās vērtības, izmantojot zināmo (bet neregulāri izvietoto) tālzipētes attēla pikseļu vērtības. Šo ģeotransformētā attēla pikseļu intensitāšu aprēķināšanu (sauktu arī par attēla pikseļu pārrēķināšanu) var veikt dažādos veidos, kādus piedāvā digitālo attēlu apstrādes tehnoloģijas [23], bet biežāk lietotās ir (a) tuvākā kaimiņa metode, (b) bilineārā interpolācija, (c) triangulārā interpolācija, (d) bikubiskā interpolācija un citas.

Tuvākā kaimiņa metodes lietošanas gadījumā ģeotransformētā attēla pikseļa intensitātes vērtība tiek izvēlēta tāda, kāda tā ir transformētā sākotnējā attēla tuvākajam pikselim (3-118. att.). Pikseļu tuvumu parasti nosaka, salīdzinot attālumus starp to centriem izmantotajā kartogrāfiskajā koordinātu sistēmā.

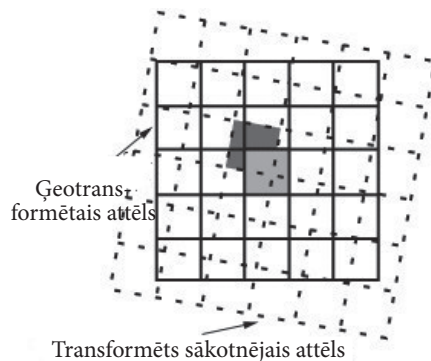
Bilineārās interpolācijas metode būtībā ir digitālo attēlu apstrādes masku operācija (skat. 3.1.5. sadaļu), ko piemēro ģeotransformētā attēla pikselim četriem tuvākajiem transformētā sākotnējā attēla pikseļiem, proti,

$$R = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i z_i, \quad W = \sum_{i=1}^N w_i \quad (3.63.)$$

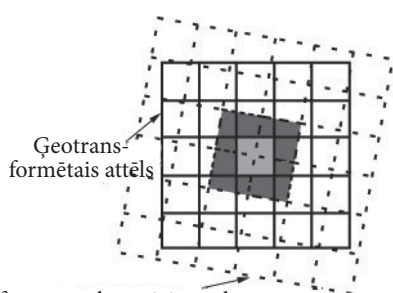
kur $N=4$, z_i – sākotnējā attēla atbilstošo pikseļu intensitāšu vērtības, svaru koeficientus w_i



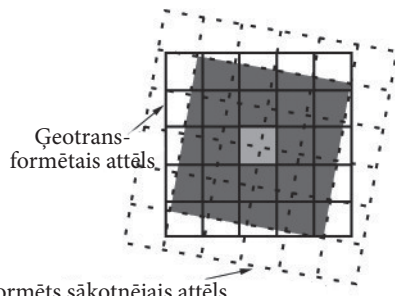
3-117. att. Ģeotransformācijas procesa shematiskais attēlojums.



3-118. att. Tuvākā kaimiņa metodes skaidrojums.



3-119. att. Bilineārās interpolācijas metodes skaidrojums.



3-120. att. Augstāku kārtu interpolācijas metožu skaidrojums.

parasti izvēlas apgriezti proporcionālus attālumiem starp ģeotransformētā un transformētā sākotnējā attēla pikseļu centriem.

Triangulārās interpolācijas un bikubiskās interpolācijas metodes būtībā tāpat ir digitālo attēlu apstrādes masku operācijas, kas izmanto ģeotransformētā attēla pikselim 16 tuvāko transformētā sākotnējā attēla pikseļu vērtības (3-120. att.). Arī šīs metodes izmanto formulas (3.63.), tikai pie $N=16$, bet atšķirības faktiski ir vienīgi svaru koeficientu w_i aprēķināšanas algoritmos. Tādējādi ģeotransformēto attēlu aprēķināšanas metodes (izņemot tuvākā kaimiņa metodi) ir specifiskas masku operācijas, kas izmanto maskas ar pāru skaita pikseļu malām un kas darbojas uz sākotnējā attēla, bet kuru darbības rezultāts tiek piešķirts īpaši izvēlētiem ģeotransformētā attēla pikseļiem.

Bilineārās interpolācijas un augstāku kārtu interpolācijas metodes nodrošina kvalitatīvu sākotnējā tālzipētes attēla ģeotransformāciju ar labu telpisko izšķirtspēju. Taču, ņemot vērā to, ka attēla pikseļu intensitāšu vērtības pārrēķina atbilstoši formulām (3.63.), tiek izmainīta un daļēji zaudēta attēlā esošā radiometriskā un spektrālā informācija. Savukārt tikai tuvākā kaimiņa metode nodrošina radiometriskās un spektrālās informācijas saglabāšanu ģeotransformētajā attēlā, kas šajā gadījumā ir ar neredzamiem zemāku telpisko izšķirtspēju.

3.8.6. Ortoattēlu formēšana

Kā jau iepriekš minēts (skat. 3.7.8. sadaļu), fotogrammetriskie efekti izpaužas arī tādējādi, ka objektiem uz tālzipētes attēliem parādās horizontālās nobīdes, un to cēlonis ir vertikālais reljefs (3.52.). Ja attēlam atbilstošā Zemes virsmas apgabala reljefs ir izteikti nehomogēns (piemēram, kalnu apgabali), tad minētās horizontālās nobīdes formē ļoti nelineāru reljefa distorsiju fonu, kas var negatīvi ietekmēt ģeoreferencēšanas rezultātus. Tādēļ, pirms veikt precīzu ģeoreferencēšanu, reljefa distorsijas vēlams novērst, izmantojot pieejamos digitālos augstuma modeļus (*DEM*)³⁴ un algoritmus, kas īsteno formulai (3.52.) atbilstošas korekcijas. Šeit jāatzīmē, ka runa nav par ģeotransformēšanas procedūru, jo attēls netiek pārrēķināts un tā pikseļu intensitāšu vērtības netiek mainītas, bet koriģēta tiek tikai atbilstošo pikseļu atrašanās vieta attēla koordinātu sistēmā (x_p, y_i).

Šādam nolūkam, protams, jāizmanto tādas *DEM* vērtības, kas ir transformētas attēla koordinātu sistēmā. Lai to nodrošinātu, jāveic attēla tuvināta ģeoreferencēšana, kas parasti tiek savienota arī ar slīpuma distorsiju korekciju, kas vairumā gadījumu nav īpaši lielas. Šo sākotnējo ģeoreferencēšanu veic, vai nu izmantojot četrus ģeogrāfiskos kontrolpunktus (skat. 3.8.4. sadaļu), vai arī tālzipētes sensora kalibrēšanas datus, tie var būt gan sensora GPS koordinātas, gan inerciālās orientācijas kontroles sistēmas datnes. Pirmajā gadījumā runā par netiešo, otrajā gadījumā – par tiešo sensora orientācijas kontroli. Ja sensora optiskās ass orientācijas noteikšanai izmanto gan ģeogrāfiskos kontrolpunktus, gan sensora kalibrēšanas datus, tad lieto terminu integrētā orientācijas kontrole.

Jāatzīmē, ka komplicētāka situācija veidojas gadījumos, kad par sensoru izmanto *CCD* vektoru, jo tad katrai attēla rindiņai iespējama atšķirīga sensora orientācija. Taču šī orientācija satelītu gadījumā mainās lēni un plūstoši³⁵, tādēļ to raksturojošos parametrus nav grūti

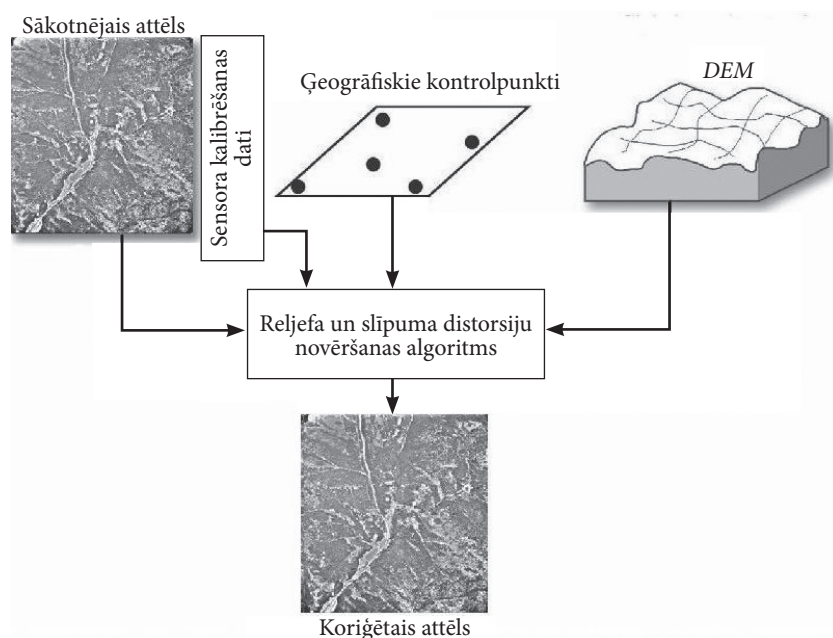
34 Angļu val. – *Digital Elevation Model*.

35 Līdzīgi arī aeroplatformām, kas aprīkotas ar sensoru inerciālās stabilizācijas iekārtām.

aproximēt ar zemas kārtas polinomiem. Šādā gadījumā tomēr nevar iztikt bez sensora kalibrēšanas datus iekļautās specifiskās informācijas, t. s. *RPC*³⁶ datnēm, lai kompensētu šīs *CCD* vektoriem raksturīgās specifiskās distorsijas.

Kad veikta aprakstītā reljefa un slīpuma distorsiju novēršana (3-121. att.), ko sauc par ortorektifikāciju³⁷, iespējams īstenot precīzu tālzpētes attēla ģeoreferencēšanu, kā arī to ģeotransformēt turpmākajam darbam piemērotas kartogrāfiskās projekcijas 2D vai 3D (pievienojot *DEM* datus) koordinātu sistēmā. Šo procedūru sauc par ortotransformāciju, iegūto rezultātu – par ortoattēlu, kas ir ērti un viegli telpiski sinhronizējams ar citiem izmantotās ĢIS slāņiem.

Nobeigumā atzīmēsim, ka, veicot augstas telpiskās izšķirtspējas tālzpētes attēlu apstrādi, ir svarīgi pareizi interpretēt izmantojamo digitālā augstuma modeli (*DEM*), jo ir jāatšķir digitālo virsmas modeli (*DVM*)³⁸ no digitālā reljefa modeļa (*DRM*)³⁹ (skat. 2-49. att.). Minēto interpretāciju ignorēšana vai to nepareiza izmantošana var izraisīt kļūdainus reljefa distorsiju novēršanas rezultātus augstas telpiskās izšķirtspējas gadījumos.



3-121. att. Reljefa un slīpuma distorsiju novēršanas (ortorektifikācijas) procesa shēma.

36 Angļu val. – *Rational Polynomial Coefficients*.

37 Angļu valodā to dēvē arī par “*monoplotting*”.

38 Angļu val. – *Digital Surface Model*.

39 Angļu val. – *Digital Terrain Model*.

4. daļa

Tālizpētes lietojumi

4.1. Ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (24. lekcija)

4.1.1. Kopsavilkums

Šajā nodaļā aprakstīti ģeogrāfisko informācijas sistēmu (ĢIS) darbības pamatprincipi un galvenā funkcionalitāte. Sniegts detalizēts ieskats bieži izmantotajos datu formātos, un nodaļas beigās piedāvāts piemērs, kā lietot ģeogrāfiskās informācijas sistēmas, lai aprēķinātu koku vainagu noseģumu procentos pilsētas kvartālos, ja doti tālizpētes dati un ielu karte.

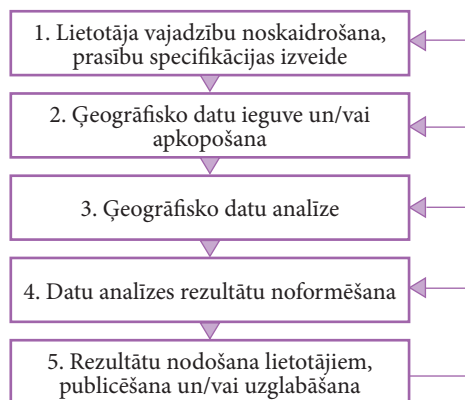
4.1.2. ĢIS un datu formāti

Ģeogrāfiskā informācijas sistēma (ĢIS) ir datorizēta sistēma ģeogrāfisko datu savākšanai, pārvaldībai un datu analīzei.

ĢIS lietojuma galvenais mērķis ir apkopot datus par pētāmo ģeogrāfisko apgabalu un veikt datu analīzi, lai atvieglotu lēmumu pieņemšanu vai iegūtu vairāk zināšanu par pētāmajā apgabalā notiekošajiem procesiem.

ĢIS lietojuma tipisks cikls (skat. 4-1. att.) sākas ar lietotāja vajadzību noskaidrošanu un izvērtēšanu, vai ĢIS ietvertās metodes un pieejamie dati šādā gadījumā spēj sasniegt nepieciešamos rezultātus.

Nākamais solis ir pieejamo ģeogrāfisko datu ieguve un/vai apkopošana. Šī soļa ietvaros var organizēt elektronisko karšu izstrādi vai arī datu pasūtīšanu citiem datu piegādātājiem, vai brīvi pieejamo ģeogrāfisko datu lejupielādi.



4-1. att. ĢIS lietojuma cikls.

GIS ietvaros pētāmo zemes virsmas apgabalu raksturo ar dažāda tipa ģeogrāfiskajiem datiem, ko iespējams izvietot kā atsevišķus "slāņus" kopējā projektā. Mūsu apkārtējā vide ir gana sarežģīta sistēma, kas ietver daudz elementu, tādēļ datu slāņus lieto, lai atspoguļotu atšķirīgus apkārtējās vides aspektus, ko kombinējot varam iegūt vairāk zināšanu. Piemēram, pilsētvides raksturošanai no iedzīvotāju labklājības viedokļa varam izmantot tādus datu slāņus kā svarīgo objektu karti (skolas, ārstniecības iestādes, pārtikas veikali u. tml.), iespējamu diskomfortu izraisošu objektu karti (dzelzceļa līnijas, uzņēmumi, kas veic gaisu piesārņojošas darbības u. tml.), koku vainagu noseģuma karti, autotransporta izraisīto trokšņu novērtējumu karti un citus datu avotus.

GIS digitālo karšu veidā ļauj ne tikai parādīt objektu ģeometriju (to novietojumu, formu, savstarpējās sakarības), bet arī atspoguļot objektu īpašības. Piemēram, meža inventarizācijas karte var parādīt gan mežaudžu telpisko izvietojumu, gan tādus meža inventarizācijas parametrus kā koku suga vai mežaudzes vecums.

Analizējot slāņus kopā jeb veicot t. s. slāņu analīzi, iespējams aprēķināt atvasinātus datu produktus un vizuāli vai automatizēti iegūt lēmumu pieņemšanai nepieciešamo informāciju. Datu analīzes sarežģītība atkarībā no prasību specifikācijas var ietvert metodes, sākot no vienkāršiem risinājumiem, tādiem kā efektīva datu slāņu noformēšana vizuālās analīzes atvieglošanai, un beidzot ar sarežģītiem mašīnmācīšanas algoritmu lietojumiem.

Piemēram, ja vēlamies attālināti noteikt, vai konkrētos meža nogabalos ir notikušas izmaiņas, tad kā atsevišķus datu slāņus varam ievadīt meža inventarizācijas datus, kas piesaistīti meža nogabalu kartei, krāsu infrasarkanā ortofotokarti (*CIR*¹), normalizēto digitālo virsmas modeli (nDVM, skat. 2.3.5. sadaļu) un jaunāko konkrētās vietas multispektrālo satelītattēlu. Veicot vizuālu datu analīzi, iespējams salīdzināt meža inventarizācijas datus ar nDVM un *CIR* redzamo informāciju, kā arī pārliicināties satelītattēlā, vai kopš nDVM un *CIR* datu ieguves ir notikušas kādas būtiskas izmaiņas.

Nākamais solis pēc datu analīzes ir iegūtās informācijas noformēšana un nodošana ieinteresētajām personām. Sagaidāmais galarezultāts visbiežāk ir karte, kas parāda lietotāju interesējošo informāciju vai pārskats, atskaite. Ja GIS izmanto plašu teritoriju analīzei, tad var saskarties ar ļoti lielu datu apjomu, un tā uzglabāšana un apstrāde prasa īpaši pielāgotus datorresursus.

Ar to, protams, GIS lietojuma cikls nebeidzas, jo, praktiski izmantojot zināšanas, var rasties jaunas vajadzības pēc GIS funkcionalitātes, kā arī jebkurā GIS cikla posmā var rasties nepieciešamība veikt korekcijas iepriekšējos posmos.

Lai labāk izprastu GIS sniegtās datu iegūšanas, apstrādes un analīzes iespējas, vispirms jāiepazīstas ar datu formātiem, kuros tiek reprezentēta ģeogrāfiskā informācija. Divi paši svarīgākie formāti ir rastra dati un vektordati. Retāk lieto arī trīsdimensiju modeļus un punktu mākoņus.

Rastra dati

Attēlojamie objekti tiek projicēti uz režģa, kur katra režģa šūnas jeb pikseļa vērtība raksturo ģeogrāfisko objektu pikselim atbilstošā režģa atrašanās vietā. Rastra dati ir matrica (skaitļu tabula), ko veido noteikts rindiņu un kolonnu skaits, skat. 4-2. att. Digitālie attēli ir rastra dati. Piemēram, MSS izmantošanas gadījumā pikseļu vērtība raksturo digitalizētu

1 *CIR* – *Color InfraRed*.

spožuma vērtību, ko uztver sensors no Zemes virsmas kādā konkrētā elektromagnētiskā starojuma frekvenču joslā. Savukārt zemes pārseguma tipu kartē rastra formātā katrā pikselī ir zemes pārseguma tipa kods.

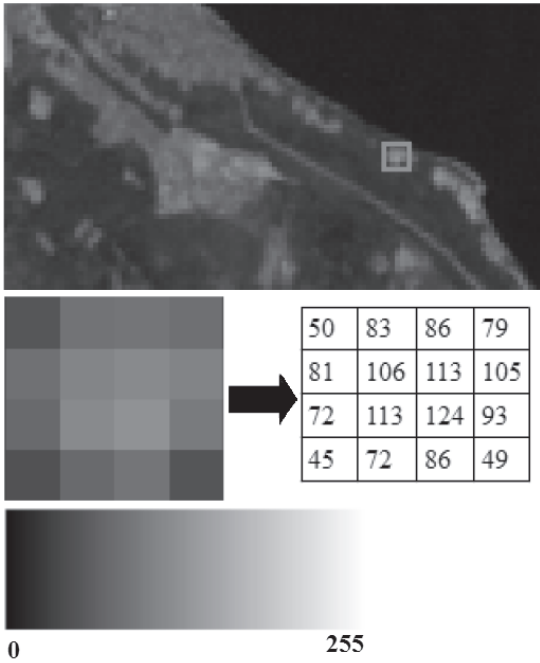
Bieži lietots rastra datu uzglabāšanas formāts ir *GeoTIFF*. *GeoTIFF* ir metadatu standarts, kas ļauj pievienot *TIFF* attēlu datnēm ģeogrāfisko informāciju: izmantoto kartogrāfisko projekciju, koordinātu sistēmu, referencilipsoīdu un citus parametrus [138]. *GeoTIFF* izmantošana ļauj rastra attēlus apskatīt un analizēt kopā ar citiem ģeogrāfiskajiem datiem, piemēram, digitālajām kartēm.

Veicot datu apstrādi ar pašu programmētiem risinājumiem, jāņem vērā, ka attēlu apstrādes operācijas visbiežāk tiek veiktas attēla koordinātu sistēmā, bet rezultāts tiek saglabāts, piesaistot attēlam kartogrāfiskās projekcijas koordinātas. 4-3. att. redzama attēlu koordinātu sistēma. Koordinātu sistēmas sākumpunkts atrodas attēla augšējā kreisajā stūrī, matricas pirmajā rindiņā un pirmajā kolonnā. *X* koordināta pieaug virzienā pa labi un atbilst matricas kolonnām, *Y* koordināta pieaug virzienā uz leju un atbilst matricas rindiņām, *Z* koordināta parasti raksturo attēla slāņu skaitu (krāsu attēli, multispektrālie attēli).

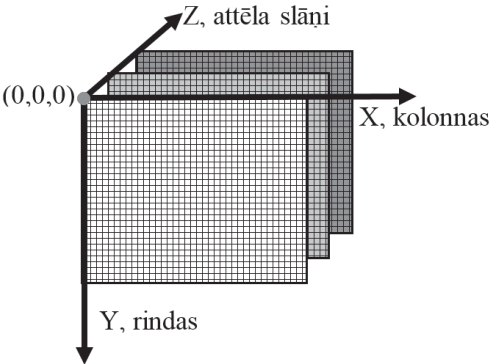
Lai attēla matricai piesaistītu kartogrāfiskās projekcijas koordinātas, ir pietiekami zināt:

- matricas pirmā elementa kartogrāfiskās projekcijas koordinātas un pikselim atbilstošā laukuma uz Zemes izmēru;
- vai matricas augšējā kreisā stūra elementa kartogrāfiskās projekcijas koordinātas un matricas apakšējā labā stūra elementa kartogrāfiskās projekcijas koordinātas.

Arī rastra attēla kartogrāfiskās projekcijas koordinātu sākumpunkts ir attēla augšējā



4-2. att. Rastra datu piemērs. Augšējā rinda: pelēko toņu satelītattēla piemērs. Vidējā rinda: pietuvināts satelītattēla fragments; saskatāmi atsevišķi attēla pikseli. Pelēko toņu vērtības kodētas, izmantojot vērtību skalu no 0 līdz 255.



4-3. att. Attēla koordinātu sistēma.

kreisajā stūrī, taču X un Y vērtību pieauguma virziens ir atkarīgs no izmantotās kartogrāfiskās projekcijas. Šī iemesla dēļ ir rūpīgi jāseko pikseļa izmēram, kas metadatos var būt arī negatīvs, norādot, ka, pieaugot attēla koordinātām, kartes projekcijas koordinātu vērtības dilst. Kopīgi apstrādājot datus ar dažādām kartogrāfiskajām projekcijām, rekomendējams veikt pārrēķinu uz vienu kartogrāfisko projekciju un pārlicināties, ka pēc pārrēķiniem nav ģeometrisku nobīžu starp datu slāņiem.

Vektordati

Attēlojamo objektu reprezentācijai izmanto ģeometriskus pamatelementus, ko norāda ar matemātisku izteiksmju palīdzību. Vektordatu formātā visbiežāk uzglabā digitālās kartes (skat. 4-4. att.). Objektus kartēs veido, izmantojot šādus pamatelementus:

- **punkts**, piemēram, punktus iespējams izmantot, lai digitālajās kartēs reģistrētu apdzīvoto vietu centrus, mobilo sakaru torņus, ceļu satiksmes negadījumu vietas u. tml.;
- **līnija**, piemēram, ceļi, upes, elektrolīnijas;
- **daudzstūris jeb poligons**, piemēram, ēkas, mežaudzes, ūdenstilpes.

Bieži izmantots vektordatu formāts digitālo karšu uzturēšanai ir *ESRI SHP* (dēvēta par šeidatni). *SHP* formāts ļauj saglabāt objektu ģeogrāfisko novietojumu, ģeometriju un īpašības. *SHP* formātu veido vismaz trīs atsevišķas datnes [93]:

- 1) ģeometrijas formātā *.shp* tiek glabāti kartes objektu ģeometrijas raksturlielumi: punkti, līnijas vai poligoni un informācija par to piesaisti ģeogrāfiskajām koordinātēm;
- 2) indeksu formāts *.shx* nodrošina ātru objektu meklēšanu;
- 3) datubāzes datnē *.dbf* glabā papildu informāciju par katru kartes objektu, piemēram, objekta nosaukumu, valdošo koku sugu meža atbilstošajā nogabalā vai koku vecumu. *.dbf* datnes nodrošina tādu datubāzu funkcionalitāti ģeogrāfisko datu apstrādē kā vaicājumu lietošana, informācijas apkopošana, vairāku elektronisko karšu pareiza savienošana u. c.

Vaicājums ir specifiskas informācijas pieprasījums no datubāzes. Elektroniskajās kartēs var atlasīt tikai interesējošo informāciju, norādot vaicājumā interesējošos kritērijus, pie-



4-4. att. Vektordatu piemērs. Mežu teritorijas iekrāsotas pelēkā krāsā un saglabātas kā poligonu digitālā kartē. Autoceļi saglabāti kā līniju kartē. Apdzīvotās vietas saglabātas kā punktu kartē.

mēram, ja *.dbf* datnē ir ieraksti par koku sugām meža nogabalos, tad var atlasīt tikai tos nogabalus, kur dominējošā koku suga ir priede ar vienkāršas salīdzināšanas operācijas palīdzību: *kokuSuga='priede'*. Vaicājumus pārsvarā raksta *SQL²* valodā, nodrošinot grafisko saskarni to lietotāju vajadzībām, kuri *SQL* nepārvalda brīvi.

Rastra un vektordatu priekšrocības un trūkumi apkopti 4-1. tabulā.

Pašrocīgi veicot datu apstrādi, dati, protams, jālejupielādē. Savukārt, ja kartes un tālizpētes dati jāanalizē tikai vizuāli, tad ērti izmantot ģeogrāfiskās informācijas abonēšanas pakalpojumus. Abonēšanas pakalpojumi bieži neatļauj datu lejupielādēšanu lietotāja datorā, taču ir pieejami aktuālie dati vizuālas apstrādes mērķiem un ir finansiāli izdevīgāk pārlūkot plašas teritorijas.

Populārs risinājums ir tīkla karšu serviss *WMS³*. *WMS* ir standarta protokols ģeotelpisko datu apmaiņai tīmeklī no vienas vai vairākām ģeotelpisko datu datubāzēm. ĢIS ietvaros notiek pieslēgšanās konkrētam *WMS* serverim, un lietotājs nosūta pieprasījumu par to, kādu apgabalu un kāda tipa dati nepieciešami. Rezultātā ĢIS logā tiek pievienots pieprasītais datu slānis, un to iespējams aplūkot kopā ar citiem lietotāja datiem.

Izmantotajās ĢIS bieži pieejami arī atvērto datu slāņi vizuālas analīzes mērķiem, piemēram, iespējams pievienot *OpenStreetMap* karti vai *Google Maps* servisā iekļautos augstas telpiskās izšķirtspējas satelītattēlus. Dažas no biežāk izmantotajām ĢIS ir *QGIS* (pieejamas bez maksas), *ArcGIS*, *GRASS GIS* un *Hexagon Geospatial* produkti.

Mūsdienu ĢIS attīstības tendences ir saistītas ar mākoņskaitļošanu un tīmekļa servisiem. Mākoņservisi ietver gan fizisko infrastruktūru, gan programmatūras izīrēšanu, kas pieejama pēc pieprasījuma, izmantojot piekļuvi caur standarta interneta protokoliem [113]. ĢIS izmantošana mākoņservisā sniedz lietotājiem vairākas priekšrocības:

- 1) iespēju maksāt tikai par lietošanas reizēm, tādējādi nodrošinot finansiālu efektivitāti;
- 2) iespēju lietot jaudīgu fizisko infrastruktūru;
- 3) iespēju piekļūt informācijai tīmeklī no dažādām ierīcēm un ērti strādāt komandā. Piemēram, vairāki speciālisti vienlaikus var veikt atbalsta datu ieguvu, izmantojot savas mobilās iekārtas, savukārt datu analītiķis procesu var vērot reālā laikā, atrodoties savā darba vietā.

Atsevišķas datu interpretācijas operācijas, piemēram, zemes pārseguma tipu automātiskā atpazīšana augstas telpiskās izšķirtspējas tālizpētes datos, var būt skaitļošanas resursu

4-1. tab. Rastra un vektordatu reprezentācijas priekšrocības un trūkumi [84], [91], [124].

	Rastra dati	Vektordati
Priekšrocības	Vienkāršāka datu struktūra.	Nezūd kvalitāte pietuvinot.
	Zemāka skaitļošanas sarežģītība.	Viegli reprezentēt topogrāfiju.
	Labi reprezentē sikas tonālās variācijas.	
	Labi reprezentē izplūdušas robežas.	
Trūkumi	Ierobežota telpiskā izšķirtspēja.	Augsta skaitļošanas sarežģītība.
	Grūti izveidot topoloģiskus objektus.	Sarežģītāka datu struktūra.

² *SQL* – *Structured Query Language*.

³ *WMS* – *Web Map Service*.

ietilpīgas un patērēt gan skaitļošanas laiku, gan operatīvo atmiņu. Galalietotāju darbsta-
cijas var nebūt gana jaudīgas šādu operāciju veikšanai, tādēļ mākoņskaitļošana var būt
efektīvs risinājums.

Aizvien lielāku popularitāti iegūst arī trīsdimensiju (3D) ĢIS risinājumi. 3D atainoju-
mi, iekļaujot vertikālo dimensiju, ļauj analizēt ainas perspektīvā, mainot virtuālās kameras
novietojumu, apgaismojumu un tādējādi nodrošinot ērtāku vizuālu reprezentāciju. 3D ĢIS
lietojumi ir īpaši aktuāli pilsētvides kartēšanā un navigācijas risinājumos, kuros pārvie-
tošanos redzam nevis kartē, bet gan 3D ainā, kas pietuvināta reālās dzīves situācijai. Di-
gitālos augstuma un reljefa modeļus iespējams saglabāt jau pieminētajā *GeoTIFF* formātā.
Šajā gadījumā attēla pikseļu vērtība atbilst augstuma vērtībai (visbiežāk virs jūras līmeņa).
Sarežģītāku objektu gadījumā, piemēram, ja veido ēku 3D modeļus, jāizmanto 3D modeļu
formāti kā *.gml*, *.tin* un *.kmz* datnes.

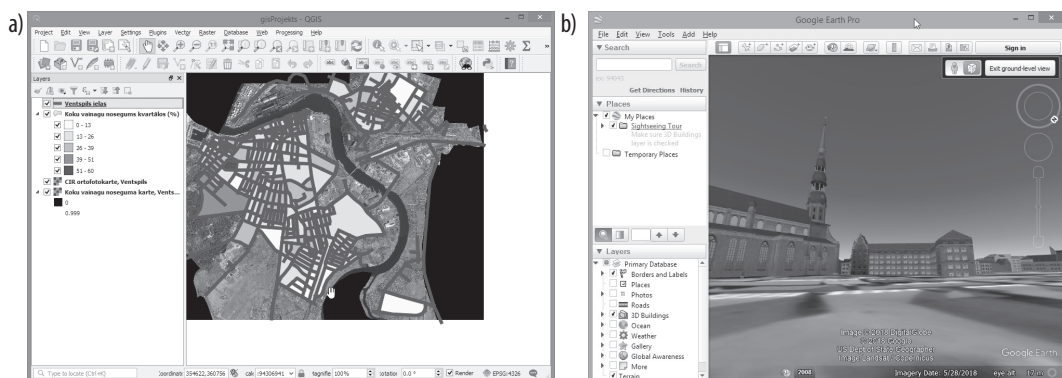
4.1.3. ĢIS pamatfunkcionalitāte

ĢIS iekļautās funkcijas iedalāmas šādās lielās grupās:

- datu ieguve un/vai izveide;
- datu reprezentēšana;
- vektordatu analīze;
- rastra datu analīze;
- 3D datu analīze.

Datu ieguve un/vai izveide

Gan veidojot savus datus, gan izmantojot datus no citiem avotiem, jāņem vērā kartogrā-
fiskā projekcija, kādā dati reģistrēti. Ērtāku datu analīzi iespējams veikt, ja visi datu slāņi ir
reģistrēti vienas un tās pašas kartogrāfiskās projekcijas koordinātu sistēmā. Kartogrāfiskās
projekcijas koordinātas iespējams pārrēķināt datu pirmapstrādes procesā, taču pēc koordi-
nātu pārrēķiniem var būt nepieciešamas ģeometriskās korekcijas, lai izslēgtu ģeometriskas
nobīdes starp objektiem dažādos slāņos. Starptautiskie datu piegādātāji pārsvarā piedāvā
datus WGS84 vai WGS84 UTM (Merkatora transversās projekcijas, skat. 3.7.6. sadaļu) zo-
nas kartogrāfiskās projekcijas koordinātās, savukārt Latvijas dati visbiežāk tiek noformēti



4-5. att. ĢIS piemēri: (a) QGIS galvenais logs, (b) trīsdimensiju skats Google Earth Pro.

LKS-92 kartogrāfiskajā projekcijā.

Diemžēl apzīmējums LKS-92 rada neskaidrības, jo LKS-92 apzīmē referencelipsoīdu, ģeogrāfisko koordinātu sistēmu un divas projicētās koordinātu sistēmas [107]. Izvēloties koordinātu sistēmu, ieteicams balstīties uz EPSG⁴ kodiem. EPSG ģeodēzisko parametru datukopa ir strukturēta, visaptveroša koordinātu sistēmu un koordinātu transformāciju definīciju datubāze, kur katrai kartogrāfiskajai projekcijai ir piešķirts unikāls numurs jeb EPSG kods [128]. Latvijas datu apstrādei ir jāizvēlas projekcija ar kodu EPSG:3059.

Savus datus iespējams izveidot ar dažādiem paņēmieniem. Divas metodes, ko ērti var izmantot arī iesācēji un entuziasti, ir datu ievākšana, reģistrējot objektu punktus ar ierīču palīdzību, vai kartes zīmēšana ĢIS ietvaros, balstoties uz aerofotogrāfijās redzamo informāciju.

Objektus veidojošos punktus iespējams reģistrēt uz vietas, izmantojot kādu ierīci objekta koordinātu reģistrācijai. Ja nav nepieciešama augsta precizitāte, tad iespējams izmantot pat viedtālruni, kam uzstādīta lietotne atrašanās vietas noteikšanai un koordinātu reģistrācijai. Vienam mērījumam raksturīgas koordinātu gadījuma kļūdas, tādēļ lietotnē katrai atrašanās vietai veic vairākus mērījumus, un galarezultātu aprēķina kā mērījumos iegūto koordinātu vidējo vērtību. Šādus mērījumus iespējams saglabāt teksta datnē un elektronisko karti izveidot automatizēti, importējot teksta datus ĢIS un lietojot ĢIS analīzes operācijas.

Cits risinājums ir kartes zīmēšana, balstoties uz ortofotokartēs redzamo informāciju. Šādā veidā iespējams ērti iezīmēt, piemēram, ēku jumtu kontūru daudzstūrus. Ar roku zīmēti objekti var būt neprecīzi attiecībā pret objektu īpašībām, piemēram, neprecīzi iezīmēts taisnstūris, kam nepieciešami taisni leņķi. Līdz ar to ĢIS parasti ir iekļauti rīki dažādu kļūdu automatizētai noteikšanai un labošanai, tādi kā leņķu labošanu, daudzstūra īpašību pārbaudi (lai neveidotos pārklāšanās) u. c. Zīmējot jāņem vērā objektu ģeometriskās īpašības. Piemēram, ēkas ortofotokartēs redzamas nelielā perspektīvā, tādēļ ēkas kontūru ieteicams iezīmēt kā redzamo jumta kontūru, bet pēc tam pārbidīt tā, lai šī kontūra atbilstu ēkas pamatnes novietojumam.

Ievadot punktus, līnijas vai daudzstūru objektus, jāatceras arī par iespēju pievienot dažādas objekta īpašības. Ieteicams ieviest vismaz objekta identifikācijas numuru, lai atvieglotu turpmāko apstrādi.

Katram gadījumam var būt unikāls datu komplekts, taču bieži lieto topogrāfisko karti, ortofotokartes, digitālos augstuma un reljefa modeļus.

Topogrāfiskā karte detalizēti parāda zemes virsmas reljefu un galvenos zemes pārseguma tipus, administratīvās teritorijas, ūdens objektus, transporta infrastruktūru un arī cilvēka veidotos objektus, tādus kā ēkas, svarīgas vietas pilsētā u. tml. Ar ortofotokartēm un augstuma modeļiem jau esam iepazinušies iepriekšējās nodaļās.

Tālīzpētes datus iespējams lejupielādēt vai pasūtīt, izmantojot tīmekļa saskarnes. Izvēloties satelītattēlus, lietotājs var saskarnē norādīt tādus attēlu parametrus kā vēlamo attēla ieguves laiku, izmantoto sensoru, mākoņu pārklājumu un citus parametrus.

Datu reprezentācija

Vektordatu vieglākai vizuālai analīzei izmanto simboloģiju. Simboloģija kartogrāfijas

⁴ EPSG – European Petroleum Survey Group.

kontekstā nozīmē grafisko elementu izmantošanu, lai reprezentētu kartes informāciju. Simboloģija ietver dažādu simbolu, krāsu, līniju rakstu un izmēru lietošanu.

Dažas biežāk lietotās metodes vektordatu simbolizēšanai ir:

- speciālu simbolu izmantošana punktveida objektu raksturošanai. Piemēram, lidostu atrašanās vietas kartē var iezīmēt ar lidmašīnas simbolu;
- daudzstūru kategorizācija atkarībā no klases. Piemēram, zemes pārseguma tipiem atbilstošos daudzstūrus iespējams iekrāsot atšķirīgās krāsās, katram zemes pārseguma tipam piešķirot intuitīvi atbilstošu krāsu, piemēram, ūdens laukumus iekrāsot zilā krāsā, bet meža laukumus – zaļā. Ja klašu skaits datos ir liels, tad ieteicams izmantot savstarpēji kontrastējošas krāsas, nevis vienas krāsas toņus, lai uzlabotu vizuālo uztveri;
- daudzstūru un punktveida objektu graduēts atainojums, izmantojot kādu objekta īpašību, piemēram, meža nogabalus iespējams iekrāsot dažādos zaļās krāsas toņos atkarībā no krājas apjoma. Arī šajā gadījumā jāņem vērā, ka pārāk daudzu krāsu izmantošana var apgrūtināt vizuālo uztveri, tādēļ objektu īpašības, ko raksturo vērtību intervāls, mēdz iedalīt klasēs. Krājas gadījumā gaiši zaļā tonī varētu iekrāsot mežaudzes, kur krājas apjoms ir (0 līdz 30) m³/ha, jau tumšākā tonī (31 līdz 60) m³/ha u. tml.;
- punktveida objektiem iespējams pievienot diagrammas, kas raksturo objekta īpašības, piemēram, sektoru diagrammā pilsētu kartei varam pievienot informāciju par iedzīvotāju sadalījumu, kas uz darbu dodas ar sabiedrisko transportu, automašīnu, velosipēdu vai kājām.

Atkarībā no elektroniskās kartes datubāzē ierakstītās informācijas kartei iespējams pievienot arī uzrakstus atbilstošajiem objektiem, piemēram, pilsētu centra punktiem pievienot pilsētas nosaukuma uzrakstu.

Sagatavojot elektronisko karti eksportēšanai no ĢIS kādā no attēlu formātiem, jā rūpējas, lai visi nepieciešamie objekti ir saskatāmi un ir pievienoti papildu vizuālie elementi, kas palīdz karti interpretēt arī ārpus ĢIS: kartes leģenda, mēroga josla u. c. Kartes leģenda sniedz informāciju, kā interpretēt karti. Ja kartē izmantota daudzstūru kategorizācija ar dažādām krāsām, tad leģenda izskaidro, ko katra krāsa apzīmē. Viegļākai kartes interpretācijai ieteicams pievienot arī ziemeļu virziena norādi un kartogrāfiskās projekcijas koordinātu uzrakstus. Savukārt mēroga informācija ir būtiska, lai kartes lasītājs varētu izprast objektu izmērus realitātē. Mērogu iespējams norādīt vairākos veidos:

- 1 : 10 000 norāda, ka vienai kartes vienībai atbilst 10 000 tādu pašu vienību realitātē. Piemēram, 1 cm kartē atbilst 10 000 cm dabā;
- 1 cm : 100 m nozīmē, ka 1 cm kartē atbilst 100 m dabā. Šāds mēroga parādīšanas veids ļauj intuitīvi vieglāk interpretēt karti, jo metri ir pierastāka mērvienība lielu objektu kontekstā;
- izmantojot mēroga joslu, kā parādīts 4-6. att. Mēroga josla vizuāli parāda atbilstību



4-6. att. Mēroga joslas piemērs.

starp objekta izmēru kartē un dabā.

Rastra datu optimālai vizualizācijai var lietot tādas standarta attēlu apstrādes operācijas kā kontrasta un vispārējā gaišuma uzlabošanu.

Pelēko toņu attēlos vizuālo uztveri iespējams uzlabot, pievienojot pseidokrāsas. Tas nozīmē, ka pelēko toņu attēls tiek pārveidots par krāsu attēlu, piešķirot pelēkā toņiem krāsu, ņemot vērā kādu noteiktu kritēriju. Krāsu izšķirtspēja cilvēka acij ir daudz augstāka par pelēko toņu izšķirtspēju, tādēļ tuvu pelēko toņu atšķiršanu uzlabo, iekrāsojot tos kontrastējošās krāsās. Viena no vienkāršākajām pseidokrāsu piešķiršanas metodēm ir katram pelēkā tonim no kādas pelēko toņu skalas (piemēram, no 0 līdz 255) piešķirt krāsu no kādas krāsu kartes. Piemēram, ja rastra attēls ir termālais attēls, kas raksturo virsmas temperatūru, tad var izvēlēties krāsu karti no zila toņa līdz sarkanam, kur zilie toņi atbilst vēsākiem apgabaliem, bet sarkanie toņi – karstākiem.

Rastra datu vizualizēšana ĢIS var ietvert arī komplicētākas attēlu apstrādes darbības, ja jāattēlo liels datu apjoms. Ja aerofotogrāfijas plānots analizēt mazā palielinājumā, tad nolasīt attēla informāciju pilnā apjomā vizualizācijas mērķiem nav lietderīgi, jo maza palielinājuma gadījumā sīkās detaļas tāpat nebūs saskatāmas. Šī iemesla dēļ lieto viena attēla dažādas telpiskās izšķirtspējas versijas jeb attēlu piramīdu. Attēlu piramīda ir datu struktūra, kas sastāv no nosacītiem attēla slāņiem. Piramīdas apakšējais slānis glabā attēlu tā oriģinālajā telpiskajā izšķirtspējā. Nākamajā slānī atrodas divas reizes samazināts sākotnējais attēls, aiznākamajā slānī jau četras reizes samazināts sākotnējais attēls, un tā līdz jēgpilnam attēla samazinājumam. Ja lietotājs datus nepietuvina, tad attēls tiek parādīts, izvēloties kādu no augšējiem datu slāņiem, kuru izšķirtspēja ir maza un līdz ar to attēlošanas ātrums ir liels. Ja lietotājs kādu apgabalu pietuvina, tad vizualizācijas mērķiem izmanto kādu no apakšējiem datu slāņiem, kura izšķirtspēja ir augsta. Arī šajā gadījumā vizualizācija notiek ātri, jo tiek parādīts tikai neliels attēla apgabals. Šajā piemērā piramīdas darbības princips izskaidrots no vizuālās analīzes viedokļa. Attēlu piramīdas datora atmiņā tiek uzglabātas efektīvākā veidā, nekā katrā piramīdas slānī ievietojot citas telpiskās izšķirtspējas attēla versiju.

Vektordatu analīze

Datu analīzes iespējas ĢIS ietvaros ir ļoti plašas. Apskatīsim tikai dažas no biežāk lietotajām metodēm.

- Vektorslāņu ģeometriskās operācijas ietver vairāku elektronisko karšu apvienošanu, kopu darbības (kopējo teritoriju atlasī starp vektorkartēm kā kopu šķēlumu, teritoriju atlasī vienā kartē, kas nav norādīta otrā, kā kopu atņemšanu), izgriešanu, bufera izveidošanu ap objektiem.
- Datus iespējams pētīt detalizēti, veicot atlasī pēc noteiktas atrašanās vietas (telpiskais vaicājums) vai automātiski ģenerējot kontrolpunktus ar haotisku vai sistemātisku izvietojumu. Šāda automatizēta punktu datņu izveide ir īpaši noderīga tālīzpētes datu apstrādes rezultātu precizitātes novērtējumos.
- Dažādi datu analīzes rīki, kā diagrammu zīmēšana, balstoties uz datubāzes ierakstiem, attālumu starp objektiem noteikšana un citi.
- Darbības ar elektroniskās kartes datubāzi, piemēram, jaunu lauku izveide, kuros veikti aprēķini, balstoties uz kartes ģeometriju.

Rastra datu analīze

Rastra datu analīzes iespējas galvenokārt ir saistītas ar attēlu aritmētisko operāciju lietošanu, attēlu ģeometriskajām transformācijām un automatizētu interpretāciju.

Attēlu aritmētiskās operācijas lietojamas dažādu uzdevumu risināšanai, piemēram, veģetācijas indeksu aprēķināšanai, attēla vērtību konvertēšanai uz fizikālām mērvienībām un dažādām rastra masku operācijām (masku apvienošana ar loģiskā VAI palīdzību, vai attēla atbilstošo daļu atdalīšana, veicot attēla transformāciju ar masku).

Attēla ģeometriskās transformācijas ietver attēla apakšapgabalu izgriešanu, attēla kartogrāfiskās projekcijas pārveidojumus, kā arī attēla telpiskās izšķirtspējas maiņu. Bieži no vairākiem avotiem iegūtos rastra datus novērojamas ģeometriskas nobīdes, tādēļ automatizētas un kopīgas datu apstrādes gadījumā ir jāveic rastra datu ģeometriskās korekcijas, izmantojot atbalsta punktus (vairāk informācijas skat. 3.8. nodaļā). Bieži izmantota rastra attēla apstrādes darbība ir arī attēlu mozaīku izveide.

ĢIS ietvaros iespējams izmantot arī mašīnmācīšanās metodes, lai automatizēti pārveidotu rastra datus tematiskajās kartēs, kur ir tikai lietotāju interesējošā informācija.

3D datu analīze

3D datu apstrādes iespējas saistītas ar dažādu procesu modelēšanu 3D vidē, piemēram, vēja plūsmu modelēšana, kā arī tādas ģeometriskās operācijas kā tilpuma aprēķini un apēnojuma analīze. Datu apstrādes iespējas ir ļoti plašas. Nozīmīgākās metodes ir iekļautas ĢIS pamatriku komplektācijā, taču vairākām ĢIS papildus pieejami visdažādākie spraudņi, ko izstrādājuši gan entuziasti, gan arī profesionālas nozares kompānijas.

4.1.4. ĢIS funkcionalitātes izmantošanas piemērs

Nobeigumā apskatīsim vienkāršotu piemēru, kā lietot ĢIS datus analīzes mērķiem un vizualizācijai. Piemēra mērķis ir noteikt koku vainagu noseģumu dažādos pilsētas kvartālos (apgabalos, ko no visām pusēm ierobežo ielas). Šāda pieeja ļauj novērtēt pilsētas apzaļumojuma līmeni, kas saskaņā ar pētījumiem ir viens no svarīgākajiem faktoriem, kas ietekmē pilsētvides iedzīvotāju labsajūtu.

Nepieciešamie ievades dati ir krāsu infrasarkanā ortofotokarte (*CIR*⁵), normalizētais digitālais virsmas modelis (*nDVM*) un *OpenStreetMap* (*OSM*) ielu karte.

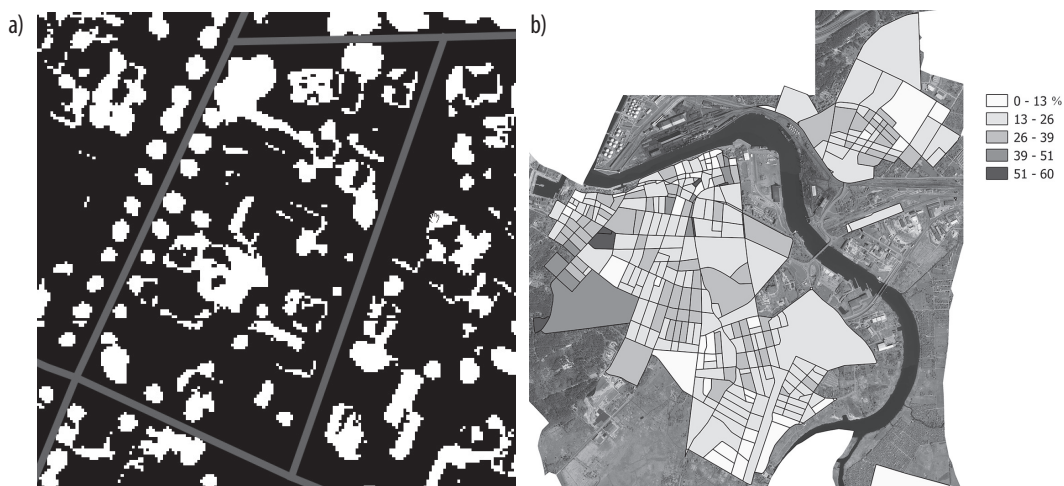
1. Aprēķina normalizētās starpības veģetācijas indeksu $NDVI$ ⁶ zaļās veģetācijas raksturošanai: $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$, kur *NIR* ir tuvā infrasarkanā starojuma attēls, kas atrodas krāsu infrasarkanās ortofotokartes pirmajā slānī un *RED* ir sarkanā starojuma attēls, kas atrodas krāsu infrasarkanās ortofotokartes otrajā slānī. *NDVI* aprēķinus iespējams veikt, izmantojot rastra kalkulatoru iespējas ĢIS.
2. Aprēķina koku vainagu noseģtās teritorijas kā $NDVI > 0,4$ UN $nDVM > 3$ metri, izmantojot rastra kalkulatora iespējas. Šajā gadījumā kā koku vainagus atlasa visus

5 *CIR* – Color InfraRed.

6 *NDVI* – Normalized Difference Vegetation Index.

pikseļus, kuru augstuma vērtība virs zemes virsmas ir lielāka par trīs metriem un kur novērojama augsta hlorofila aktivitāte saskaņā ar *NDVI*. Zilie toņi atbilst vēsākiem apgabaliem, sarkanie toņi – karstākiem.

3. Ielu karte OSM datņu formātā tiek uzglabāta liniju veidā kopā ar citiem liniju objektiem, tādēļ vispirms jāveic datu filtrācija. Pateicoties datubāzu funkcionalitātei, kas ir iestrādāta elektroniskajās kartēs, var uzrakstīt vaicājumu, kas atlasa tikai ielas, līdzīgi kā jebkurā datubāzu lietotnē. Kvartālu analīzei ir jāatlasa gan primārās, sekundārās un terciārās autostrādes, gan apdzīvoto rajonu ielas. 4-7.(a) att. redzama koku vainagu noseģumu karte, kam kā augšējais slānis uzlikta ielu karte.
4. ĢIS var veikt dažādas datu pārveidošanas darbības. Šajā gadījumā ir jāizveido kvartāliem atbilstoši poligoni, ko iespējams noformēt, analizējot ielām atbilstošo liniju krustojumus. Katram poligonam ieteicams piešķirt arī unikālu numuru, lai turpmākajā analīzē to būtu ērtāk atšķirt no pārējiem.
5. Ar vektoru un rastra analīzes rīkiem aprēķina koku vainagu noseģuma kartes pikseļu vidējo vērtību katrā poligonā. Šie dati parasti tiek saglabāti kvartālu kartes atribūtu tabulā kā jauni lauki. Koku vainagu noseģuma kartē var būt tikai 0 vai 1 kā pikseļu vērtības, tāpēc pikseļu vidējā vērtība viena daudzstūra ietvaros atbilst balto pikseļu proporcijai, jo summē vērtības 1, bet izdala ar pikseļu kopskaitu izmantotajā daudzstūrī. Reizinot vidējo vērtību ar 100, var iegūt koku vainagu noseģumu katrā kvartālā procentos.
6. Kvartālu kartes noformē, izmantojot graduētu atainojumu pēc koku vainagu noseģuma procentos. 4-7. att. (b) redzama šādi noformēta karte Ventspilī.



4-7. att. a) Koku vainagu noseģuma karte (koku vainagu noseģums iekrāsots baltā krāsā) un ielu karte (ielu līnijas iekrāsotas pelēkā krāsā) ĢIS vidē. (b) Koku vainagu noseģums procentos no kvartāla teritorijas Ventspilī.

4.2. Zemes pārseguma un lietojuma kartēšana (25. lekcija)

4.2.1. Kopsavilkums

Šajā nodaļā apskatīts viens no populārākajiem tālzpētes datu lietojumiem: zemes pārseguma un lietojuma kartēšana. Soli pa solim iepazīsim, kā klasificēt koku vainagu nosegumu un citu zemes pārseguma tipu, izmantojot vidējas izšķirtspējas satelītattēlus un k-tuvāko kaimiņu metodi.

4.2.2. Problēmas nozīmība

Viens no populārākajiem tālzpētes uzdevumiem ir zemes pārseguma un lietojuma noteikšana. Šāda informācija ir svarīga dažādiem plānošanas un resursu pārvaldības uzdevumiem. Tālzpētes dati var piedāvāt finansiāli izdevīgu, telpiski detalizētu un laikā aktuālu informāciju par objektiem un materiāliem uz Zemes virsmas.

Zemes pārsegums ir zemes virsmas fiziskais pārklājums. Zemes pārseguma klasi jeb tipu definē fiziskais materiāls uz Zemes virsmas ar līdzīgiem parametriem, ko izvēlas atbilstoši informācijas lietojuma vajadzībām. Daži klašu piemēri ir ūdens, apbūvētās teritorijas, zemā zaļā veģetācija u. tml. Zemes lietojuma klases jeb tipi raksturo, kā konkrētās teritorijas tiek lietotas vai iedalītas atkarībā no to saimnieciskās nozīmes, piemēram, lauksaimniecībā izmantojamās zemes, mežs u. tml.

Pirmais uzdevums veiksmīgai kartēšanas uzdevuma veikšanai ir skaidri definēt zemes pārseguma vai lietojuma klases īpašības, kas to atšķir no citām klasēm. Piemēram, mežu klase un koku vainagu noseguma klase ir divas atšķirīgas klases. Mežu klasi skaidri definē normatīvie akti, ņemot vērā mežaudzes laukumu, vidējo koku augstumu un vainaga projekciju uz zemes, savukārt par koku vainagu noseguma klasi uzskatāma jebkura teritorija, ko nosedz koku vainagu projekcijas uz zemes, ierobežojot, iespējams, vienīgi koku augstumu (lai atdalītu krūmus). Skaidra klases definīcija ļauj novērtēt, vai tālzpēte vispār konkrēto kartēšanas uzdevumu var risināt un kādi dati tam nepieciešami. Mežu klases gadījumā ir svarīgs koku augstums, tāpēc ar multispektrālajiem datiem vien nebūs pietiekami un ir jāizmanto arī normalizētais digitālais virsmas modelis.

Zemes pārseguma datorizētai kartēšanai, izmantojot vidējas un zemas telpiskās izšķirtspējas datus, bieži lieto pikseļa analizē balstītas klasifikācijas metodes (vadītās, nevadītās, hibridās). Tas nozīmē, ka klasifikācijas metode analizē katru attēla pikseli un šim pikselim piešķir atpazītās zemes pārseguma klases apzīmējumu. Tā iespējams izveidot pseidokrāsu attēlu, kurā ar unikālām krāsām ir iezīmētas atšķirīgas zemes pārseguma klases.

Augstas izšķirtspējas datu gadījumā ieteicamāka ir uz objektu analīzi balstīta pieeja: vispirms attēlu segmentē, sadalot to līdzīgas krāsas un tekstūras reģionos, un tad klasificē segmentācijas rezultātā iegūtos reģionus.

Ja telpiskā izšķirtspēja nav augsta, tad zemes pārseguma tiem raksturīgo tekstūru

praktiski nav iespējams novērot, un tos var definēt, izmantojot tikai pikseļa spektrālās vērtības vai no tām atvasinātus deskriptorus. Ja izšķirtspēja ir augsta, tad daudzus zemes pārseguma tipus definē mikro un makro tekstūras, taču konkrētu pikseļu spektrālās vērtības dažādiem tipiem var būt pat pilnīgi vienādas. Tādēļ aerofotogrāfijas un augstas izšķirtspējas satelītattēlus nav ieteicams klasificēt pikseļa līmenī.

4.2.3. Izaicinājumi zemes pārseguma kartēšanā

Zemes pārseguma klases ir cilvēku ieviests jēdziens un nav tieši saistīts ar saņemto signālu no satelītu sensoriem. Arī lauka (atbalsta) dati šādā gadījumā nevar palīdzēt, jo tik un tā paliek aktuāls jautājums, kā šos mērījumus pareizi apvienot klasēs [150]. Ideālā gadījumā zemes pārseguma klasēm atbilst deskriptoru⁷ klases, kas vērtību ziņā savstarpēji nepārklājas un kam ir zemas klases iekšējās variācijas [139].

Parauga un testa datu sagatavošana ir kritiski svarīgs solis. Ideālā gadījumā parauga datu komplektam būtu jāietver visas būtiskākās deskriptoru vērtību variācijas klases un jābūt telpiski vienmērīgi sadalītiem pētāmajā reģionā.

Jebkuras telpiskās izšķirtspējas datus eksistē jaukto pikseļu problēma (skat. 2.2. nodaļu). Par jaukto pikseli sauc pikseli, kura atstarojuma vērtību veido vairāku zemes pārseguma tipu atstarojumu kombinācija. Turpinot apskatīt mežu klases piemēru, jauktie pikseli sastopami uz meža nogabalu robežām ar citu zemes pārseguma tipu un audzēs ar zemu koku vainagu nosegumu. Jaukto pikseļu problēma īpaši ietekmē stingrās klasifikācijas (skat. 2.2.6. sadaļu) rezultātus vidējas telpiskās izšķirtspējas satelītdatos. Atkarībā no klasifikācijas algoritma apmācības jauktie pikseli tiek piešķirti vienam vai otram zemes pārseguma tipam, lai gan patiesībā pikselim atbilstošā teritorija uz zemes ietver abus zemes pārseguma tipus. Jaukto pikseļu klasifikācijas problēmu var risināt, lietojot nestingrās klasifikācijas (skat. 2.2.6. sadaļu) metodes, kas pieļauj pikseļa vai reģiona daļēju piederību vairākām klasēm un jaukto pikseļu spektrālo analīzi.

Objektivitāte precizitātes novērtējumos ir viena no lielākajām problēmām tālīzpētes galaproduktu uzticamības un lietojamības analīzē. Precizitātes novērtējumu objektivitāti ietekmē vairāki faktori: precizitātes raksturlielumu izvēle, paraugu ņemšanas metodoloģija, kļūdas raksturlielumu tips, lauka mērījumu un citu atbalsta datu precizitāte, kā arī kļūdu telpiskais sadalījums un to relatīvais nozīmīgums [95]. Augstāku objektivitāti iespējams nodrošināt, rēķinot precizitātes raksturlielumus un izmantojot atbalsta datus daudzstūru, nevis punktu formātā. Punktu formāta izmantošana var radīt nobīdītus precizitātes rādītājus atkarībā no punktu izvietošanas, turpretī daudzstūru izmantošana ļauj pārbaudīt klasifikācijas rezultātus visā pētāmajā teritorijā.

Klasifikācijas mērogi – lielākā daļa satelītattēlu klasifikācijas algoritmu strādā pikseļa līmenī, taču atsevišķas zemes pārseguma klases iespējams definēt tikai attēla reģiona līmenī, tādēļ papildu klasifikācijai ir jāizvēlas arī veiksmīga segmentācijas metode [139].

Lietotājam draudzīga, robusta programmatūra tālīzpētē ir īpaši svarīga, jo tas ir starpdisciplinārs priekšmets, kas apvieno dažādu nozaru speciālistus. Klasifikācijas me-

⁷ Par deskriptoriem sauc attēlu vai tā fragmentu raksturojošus skaitliskus raksturlielumus, kas ir atšķirīgi dažādām attēla klasēm. Deskriptori ir interpretācijas atslēgu matemātiskā forma.

todes, kuru īstenošanai nepieciešama intensīva lietotāja līdzdalība un specifiskas zināšanas, praktisko problēmu risināšanai nav piemērotas, tādēļ risinājumu izstrādē uzsvars jāliek uz liela datu apjoma apstrādi ar minimālu cilvēka līdzdalību [100].

4.2.4. Zemes pārsegumu klasifikācijā bieži lietotās metodes

Zemes pārseguma atpazīšanu iespējams veikt ar dažādiem mašīnmācīšanās un datorredzes algoritmiem.

Vadītās klasifikācijas algoritmi

1. Maksimālās ticamības klasifikators (MLC^8) [144] ir parametrisks, stingrais, pikseļa līmeņa spektrālais klasifikators. Šo algoritmu iespējams izmantot gadījumos, kad klašu deskriptoru datu sadalījums atbilst normālajam jeb Gausa sadalījumam. Ja šis nosacījums ir spēkā, tad klašu parauga datu deskriptori tiek reprezentēti ar to vidējo vērtību vektoru un kovariāciju matricu. Deskriptoru vidējo vērtību vektoru un kovariāciju matricu lieto, lai definētu klases deskriptoru datu sadalījuma funkciju, un katram klasificējamam pikselim tiek aprēķināta ticamība, ar kādu tas pieder katrai klasei. Pikselis tiek piešķirts klasei ar augstāko ticamības vērtību. Lai arī šo algoritmu plaši izmanto, tā precizitātes rādītāji vidēji ir zemāki nekā citām metodēm.
2. k tuvāko kaimiņu klasifikators (kNN^9) – neparametrisks, stingrais klasifikators. No parauga datiem netiek veidots modelis. Tā vietā klasificējamais pikselis tiek salīdzināts ar visiem parauga datu pikseliem un piešķirts tai klasei, kurai pieder vairākums tā k tuvāko kaimiņu. kNN klasifikatora lietošana detalizētāk apskatīta šīs nodaļas darbplūsmas piemērā.
3. Atbalsta vektoru mašīna (SVM^{10}) [127] – spektrālās klases deskriptoru telpā tiek atdalītas ar lēmuma virsmām.
4. Mākslīgie neironu tīkli (ANN^{11}) [108] ir vispārīga tēlu atpazīšanas metode, kad ar skaitļošanas elementiem tiek imitēta smadzeņu uzbūves vienkāršota struktūra.
5. Konvolūcijas neironu tīkli ir mākslīgo neironu tīklu veids, kas īpaši pielāgots darbam ar attēliem (vairāk informācijas skat. 20. lekcijā).
6. Jaukto pikseļu analīze. Jauktā pikseļa atstarojumu uzskata par zemes pārseguma tipu atstarojumu lineāru kombināciju, kura svērtā atkarībā no katra zemes pārseguma tipa telpiskā noseģuma pikselim atbilstošajā apgabalā (vairāk informācijas skat. 10. lekcijā).
7. Lēmumos balstītās sistēmas (jeb klasifikācijas koki) izmanto nosacījumu virknes, kas pārbauda deskriptoru un citu pieejamo datu vērtības un ģenerē lēmumu par objekta piederību klasei. Par vienkāršāko lēmumos balstīto sistēmu var uzskatīt attēlu sliekšņošanu (skat. 3.3.5. sadaļu), kuras ietvaros pikseļu atstarojumu vērtības frekvenču joslās vai citi multispektrālo datu deskriptori tiek salīdzināti ar sliekšņa vērtībām. Sarežģītākas klasifikācijas metodes izmanto klasifikācijas kokus un to kopas.

8 MLC – Maximum Likelihood Classifier.

9 kNN – k -Nearest Neighbours.

10 SVM – Support Vector Machine.

11 ANN – Artificial Neural Networks.

Nevadītās klasifikācijas algoritmi

1. k vidējo vērtību¹² klasterizācijas [124] algoritma gadījumā lietotājam ir jānorāda sagaidāmais spektrālo klašu skaits k un iterāciju ceļā tiek atrastas k spektrālās klases. ISODATA metodes gadījumā spektrālo klašu skaits tiek atrasts algoritma izpildes laikā. Spektrālās klases pēc tam ir jāpiešķir zemes pārseguma klasēm, izmantojot vadītās klasifikācijas algoritmu vai analizējot datus vizuāli.
2. Nestingrā c vidējo vērtību¹³ klasterizācija [94] ir nevadītās klasifikācijas algoritms, kas īsteno nestingro klasifikāciju, t. i., pikselis var daļēji piederēt vairāk nekā vienai zemes pārseguma klasei.

Hibridās klasifikācijas metodes [124]

1. Izmanto nevadīto klasifikāciju, lai atrastu spektrālās klases, un vadīto klasifikāciju, lai piešķirtu spektrālajām klasēm atbilstošo zemes pārseguma klasi.
2. Lieto klasterizāciju apmācības datiem, lai atrastu klases, kuru dati atbilst normālajam varbūtību sadalījumam, un lieto vadītās klasifikācijas algoritmus, izmantojot atlasītos apmācības datus.

Piemērota zemes pārseguma klasifikācijas algoritma izvēle ir atkarīga no algoritma spējas apstrādāt trokšņainus ieejas datus, optimālas deskriptoru kopas izvēles un spējas izmantot nelielu apmācības datu apjomu klasifikācijas uzdevuma veikšanai [139].

Pētījumā [144] tika salīdzinātas *MLC*, *SVM* un *ANN* metodes un tika secināts, ka *ANN* precizitāte ir augstāka, bet tikai par 2 %. Tas nozīmē, ka klasifikācijas precizitāti lielākā mērā nosaka klašu atšķiramība ieejas datos, bet algoritma izvēle to ietekmē mazāk.

Papildus algoritmu izvēlei jāizlemj arī, kādi deskriptori tiks izmantoti klasifikācijas procesā. Kādas frekvenču joslas vai attēlu transformācijas būtu noderīgākās? Vai papildus spektrālajiem deskriptoriem izmantot arī telpiskos un temporālos deskriptorus? Avotā [111] veikts literatūras apskats par vadītā klasifikatora un deskriptoru izvēli. Analizējot vairāk nekā 200 pētījumu, autori secināja, ka kopējo precizitāti būtiski paaugstina tekstūras deskriptoru pievienošana, bet mazākā mērā papildu informācija, proti, dažādos laika periodos un no dažādiem leņķiem iegūti attēli.

Daudzus klasifikācijas algoritmus ietekmē dimensionalitātes problēma: izmantojot vairāk deskriptoru, klasifikācijas precizitāte krītas, ko tikai daļēji var kompensēt, palielinot apmācības datu daudzumu [70].

Vidējas izšķirtspējas datus parasti klasificē pikseļa līmenī, taču augstas telpiskās izšķirtspējas attēliem pirms klasifikācijas ir rekomendējams veikt attēla segmentāciju reģionos. Augstas izšķirtspējas attēlos ir novērojamas sīkas detaļas, kas dažādiem zemes pārseguma tipiem var būt līdzīgas. Ja vidējas telpiskās izšķirtspējas gadījumā gandrīz visus zemes pārseguma tipus var atšķirt, izmantojot spektrālās vērtības, tad augstā izšķirtspējā zemes pārseguma klasi var raksturot arī specifiska tekstūra.

Pārskata rakstā [150] apkopoti vairāk nekā 500 zemes pārseguma un zemes lietojuma klasifikācijas eksperimentu rezultāti 15 gadu laika posmā pirms 2005. gada, izmantojot tālīzpētes datus. Apskatā secināts, ka 15 gadu laikā klasifikācijas precizitāte nav būtiski pa-

¹² Angļu val. – *k-means*.

¹³ Angļu val. – *fuzzy c-means*.

augstinājusies un kopējās precizitātes vidējie rādītāji ir 76,2 % ar standartnovirzi 15,59 %, “*kappa*” koeficientam 0,656 ar standartnovirzi 0,198 (skat. 19. lekciju). Vidējais klasificētais klašu skaits ir astoņi ar standartnovirzi 4,6 un izmantoto pazīmju skaits 7,85 ar standartnovirzi 11,54. Satelītdata telpiskā izšķirtspēja relatīvi maz ietekmē klasifikācijas precizitāti, ņemot vērā to, ka augstas telpiskās izšķirtspējas sensoriem parasti ir mazāka spektrālā izšķirtspēja.

Kopš 2015. gada īpaša interese attēlu klasifikācijas un objektu atpazīšanas uzdevuma veikšanā tiek pievērsta dziļajai apmācībai un konvolūcijas neironu tīkliem (skat. 3.5.7. sadaļu).

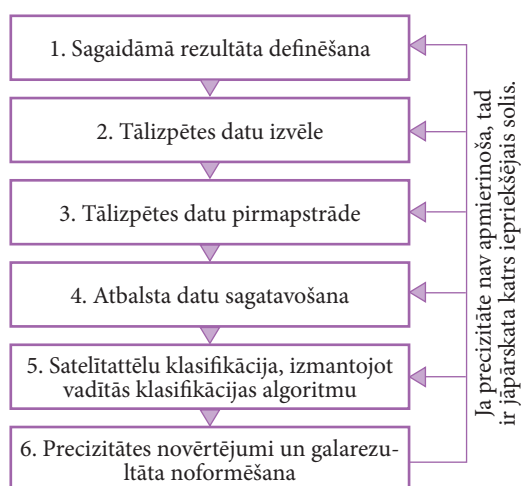
Efektīvai konvolūcijas neironu tīklu izmantošanai nepieciešams liels apmācības datu apjoms. Lielākā problēma šajā gadījumā ir saistīta nevis ar tālīzpētes datu trūkumu, bet ar augstas kvalitātes atbalsta datu trūkumu. Problēmu risina, izmantojot uz cita tipa attēliem, piemēram, *ImageNet* datubāzes, apmācītus modeļus un mākslīgi palielinot datu kopu, attēlus pagriežot un pievienojot tiem trokšņu komponenti [142]. Iepriekšapmācīto modeļu pazīmju kartes (skat. 3.5.7. sadaļu) ir iespējams veiksmīgi izmantot tālīzpētes attēlu klasifikācijai [103].

4.2.5. Darbplūsmas piemērs

Kā piemērs tiks apskatīta vienkāršota pieeja zemes pārseguma noteikšanai, to iedalot tikai divās klasēs: “koku vainagu nosegums” un “cits zemes pārsegums”. Šo informāciju finansiāli izdevīgi izmantot aktuālo kailcirsu noteikšanai.

Tālīzpētes datu tipa izvēle

Ir nepieciešama laikā aktuāla informācija, tāpēc jādod priekšroka satelītattēliem, jo satelīti regulāri iegūst Zemes virsmas attēlus. Visas Latvijas aerodatu bāze, ko uztur Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra (LĢIA), tiek atjaunināta aptuveni reizi trīs gados, un īpaša lidojumu organizēšana ir finansiāli dārga vai spēj nosegt tikai relatīvi nelielas teritorijas atkarībā no tā, vai tiek lietota lidmašīna vai bezpilota lidaparāts. Turpretī vienā



4-8. att. Darbplūsmas piemērs koku vainagu noseguma kartēšanai.

“LANDSAT” satelītattēlā ir redzama apmēram 190 km × 190 km liela teritorija.

Pēc kādām pazīmēm koku vainagu noseģumu iespējams atšķirt izvēlētajā datu tipā. Augstas izšķirtspējas datus koku vainagu noseģumam raksturīga īpaša tekstūra, taču vidējas izšķirtspējas datus, kā “LANDSAT” gadījumā, koku vainagu noseģumam ir arī īpaša spektrāla signatūra, ko veido gan konkrētu koku sugu signatūras, gan ēnu veidotais raksts. Ja nepieciešamo kailciršu izmērs ir salāgojams ar vidējas izšķirtspējas datiem, tad finansiāli izdevīgs risinājums ir “LANDSAT” un “Sentinel-2” satelītattēli, kas ir pieejami bez maksas. Multispektrālo attēlu pieejamību, protams, ierobežos laikapstākļi, taču, kombinējot “LANDSAT” un “Sentinel” satelītattēlus, temporālais pārklājums ievērojami uzlabojas.

Konkrētu attēlu izvēle

Datubāzēs rekomendējams izvēlēties ziemas attēlus vai agra pavasara (ar pārliecību, ka zaļā veģetācija vēl nav parādījusies), jo šajās sezonās novērojama vislielākā spektrālā atšķirība starp koku vainagu noseģumu un pārējām teritorijām, ko vasarā klāj zaļā veģetācija. Ja mākoņu noseģuma dēļ šādi attēli nav pieejami, tad var lietot arī vasaras attēlus. Būtiski ir izvairīties no starpsezonu datiem, kad zaļās veģetācijas attīstības stadija nav skaidri zināma un var atšķirties dažādos reģionos. Ideāli, ja attēlos mākoņu noseģums nav novērojams, taču, ja pilnībā no mākoņiem nav iespējams izvairīties, tad vēlams dot priekšroku attēliem, kuros novērojami gubu mākoņi, nevis spalvu mākoņi un dūmaka, tā vienkāršā iemesla dēļ, ka, jo necaurspīdīgāks ir mākonis, jo vieglāk to ir atpazīt un izņemt no datiem. Šādi varam izveidot attēlu mozaīku no vairākiem satelītattēliem pēc mākoņu filtrācijas.

Attēlu pirmapstrāde

Pēc attēlu lejupielādes parasti veic vairākas pirmsapstrādes darbības vai pārbauda to nepieciešamību. Attēlu piegādātāji piedāvā atšķirīgus satelītattēlu produktus, kuriem jau ir lietota virkne pirmapstrādes darbību.

Viena no galvenajām darbībām ir mākoņu maskas izveide, ja attēlā ir novērojams mākoņu noseģums. Šeit gan jāpiebilst, ka ziemas attēlos konkrētais uzdevums var būt apgrūtināts sniega un ledus līdzīgo spektrālo īpašību dēļ. Mākoņu noteikšanai eksistē vairāki brīvi pieejami risinājumi, piemēram, *Fmask* algoritms [147], *QGIS* spraudņu iespējas, kā arī “LANDSAT” un “Sentinel” satelītattēliem ir pieejami tādu frekvenču joslu dati, kas atvieglo mākoņu noteikšanu.

Reizē ar mākoņiem no attēliem ieteicams izņemt arī mākoņu ēnas, jo šajās teritorijās spektrālās vērtības tāpat būs izmainītas un var apgrūtināt klasifikācijas algoritmu darbību. Rezultātā tiek izveidota maska, kurā tiek iezīmēti mākoņiem un mākoņu ēnām atbilstošie pikseli. Tie klasifikācijā netiks apstrādāti.

Vasaras sezonas attēliem ļoti ērti iespējams izņemt arī ūdens teritorijas, lai veltī netērētu skaitļošanas laiku to apstrādei. Iespējams aprēķināt normalizētās starpības veģetācijas indeksu *NDVI*, lietojot attēlu aritmētiku tuvā infrasarkanā (*NIR*) un sarkanā starojuma frekvenču joslu attēliem ($NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$). Ūdens teritorijām raksturīgas zemas *NDVI* vērtības, tādēļ var veikt tā sliekšņošanu, lai izveidotu ūdens masku. 4-9. att. redzami piemēri mākoņu, ūdens, trūkstošo datu un attēla derīgo daļu maskām.

Atbalsta dati bieži ir pieejami kādā lokāli lietotā kartogrāfiskajā projekcijā, tāpēc atbalsta datiem vai satelītattēliem ir jāizmanto kartogrāfiskās projekcijas transformācija. Atbalsta datiem vajadzētu būt augstas kvalitātes, tāpēc pārrēķinu parasti veic satelītattēliem, un pēc tam pārbauda nepieciešamību pēc satelītattēla ģeometriskajām korekcijām (skat. 4-10. att.).

Skaitliski to iespējams pārbaudīt, fiksējot ģeogrāfiskus kontrolpunktus satelītattēlā un salīdzinot to atrašanās vietu ar atbalsta datiem, piemēram, autoceļu karti vai ortofotokartēm. Ideālā gadījumā vidējai kvadrātiskajai kļūdai starp kontrolpunktu novietojumiem satelītattēlā un atbalsta datus jābūt mazākai par pikseļa izmēru. Ja nav šādas precizitātes, tad ir jāveic papildu ģeometriskās korekcijas. Rīki ģeometrisko korekciju veikšanai pieejami visās populārākajās ĢIS.

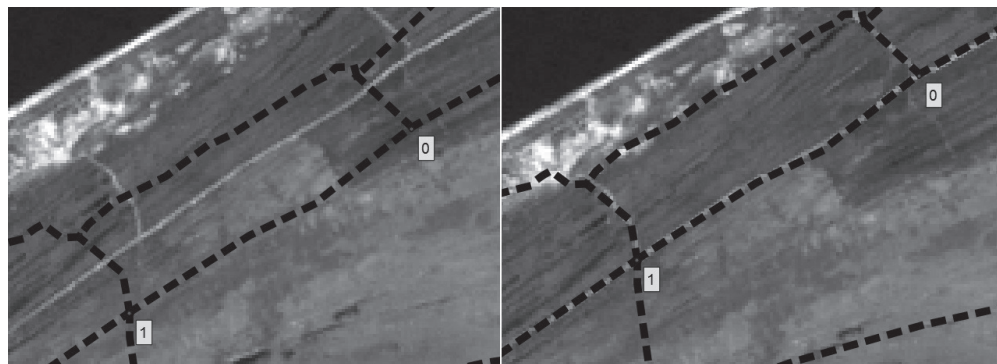
Klasiski nākamais solis ir pāreja no pikseļa intensitātes vērtībām uz zemes virsmas atstarojuma vērtībām. Vairāki attēlu piegādātāji, t. sk. "LANDSAT" jau piedāvā produktus, kam šīs vērtības ir aprēķinātas. Kailcirsu gadījumā šī pirmapstrādes operācija nav kritiski nepieciešama, jo spektrālās vērtības kailcirtēm un koku vainagu noseģumam ir gana atšķirīgas.

Atbalsta datu kopas sagatavošana

Atbalsta datu kopa ietver divas apakškopas: parauga datu kopu klasifikācijas algoritma apmācībai un testa datu kopu klasifikācijas rezultātu precizitātes pārbaudei. Šajā gadījumā kā atbalsta datus izmantosim punktus, kas atbilst koku vainagu noseģumam vai citam



4-9. att. Pirmsapstrādes laikā sagatavotās maskas. No kreisās: mākoņu maska, ūdens teritoriju maska, trūkstošo datu maska un attēla derīgo daļu maska, kas iezīmē pikselus tālākai apstrādei, izmantojot mašīnmācīšanās algoritmus.



4-10. att. Attēla ģeometriskās precizitātes pārbaude. Attēlā pa kreisi redzamas ievērojamas nobīdes starp autoceļiem, kas redzami attēlā un autoceļu karti, kas iezīmēta ar melnu raustītu līniju. Attēlā pa labi ģeometriskā korekcija ir veikta.

zemes pārseguma tipam. Viens no variantiem, kā izveidot šādu datu kopu, ir izvietot noteiktu punktu skaitu regulāra režģa rakstā teritorijā, ko pārklāj attēls. Pēc tam jebkurā no populārajām ĢIS iespējams pievienot augstas izšķirtspējas attēlu datubāzi un vizuāli pārbaudīt katru punktu un vektordatnes datubāzē ierakstīt tā zemes pārseguma tipu. Zemes pārseguma tipus ir ērti kodēt ar skaitļiem: 1 – cits zemes pārsegums, 2 – koku vainagu nosegums. Jācenšas abiem zemes pārseguma tiptiem atzīmēt līdzīgu punktu skaitu.

Precizitātes aprēķināšanai punktus sagatavo līdzīgi, nobīdot punktu režģi par attālu, kas ir puse no atstarpes starp punktiem apmācības datu režģī. Var gadīties, ka kāds no ģenerētajiem punktiem atradīsies uz robežas starp zemes pārseguma tiptiem vai uz vienīgā koka lauka vidū. Šajā piemērā rīkosimies vienkārši un pārbidīsim punktu tālāk no robežteritorijas.

Apmācības datu kopa ietver satelītattēla deskriptorus atzīmētajiem punktiem un ierakstus par to, kāds zemes pārsegums atbilst konkrētajam punktam. Vienkāršākais deskriptoru veids ir izmantot paša attēla pikseļu intensitātes vērtības bez pārveidojumiem. Arī to labi palīdz paveikt ĢIS sistēma. Apkārt punktiem iespējams izveidot riņķi ar noteiktu rādiusu, lai ņemtu vērā iespējami trokšņainas pikseļu vērtības. Tad aprēķina pikseļu, kas pārklājas ar riņķi, vidējās vērtības visu frekvenču joslu attēlos.

Ja vēlamies klasificēt vairāku attēlu mozaīku, tad deskriptori ir jāaprēķina katram attēlam atsevišķi, jo pikseļu intensitātes vērtības ietekmē ne vien zemes pārsegums, bet arī blakusapstākļi attēla ieguves brīdī. Tādēļ nav ieteicams klasificēt vienu attēlu, lietojot deskriptorus, kas aprēķināti no cita attēla, pat ja ir veiktas kādas standartizācijas darbības.

Attēla klasifikācija

Viena no vienkāršākajām, bet tajā pašā laikā efektīvākajām attēlu klasifikācijas metodēm ir k tuvāko kaimiņu metode (kNN). Tā ir spektrālās, vadītās, neparametriskās klasifikācijas metode, kas katram atsevišķam pikselim piešķir vienu zemes pārseguma tipu. Termins “spektrālā” nozīmē to, ka kNN vienkāršākajā realizācijā lieto tikai viena pikseļa deskriptorus, neizmantojot telpiskās sakarības starp vairākiem pikseļiem. Savukārt termins “neparametriskā” nozīmē, ka kNN neizmanto kādu konkrētu apmācības datu deskriptoru aprakstošo modeli.

Metodes pamatprincips ir salīdzināt klasificējamo pikseli ar visiem apmācības datu pikseļiem un piešķirt nezināmā tipa pikselim tādu zemes pārseguma tipu, kāds ir tā k tuvākajiem kaimiņu pikseļiem apmācības datos. Pirmo reizi kNN literatūrā ir minēta 1951. gadā [133], savukārt tālīzpētes datu klasifikācijā meža inventarizācijas atvieglošanai to testē un lieto kopš 1990. gada [96].

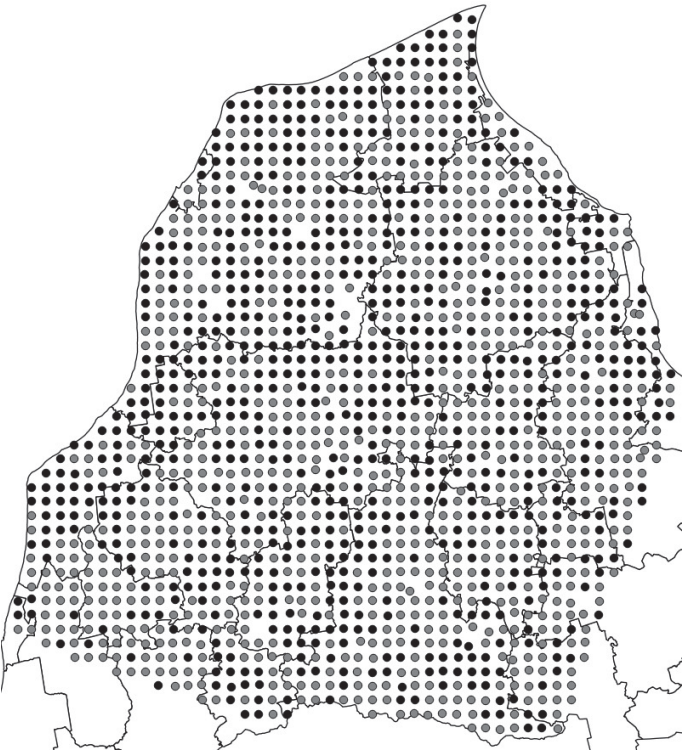
Vispirms apskatīsim viena pikseļa p_n klasifikāciju divu deskriptoru gadījumā – katru apmācības datu pikseli apraksta divu frekvenču joslu attēlu intensitāšu (DN^{14} vienībās) vērtības f_1 un f_2 , piemēram, tā varētu būt apmācības pikseļa intensitāte zilā un tuvā infrasarkanā starojuma attēlā.

Katru apmācības pikseli p_i raksturo vektors $p_i = [f_{1,i}, f_{2,i}]$, un katram apmācības pikselim p_i ir piesaistīts zemes pārseguma klases numurs ω_i . Apskatīsim divu klašu gadījumu: 1. klase ir koku vainagu nosegums, 2. klase – cits zemes pārseguma tips. Šādus divdimensionālus piemērus ir ērti analizēt 2D histogrammas (sauktas arī par izkliedes diagrammu)

14 DN – Digital Number.

veidā (skat. 3.4.5. sadaļu). Pirmā deskriptora (interpretācijas atslēgas) vērtību variācijas ir parādītas uz x ass, otrā deskriptora vērtību variācijas – uz y ass. Atsevišķas spektrālās klases izkliedes diagrammā var atpazīt kā punktu klasterus jeb reģionus ar relatīvi augstu punktu blīvumu un atstarpēm starp tiem [124].

4-12. att. (a) ar atšķirīgiem simboliem iezīmēti apmācības dati, kuru Zemes pārseguma tips jau ir zināms (to nosaka no atbalsta datiem). Diagrammai pievienots arī pikselis p_n (apzīmēts ar *), kura tips nav zināms un kurš ir jāklasificē ar kNN metodi.



Cla	B1mean	B2mean	B3mean	B4mean	B5mean	B6
1	136.25000000...	296.25000000...	187.50000000...	1846.2500000...	790.50000000...	355.5
1	182.00000000...	336.00000000...	227.00000000...	1968.0000000...	903.00000000...	397.5
1	132.50000000...	288.00000000...	188.50000000...	2081.5000000...	858.00000000...	373.0
1	182.00000000...	396.00000000...	290.50000000...	2334.5000000...	1300.0000000...	610.5
2	286.00000000...	464.00000000...	502.00000000...	2086.0000000...	1912.0000000...	1046.
1	196.00000000...	364.00000000...	241.00000000...	2128.5000000...	1008.5000000...	455.5
1	125.00000000...	282.00000000...	187.00000000...	1951.5000000...	831.50000000...	386.0
1	133.00000000...	302.00000000...	206.00000000...	1979.0000000...	983.50000000...	457.5
1	125.50000000...	313.00000000...	150.50000000...	3789.5000000...	1372.5000000...	530.0
1	120.00000000...	315.50000000...	150.00000000...	3716.0000000...	1311.0000000...	503.0
2	356.00000000...	544.50000000...	654.00000000...	2287.0000000...	2316.0000000...	1322.
1	163.50000000...	316.50000000...	189.00000000...	2641.5000000...	1046.0000000...	440.5

4-11. att. (a) Atbalsta punktu izvietojuma piemērs. Ar melnu krāsu iezīmēti koku vainaga nosegumam atbilstoši punkti, pelēku – cita zemes pārseguma punkti. (b) Katram punktam manuāli klasificētā zemes pārseguma klase un aprēķinātie deskriptori. Deskriptori šajā gadījumā ir dažādu frekvenču joslu attēlu vidējās vērtības nelielā rādīsā ap punktu.

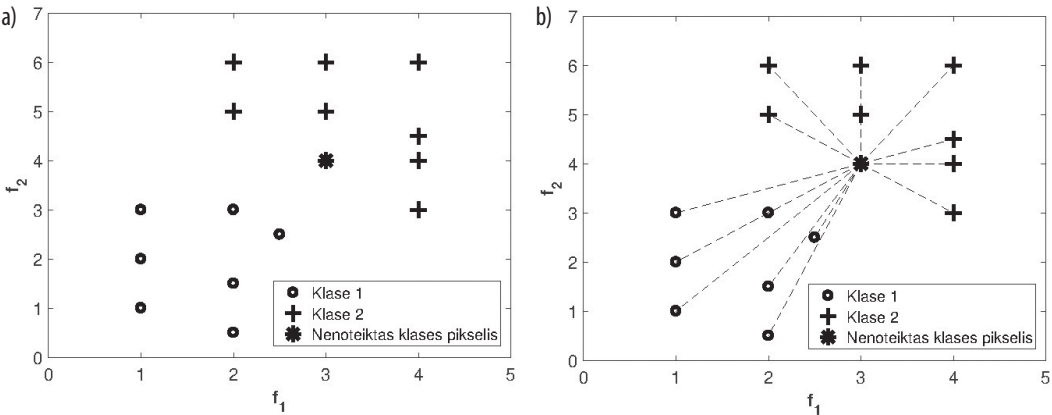
No klasificējamā pikseļa p_n deskriptoru telpā aprēķina “attālumu” d (Eiklīda normu) līdz visiem parauga pikseļiem p_i :

$$d(p_n, p_i) = \sqrt{(f_{1,n} - f_{1,i})^2 + (f_{2,n} - f_{2,i})^2} \tag{4.1.}$$

4-12.(b) att. “attālums” iezīmēts ar melnām, raustītām līnijām. 4.2. tabulā ir parādīti konkrēti skaitļi 4-12. att. diagrammā attēlotajiem datiem. Svarīgi saprast, ka šajā gadījumā rēķinātais “attālums” nav saistīts ar pikseļa koordinātām attēla matricā, bet tikai ar pikseļa deskriptoru vērtībām. Rezultātā aprēķinātais “attālums” ir N dimensionāls vektors d , kur N ir kopējais parauga pikseļu skaits.

4-2. tab. Datu piemērs. $k = 7$ tuvākie kaimiņi ir treknrakstā.

Pikseļa numurs	f_1	f_2	ω_i	$d(p_n, p_i)$
p_1	1	1	1. klase	3,61
p_2	1	2	1. klase	2,83
p_3	1	3	1. klase	2,24
p_4	2	0,5	1. klase	3,64
p_5	2	1,5	1. klase	2,69
p_6	2	3	1. klase	1,41
p_7	2,5	2,5	1. klase	1,58
p_8	2	5	2. klase	1,41
p_9	2	6	2. klase	2,24
p_{10}	3	5	2. klase	1,00
p_{11}	3	6	2. klase	2,00
p_{12}	4	3	2. klase	1,41
p_{13}	4	4	2. klase	1,00
p_{14}	4	4,5	2. klase	1,12
p_{15}	4	6	2. klase	1,24
p_n	3	4	Nenoteikta klase	–



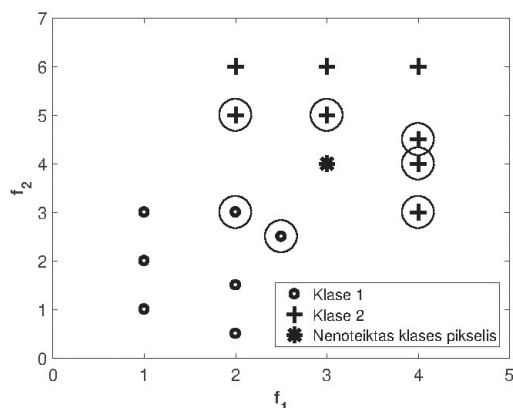
4-12. att. (a) Izklides diagrammā iezīmēti apmācības pikseļi un pikselis, kura zemes pārseguma klasi vēlamies noskaidrot. (b) Izklides diagrammā iezīmēts “attālums” no klasificējamā pikseļa līdz visiem apmācības pikseļiem.

Balstoties uz “attālumu” vērtībām d , tiek atlasīti k skaita pikseļi, līdz kuriem ir vismazākais attālums, respektīvi, klasificējamā pikseļa p_n k tuvākie kaimiņi. Nezināmajam pikselim identificē to zemes pārseguma tipu, kāds ir visbiežāk sastopams (k tuvāko kaimiņu zemes pārseguma tipu moda) starp k tuvāko kaimiņu zemes pārseguma tipiem. 4-13. att. atlasīti septiņi tuvākie kaimiņi, un klasificējamam pikselim p_n ir piešķirta 2. klase, jo pieci tuvākie kaimiņi pieder 2. klasei, bet tikai divi kaimiņi pieder 1. klasei.

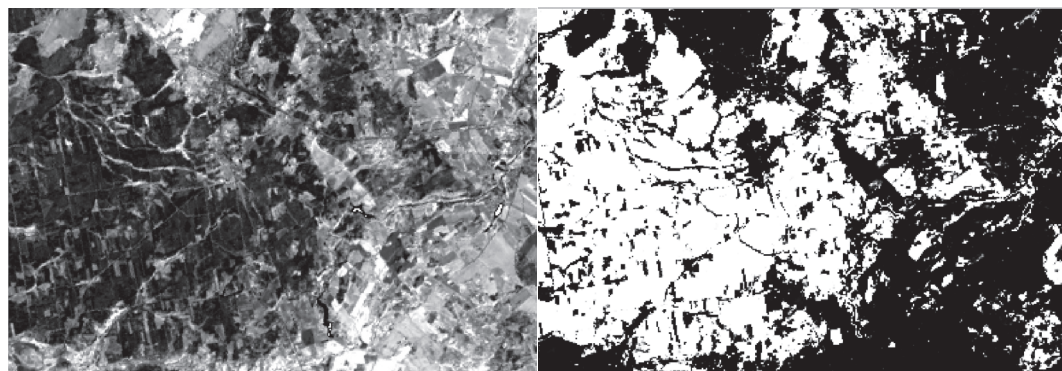
Vispārējā gadījumā iespējams aprēķināt vai nolasīt vairāk par divām deskriptoru vērtībām. Ja divu deskriptoru vietā ir pieejami g deskriptori ($p_i = [f_1, f_2, \dots, f_g]$), tad Eiklīda norma vispārīgā formā izsakāma ar formulu:

$$d(p_n, p_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^g (f_{j,n} - f_{j,i})^2} \quad (4.2.)$$

Vienkāršāko algoritma versiju, kur $k = 1$, sauc arī par minimālās distances vai tuvākā kaimiņa klasifikatoru. Ja vēlamies lietot $k > 1$, tad tuvāko kaimiņu skaitu parasti izvēlas, veicot precizitātes izmaiņu pētījumus. Ja kopējā precizitāte, palielinot k skaitu par 1, nepalielinās vairāk kā par 5 %, tad uzskata, ka k palielināt vairs nav nepieciešams.



4-13. att. Izklīdes diagrammā ar apli ir apvilkti k (šajā gadījumā $k = 7$) tuvākie klasificējamā pikseļa kaimiņi.



4-14. att. Viena no izmantotā satelītattēla frekvenču joslām (tuvais infrasarkanais diapazons) (kreisajā pusē) un kNN apstrādes rezultāts (labajā pusē). Ar melnu krāsu iekrāsots cits zemes pārseguma tips, bet ar baltu – koku vainagu nosegums. Ja attēlā būtu redzamas arī apstrādei nederīgas teritorijas, tad būtu jāievieš krāsu kods arī tām.

Visu attēlu klasificējam šādi:

- izveidojam attēlu t , kurā glabāsim klasifikācijas rezultātu kā nulļu matricu oriģinālā attēla izmērā, bet tikai ar vienu attēla slāni;
- izskatām visus attēla pikseļus un, ja derīgo attēla daļu maskā pikselis r -tajā rindiņā un c -tajā kolonnā ir iezīmēts kā derīgs, tad to klasificējam ar kNN procedūru. Iegūtajā attēlā r -tajā rindiņā un c -tajā kolonnā ievietojam kNN atrastās klases numuru: $t(r, c) = \omega$. Ja attēla pikselis nav derīgs, tad kNN procedūra netiek veikta, un $t(r, c) = 0$, kas nozīmē, ka zemes pārseguma tips netiek meklēts;
- saglabājam attēlu t (piemēru skat. 4-14. att.), pievienojot tam kartogrāfiskās projekcijas informāciju.

Katram mašīnmācīšanās algoritmam ir savas priekšrocības un trūkumi. kNN galvenās priekšrocības ir šādas:

- tas ir viegli programmējams un bieži iekļauts gan dažādos rīkos, gan dažādu programēšanas valodu bibliotēkās;
- viegli paralelizējams, jo katrs pikselis tiek apstrādāts atsevišķi, līdz ar to var sadalīt attēlu daļās un šīs daļas apstrādāt paralēli, tādējādi ietaupot skaitļošanas laiku;
- efektīvi tiek izmantotas variācijas parauga datus, jo kNN nekonstruē no datiem modeli, bet lieto apmācības datus tiešā veidā;
- iespējams klasificēt uzreiz vairākus Zemes pārseguma raksturlielumus (piemēram, koku vainagu noseģumu, koku sugas un audzes krāju).

kNN galvenie trūkumi ir:

- ilgs skaitļošanas laiks kNN realizācijās bez papildu uzlabojumiem Eiklīda normas aprēķinu dēļ. Vienkāršākajā variantā tiek aprēķināti visi "attālumi" starp klasificējamo pikseli un N apmācības pikseļiem g dimensijās, kas nozīmē skaitļošanas laika lineāru pieaugumu, palielinot apmācības pikseļu skaitu;
- liels datora atmiņas resursu patēriņš, jo apmācības dati bez papildu uzlabojumiem ir jāuzglabā pilnā apjomā datora operatīvajā atmiņā;
- dimensionalitātes problēma ietekmē rezultātu – nepieciešamo parauga pikseļu skaits pieaug eksponenciāli, palielinot deskriptoru skaitu [70].

Precizitātes novērtējumi

Pēdējais solis pēc iegūtā attēla izveides (to var uzskatīt par tematisko karti) ir kartes precizitātes un uzticamības novērtēšana. Precizitāti novērtē, izmantojot kļūdu matricas metodiku. Precizitāti novērtē ar neatkarīgiem testa datiem, kas netika izmantoti kNN klasifikācijā. Tas gan nenozīmē, ka deskriptori kādiem testa punktiem nevarētu būt vienādi ar apmācības datu punktu deskriptoriem. Neatkarīgam testa datu komplektam veic deskriptoru klasifikāciju un salīdzina kNN iegūtos rezultātus ar manuālās klasifikācijas rezultātiem.

kNN gadījumā var izmantot specifisku metodi, kas ļauj gūt priekšstatu par precizitāti, izmantojot tikai apmācības datus. To sauc par kNN viena punkta izņemšanas metodi. Metodes ietvaros katru no apmācības datu pikseļiem p_i klasificē, izmantojot pārējos apmācības datu pikseļus, bet, protams, izņemot no apmācības datu kopas pašu p_i .

4-2. tabulā redzamajā piemērā vispirms tiktu lietota kNN procedūra pikselim p_1 , kā apmācības datus izmantojot $[p_2, p_3, \dots, p_{15}]$, pēc tam klasificēts p_2 , kā apmācības datus lietojot

$[p_1, p_3, p_4, \dots, p_{15}]$. Pikseļa p_3 gadījumā apmācības dati būs $[p_1, p_2, p_4, p_5, \dots, p_{15}]$, un šādā veidā turpinām klasifikāciju, līdz visi apmācības datu pikseļi ir klasificēti. Rezultātā katram pikselim p_i būs pieejams pareizais zemes pārseguma tips, kas tika noteikts, sagatavojot atbalsta datu kopu, un kNN noteiktais zemes pārseguma tips, ko var salīdzināt, aprēķinot kļūdu matricu. Šādā veidā iespējams gūt priekšstatu par precizitāti, neieguldot papildu laiku atsevišķu testa punktu sagatavošanai.

Lai nodrošinātu kartes uzticamību, punktus pētāmajā apgabalā ieteicams izvietot regulāri un pārbaudīt, vai testa punktos ir iekļautas nozīmīgākās variācijas zemes pārsegumu raksturlielumos. Papildus kļūdu matricas lietošanai ieteicams veikt kļūdu avotu analīzi, lai saprastu, kādos gadījumos var tikt sajaukts koku vainagu nosegums un cits zemes pārseguma tips. Noskaidrojot, kādos gadījumos rodas kļūdas, var noteikt, kādiem zemes pārseguma raksturlielumiem kartē var uzticēties, bet kādi gadījumi ir jāizvērtē rūpīgāk un jāapskata arī citi datu avoti. Piemēram, “LANDSAT” satelītattēlu telpiskās izšķirtspējas gadījumā klasifikācijas algoritms bieži sajauc retas mežaudzes ar citu zemes pārseguma tipu, tādēļ, ja ir svarīgi atpazīt teritorijas ar mazu koku vainagu nosegumu, tad uzdevuma izpildei ieteicams izvēlēties augstas telpiskās izšķirtspējas datus. Savukārt, ja koku vainagu pārklājums ir augsts un audze ir gana liela, tad “LANDSAT” klasifikācijas rezultāti ir realitātei atbilstoši ar augstu precizitāti.

4.3. Mežu tālīzpēte (26. lekcija)

4.3.1. Kopsavilkums

Mežs ir viens no galvenajiem Latvijas dabas resursiem, tādēļ apskatīsim, kā tālīzpēte var palīdzēt meža resursu pārvaldībā. Meža inventarizācijas vajadzībām ir svarīga informācija par tā trīsdimensionālu struktūru, tāpēc papildus multispektrālo datu lietojumam tiks analizēta arī lidara datu izmantošana. Darbplūsmas piemērs izskaidros objektu identifikāciju jeb kā atpazīt atsevišķus kokus, izmantojot augstas izšķirtspējas datus.

4.3.2. Problēmas nozīmība

Meži klāj vairāk nekā pusi no Latvijas teritorijas un ir viens no nozīmīgākajiem dabas resursiem klimata stabilitātes, ekonomikas un cilvēku labsajūtas nodrošināšanai. Lai mežu apsaimniekošanas rezultātā efektīvi sasniegtu ekonomiskos, apkārtējās vides aizsardzības un sociālos mērķus, ir nepieciešama precīza informācija par mežu kvalitatīvo un kvantitatīvo stāvokli, kā arī par tā izmaiņām laika gaitā. Šāda informācija tiek ievākta un apkopota meža inventarizācijas laikā, kad ar lauka mērījumiem un aprēķiniem tiek noteikti tādi meža inventarizācijas parametri kā koku sugas, nogabala krājas apjoms, audzes vecums u. c.

Meža inventarizācija ir “informācijas iegūšana par mežu un tam piegulošiem purviem, meža infrastruktūras objektiem, mežā ietilpstošiem pārplūstošiem klajumiem, purviem un laucēm konkrētā meža īpašumā vai valdījumā un iegūtās informācijas dokumentēšana” [79]. Pamatojoties uz meža inventarizācijas datiem, tiek izstrādāti meža turpmākās apsaimniekošanas plāni.

Latvijā tiek veikta nogabalu (regulārā) meža inventarizācija un statistiskā meža inventarizācija.

Nogabalu meža inventarizācija attiecas uz inventarizācijas parametru noteikšanu mežaudzes (“mežs ar viendabīgiem meža augšanas apstākļiem, koku sugu sastāvu un vecumu” [79]) līmenī, izmantojot instrumentālus mērījumus un acumēru. Lai arī pamatvienība šajā inventarizācijas shēmā ir nogabals, vairāki meža inventarizācijas parametri ir jānosaka, veicot atsevišķu koku mērījumus izlases kārtībā. Saskaņā ar aktuālajiem normatīvajiem aktiem nogabalu inventarizācija ir jāveic vismaz reizi 20 gados, ja netiek veikta saimnieciskā darbība. Mežus inventarizē pakāpeniski, tādējādi nogabalu inventarizācijas dati nesniedz pilnvērtīgu pārskatu par plašām teritorijām vienā laika momentā.

Statistisko inventarizāciju veic regulāri izvietotos parauglaukumos, kur katrs parauglaukums reprezentē 2500 hektāru lielu platību. Meža statistiskā inventarizācija sniedz augstāku mežu resursu novērtēšanas precizitāti valsts mērogā, bet neattiecas uz konkrētiem meža īpašumiem [98], [106].

Lauka mērījumi ir precīza pieeja meža inventarizācijas parametru noteikšanā, taču tas ir laikietilpīgs un finansiāli dārgs process. Meža inventarizācijas atvieglošanai kā papildu informācijas avots var kalpot satelītu un lidmašīnu ievāktie dati. Tālīzpētes datu priekšrocības, salīdzinot ar lauka mērījumiem, ir telpiski detalizēta informācija ar lielu pārklāju-

mu, kas iegūta vienā laika momentā. Izmantojot satelītattēlus, ir iespējams pētīt arī mežos notikušās izmaiņas.

Meža inventarizācijas parametrus no datu apstrādes viedokļa var iedalīt divās grupās:

- diskretie lielumi reprezentē meža inventarizācijas parametrus, ko raksturo konkrēts klases apzīmējums, piemēram, koku suga;
- skaitliskie lielumi reprezentē meža inventarizācijas parametrus, kas var pieņemt skaitliskas vērtības no noteikta vērtību diapazona, piemēram, audzes krāja, augstums, biomasas daudzums u. tml.

Meža inventarizācijas parametri nosakāmi vairākos līmeņos:

- A – parametrs nosakāms atsevišķa koka līmenī;
- VS – parametrs nosakāms valdošajai sugai pēc atsevišķu koku sugu noteikšanas;
- M – parametrs nosakāms mežaudzes līmenī.

4-3. tabulā apkopota informācija par meža inventarizācijas parametru noteikšanas iespējām, izmantojot lidara un dažādas izšķirtspējas multispektrālos datus. Tabulā izmantotie apzīmējumi raksturo meža inventarizācijas parametru noteikšanas metodes tipu un efektivitāti:

- T – parametra vērtība tiešā veidā ir saistīta ar sensoru nomērītajiem lielumiem un ir nosakāma samērā precīzi;
- NT – parametra vērtība tiešā veidā nav saistīta ar sensoru nomērītajiem lielumiem, parametrs tiek aptuveni novērtēts, izmantojot eksperimentālas sakarības starp konkrēto parametru un sensoru datu vērtībām;
- I – parametra noteikšanas precizitāte neatbilst meža inventarizācijas prasībām.

Meža inventarizācijas parametru noteikšanas metodes, izmantojot tālīzpētes datus, var iedalīt:

- 1) metodēs, kas darbojas pikseļu vai attēla reģionu līmenī. Šīs metodes lielākoties ietver sakarību jeb modeļu konstruēšanu starp tālīzpētes datu deskriptoriem un meža inventarizācijas parametriem, apejot atsevišķu koku mērījumus;

4-3. tab. Meža inventarizācijas parametru noteikšanas iespējas, izmantojot tālīzpētes datus. MS – multispektrālie dati.

Meža inventarizācijas parametrs	Līmenis	Noteikšanas veids	Lidars	MS <1 m izšķirtspēja	MS >12 m un <50 m izšķirtspēja
Koku skaits N_t	A	Lauka mērījums	T	T	–
Koku suga M_{inv}	A	Lauka mērījums	T	T	T, I
Vecums A_{inv}	VS	Lauka mērījums	NT, I	NT, I	NT, I
Vidējais augstums H_{inv}	VS	Lauka mērījums	T	NT	NT, I
Bonitāte B_{inv}	VS	$f(M_{inv}, A_{inv}, H_{inv})$	NT, I	NT, I	NT, I
Šķērslaukums G_{inv}	M	$f(D_{inv})$	NT, I	NT, I	NT, I
Vidējais caurmērs D_{inv}	VS	Lauka toņi atbilst vēsākiem apgabaliem, sarkanie toņi – karstākiem	NT	NT, I	NT, I
Biezība Z_{inv}	M	$f(G_{inv}, coef.)$	NT, I	NT, I	NT, I
Krāja V_{inv}	M	$f(G_{inv}, coef.)$	NT	NT, I	NT, I

- 2) metodēs, kas darbojas atsevišķa koka limenī. Šo metožu ietvaros vispirms identificē atsevišķa koka vainagu un aprēķina tos meža inventarizācijas parametrus, ko var aprēķināt atsevišķam kokam, bet nogabalu statistiku pēc tam apkopo, izmantojot atsevišķo koku mērījumus. Šī pieeja ir precīzākā automatizētai meža inventarizācijai [83]. Galvenie kļūdu avoti šīs pieejas gadījumā ir identifikācijas un segmentācijas algoritmu neprecizitātes. Šīs kļūdas var izpausties: 1) trūkstošos kokos, 2) segmentētos objektos, kas nav koki, 3) viens koka vainags var tikt atpazīts kā vairāki atsevišķi koki, 4) vairāki koki var tikt apvienoti vienā vainagā [83].

4.3.3. Uzdevumi mežu tālīzpētē

Turpmāk sīkāk apskatīsim galvenos meža inventarizācijas parametru noteikšanas uzdevumus:

- mežu klasifikāciju;
- mežu struktūras novērtēšanu;
- mežos notiekošo procesu modelēšanu;
- mežu raksturlielumu izmaiņu noteikšanu.

Mežu klasifikācija

Mežu klasifikācijas uzdevums ietver koku sugu un meža tipa klasifikāciju. Koku sugu noteikšanas gadījumā principi ir ļoti līdzīgi kā zemes pārseguma kļāšu noteikšanā. Tiek sagatavoti apmācības dati, aprēķinot pikseļu deskriptorus vai lietojot attēla pikseļu intensitātes vērtības tiešā veidā. Apmācības datus iespējams lietot jebkura mašīnmācīšanās algoritma apmācībai. Šobrīd aktuālās tendences ir saistītas ar dziļās apmācības neironu tīklu izmantošanu, taču jāatceras, ka klasifikācijas precizitāti būtiski ietekmē deskriptoru vērtību atšķiramība dažādām klasēm.

Koku sugu un citu diskreto lielumu precizitāti novērtē, izmantojot kļūdu matricu. Sasniedzamo precizitāti koku sugu gadījumā ietekmē gan sastopamo sugu skaits un savstarpējā spektrālā līdzība, gan arī tīraudžu un jauktu audžu sastopamības biežums pētāmajā apgabalā. Koku sugu spektrālās signatūras savstarpēji ir visai līdzīgas, un, ja pikselim atbilstošajā laukumā uz zemes ir augsta sugu dažādība, tad pikseļa intensitātes vērtību veido visu koku sugu spektrālo signatūru kombinācijas. Tādēļ vidējās telpiskās izšķirtspējas datu gadījumā sīkāka koku sugu klasifikācija par skujkoku un lapkoku atšķiršanu sniedz rezultātus ar ļoti zemu precizitāti. Savukārt hiperspektrālie dati Latvijas gadījumā nodrošina cerīgu rezultātu – ap 95 % kopējo precizitāti piecu biežāk sastopamo koku sugu gadījumā [92].

Meža tipu klasifikācija ir vēl sarežģītāka, jo mežu tipus nosaka, ņemot vērā arī pamežu, zemsedzi, augsni, mitruma apstākļus un tamlīdzīgus parametrus, ko ir grūti noteikt ar tālīzpētes datiem.

Mežu struktūras novērtēšana

Meža inventarizācijas skaitlisko parametru noteikšanai visbiežāk lieto dažādas regresiju analīzes metodes. Regresiju analīze ir statistisko metožu kopums, kas ļauj noteikt saka-

ribas starp mainīgajiem un noformēt tās modeļa veidā. Modelis parasti ir vairākargumentu funkcija, kuras argumenti (neatkarīgie mainīgie) ir tālīzpētes datu deskriptori, savukārt rezultāts ir meža inventarizācijas parametrs.

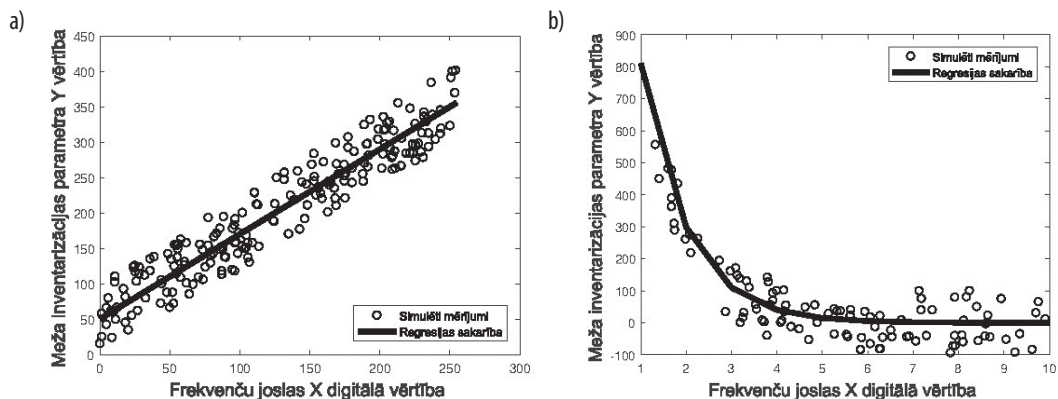
Vispārēja pieeja novērtēšanas veikšanai ir:

- 1) apkopot vai sagatavot atbalsta datus (punktu vai daudzstūru veidā) meža inventarizācijas parametriem, kas jānosaka;
- 2) iegūt tālīzpētes attēlus pētāmajai teritorijai;
- 3) aprēķināt attēlu deskriptorus atbalsta datu punktiem vai daudzstūriem;
- 4) izstrādāt modeli, kas raksturo sakarības starp atbalsta datiem un attēlu deskriptoriem;
- 5) veikt modeļa precizitātes un uzticamības pārbaudes;
- 6) lietot modeli, lai novērtētu meža inventarizācijas parametru vērtības tiem pikseļiem vai apgabaliem, kam atbalsta dati nav pieejami.

Vienkāršākajā gadījumā var apskatīt viena deskriptora un viena meža inventarizācijas parametra savstarpējās sakarības. Sakarību analizē ir noderīgas izkliedes diagrammas, kurās uz x ass attēlojam pikseļa viena deskriptora vērtības, uz y ass pikselim atbilstošās meža teritorijas meža inventarizācijas parametra vērtības. Lineārā izkliedes diagrammā punktiem vajadzētu būt tikai nedaudz izklīdētiem ap $y = ax + b$ funkcijas grafiku (skat. 4-15.(a) att.). Tādā gadījumā ar nelielu kļūdu, zinot deskriptora vērtību x_1 , var vienkārši aprēķināt meža inventarizācijas parametru $y_1 = ax_1 + b$. Regresiju analīzes mērķis šajā gadījumā būtu noteikt līnijas virziena koeficientu a un krustpunktu ar y asi b .

Meža inventarizācijas parametru vērtībām, protams, šīs sakarības nav tik vienoizīmīgas. Piemēram, multispektrālajos datos krāju un pikseļa intensitātes vērtības nereti saista eksponenciāla sakarība, kā to redzam 4-15.(b) att. Šajā piemērā nelielam frekvenču joslu vērtību diapazonam atbilst ļoti plašs meža inventarizācijas parametru diapazons. Intuitīvi var secināt, ka ar dažām pikseļu vērtībām nevar aprakstīt ļoti daudz iespējamo meža inventarizācijas parametru vērtības. Tas ir izskaidrojams ar koku vainagu noseguna palielināšanos.

Rezultātu precizitāti nosaka tas, vai konkrētajam meža inventarizācijas parametram vispār ir loģiski izskaidrojamas sakarības ar tālīzpētes datus redzamo. Krāja ir koksnes tilpums uz kvadrātmetru, un tas ir viens no būtiskākajiem parametriem, lai noteiktu mežau-



4-15. att. Piemēri sakarībām starp neatkarīgo un atkarīgo mainīgo: (a) lineāra sakarība, (b) eksponenciāla sakarība.

dzēs koksnes vērtību. Visnotaļ loģiski, ka to tiešā veidā (kā koku sugas) multispektrālajos datos novērot nevar (redzams tikai lapotnes atstarojums). Taču koksnes daudzums korelē ar koka vainaga izmēru. Kamēr koku vainagi savstarpēji nav saslēgušies, cauri spīdošā augsne ļauj saskatīt noteiktu sakarību: jo gaišāka ir pikseļa intensitāte, jo mazāka krāja. Tas ir tādēļ, ka augsne un zemsedze atstaro Saules starojumu stiprāk nekā koku vainagi ar ēnu veidoto tekstūru. Ja koku vainagi savstarpēji saslēdzas, tad korelācija vairs nesaglabājas, jo multispektrālajos datos vainagu naseguma pieaugums vairs nav saskatāms. Līdzīgi kā krāja, arī koku augstums un vecums nav saistīti ar multispektrālo mērījumu vērtībām tiešā veidā.

Citādi ir lidara datu gadījumā. Lidara dati ļauj aprēķināt t. s. normalizēto digitālo virsmas modeli (vairāk informācijas skat. 2.3. nodaļā), kas parāda objektu augstumu virs Zemes reljefa. Objekta augstums ir tieši tas, kas ir nepieciešams, lai aprēķinātu mežaudzes vidējo vai pat atsevišķu koku augstumu, tādēļ var sagaidīt lineāram modelim līdzīgas sakarības un augstāku novērtējumu precizitāti.

Var lietot arī neparametriskās metodes, kas modeli nekonstruē, piemēram, jau zināmo *kNN* metodi (skat. 4.2. nodaļu). Skaitlisku raksturlielumu noteikšanas gadījumā biežākās vērtības jeb modas atrašana ir jāaizstāj ar šādām izteiksmēm:

$$\hat{m}_{p_n} = \sum_{i=1}^k w_{p_i, p_n} m_{p_i} \quad (4.3.)$$

$$w_{p_i, p_n} = \frac{1}{d(p_n, p_i)} / \sum_{j=1}^k \frac{1}{d(p_n, p_j)} \quad (4.4.)$$

Meža inventarizācijas parametra $\hat{m}_{p_n}$ novērtējumu iegūst, saskaitot svērtas *k* tuvāko kaimiņu inventarizācijas parametru vērtības. Svāra koeficientus w_{p_i, p_n} aprēķina apgriezti proporcionāli Eiklīda normai *d* starp klasificējamo pikseli p_n un tā tuvākajiem kaimiņiem. Lielāka ietekme uz rezultējošo vērtību $\hat{m}_{p_n}$ ir tam kaimiņam, kas atrodas tuvāk analizējamam pikselim.

Precizitāti novērtē līdzīgi kā citu atpazīšanas uzdevumu gadījumā – salīdzina metodes rezultātus ar atbalsta mērījumiem vieniem un tiem pašiem pikseļiem vai daudzstūriem. Skaitlisko lielumu novērtējumu kļūdu visbiežāk izsaka, izmantojot vidējo kvadrātisko (*RMSE*¹⁵) un relatīvo vidējo kvadrātisko kļūdu (*nRMSE*¹⁶). *RMSE* ir tā pati mērvienība, kas meža invenarizācijas parametriem, savukārt *nRMSE* procentos ļauj labāk novērtēt, cik liela ir kļūda attiecībā pret iespējamo meža inventarizācijas parametra vērtību diapazonu.

Jārēķinās, ka kļūdas var izrādīties pārāk augstas precīzai meža inventarizācijai. Piemēram, Vācijā veiktajā pētījumā krājas kļūdas bija 58,65 % (154,31 m³/ha) krāsu infrasarkanā attēla izmantošanas gadījumā, 54,25 % (142,73 m³/ha) – *LANDSAT TM* satelītattēla un 45 % (119,61 m³/ha) – lidara datu gadījumā [118]. Līdzīgi augstas kļūdas ir arī citiem struktūrālajiem meža inventarizācijas parametriem, ja tos rēķina pikseļu līmenī.

Augstāku precizitāti iespējams sasniegt, ja strukturālos inventarizācijas parametrus aprēķina atsevišķiem kokiem pēc koku vainagu identifikācijas un atdalīšanas. Ziemeļamerikā veiktajā pētījumā, nosakot atsevišķu koku krāju, tika konstatētas kļūdas 52,84 m³/ha lapu kokiem un 47,9 m³/ha skujukokiem [136].

¹⁵ *RMSE* – Root Mean Square Error.

¹⁶ *nRMSE* – normalized Root Mean Square Error.

Atsevišķu koku līmenī noteikto parametru precizitāti ietekmē galvenokārt atsevišķu koku noteikšanas precizitāte un lidara mērījumu punktu blīvums.

Iespējami vairāki scenāriji, kad lidara mērījumu punkti neraksturo patieso koka virsotni [145]:

- mazāki koki blakus lielākiem var tikt izlaisti;
- lāzera impulss netrāpa patiesajai koka galotnei;
- pie maza punktu blīvuma virsotnei atbilstošais punkts var būt atstarojies no zemākām koka vainaga daļām un veido divas virsotnes virsmas modeļi;
- atsevišķi koki vispār tiek izlaisti.

Mežos notiekošo procesu modelēšana

Modeļi ļauj vispārēji aprakstīt dažādus mežos notiekošos procesus un dod iespēju paredzēt, izpētīt un modelēt to ietekmi pie dažādiem nosacījumiem un mērogiem [151]. Šādi modeļi ir īpaši aktuāli klimata pārmaiņu kontekstā. Mežaudzes sevi atražo relatīvi ilgā laika periodā, tādēļ ir svarīgi zināt, kādas koku sugas labāk ataudzēt un kā mežu teritorijas varētu reaģēt uz izmaiņām pierastajos augšanas apstākļos.

Nozīmīgu modeļu piemēri ir:

- koku augšanas gaitas un koksnes pieauguma noteikšanas modeļi;
- ekosistēmu procesu modeļi;
- telpisko tēlu modeļi.

Koku augšanas gaitas modeļi ļauj prognozēt koksnes apjoma pieaugumu atkarībā no koku sugas, meža tipa un citiem apstākļiem. Tālīzpētes dati šādu modeļu vajadzībām var piedāvāt telpiski detalizētus meža inventarizācijas parametru novērtējumus ar plašu telpisko pārklājumu, taču novērtējumu kļūdas var būt pat ļoti lielas.

Viens no ekosistēmu procesu svarīgiem modeļiem ir saistīts ar oglekļa aprites analīzi. Tālīzpēte var nodrošināt šādu modeļu veidošanai nepieciešamos datus: veģetācijas tipu, biomasas novērtējumu, audzes vecumu, lapu noklājuma indeksu, koku augstuma novērtējumu u. tml.

Dažādu izmēru un sastāvu mežaudzes veido ainavā mozaīku kopā ar citiem zemes pārseguma tipiem. Mežu telpiskā sadalījuma analīze ļauj novērtēt, vai tiek sasniegti izvirzītie mērķi gan koksnes ražošanā, gan dabas aizsardzības, gan ainavas vizuālās kvalitātes nodrošināšanā un citās jomās. Viens no telpiskā sadalījuma modelēšanas lietojumiem ir kvantitatīva novērtējuma iegūšana par telpiskajām sakarībām, kas ir novērojamas ainavā.

Kvantitatīvos aprakstus iespējams salīdzināt dažādām teritorijām un secināt par apsaimniekošanas procesu ietekmi uz tām. Telpiskā sadalījuma izmaiņas laika gaitā ļauj identificēt nozīmīgus ekoloģiskus procesus, tādus kā mežizstrādes ietekmi uz dzīvnieku populāciju, slimību izplatību, mežaudzes produktivitātes zonējumu, hidroloģiskos procesus u. c. Telpisko sadalījumu raksturo tādi raksturlielumi kā meža apgabala kompakts, izmērs, forma, perimetra un laukuma attiecība, attēla tekstūra apgabalā, attālums līdz tuvākajām mežaudzēm u. tml. Nosakot šos lielumus ar tālīzpētes datiem, ir jāņem vērā, ka tālīzpētes attēlu telpiskā izšķirtspēja ietekmē parametru vērtības un tas var radīt kļūdas rezultātu interpretācijā.

Mežu izmaiņu noteikšana

Nozīmīgākās mežu izmaiņas ir:

- mežizstrāde kailciršu veidā;
- daļēja mežizstrāde;
- meža teritoriju degradācija dabisku procesu rezultātā, piemēram, vējgāzes, ugunsgrēki, slimības;
- meža atjaunošanās.

Metodes izmaiņu noteikšanai pārsvarā iedala:

- pikseļu analizē balstītās metodēs;
- objektu analizē balstītās metodēs.

Pikseļu analizē balstītās metodes visbiežāk salīdzina dažādos laika periodos veiktu klasifikāciju rezultātus vai arī veic vairāku datumu attēlu klasifikāciju, apvienojot tos vienā datu kopā. Vienkāršākais risinājums izmaiņu noteikšanai ir klasificēt dažādos datumos iegūtos attēlus, izmantojot *kNN* metodi un pēc klasifikācijas noformēt mežu teritorijas kā bināro masku. Binārās maskas salīdzina ar attēlu atņemšanu: maska jaunākajam datumam "mīnus" maska vecākajam datumam. Atņemšanas rezultātā iegūst trīs iespējamās pikseļu vērtības: (0) – nav izmaiņu, (1) – jaunākajā attēlā mežu teritorija ir konstatēta, bet vecākajā ne, tādēļ var secināt, ka ir notikusi mežu atjaunošanās, (–1) – vecākajā attēlā konstatēts mežs, bet jaunākajā ne, tādēļ var secināt, ka ir notikusi mežu teritoriju samazināšanās. Pikseļu analizē balstīto metožu lielākais trūkums ir rezultāti, kam raksturīgs "sāls un piparu" troksnis, jo pikseļi tiek analizēti katrs atsevišķi, neņemot vērā to apkārtnes vērtības.

Objektu analizē balstītās metodes vispirms lieto attēla segmentāciju jeb pikseļu sadalīšanu līdzīgas spektrālās informācijas un tekstūras apgabalos. Pēc tam reģionus klasificē zemes pārseguma klasēs. Veicot izmaiņu detektēšanu ar attēlu atņemšanas metodi, jāņem vērā, ka ģeometriskas nobīdes starp attēliem var uzrādīt nepatiesas izmaiņas. Pirms izmaiņu detektēšanas ir vēlams veikt attēlu ģeometriskās korekcijas, lai samazinātu šādu fiktīvu izmaiņu uzrādīšanos. Tāpat uzmanīgi jālieto dažādu sezonu attēli. Atšķirīgos gadalaikos atšķirības starp dažādiem zemes pārseguma tipiem var būt vairāk vai mazāk izteiktas. Piemēram, ziemas attēlos mežu teritorijas vairāk kontrastē ar lauksaimniecībā izmantotajām zemēm un pļavām nekā vasarā, kad lapu kokiem un citai zaļajai veģetācijai frekvenču joslu attēlu intensitātes vērtības ir līdzīgas.

Visefektīvāk iespējams konstatēt mežu teritoriju samazināšanos kailciršu rezultātā, jo tām attēlu intensitāšu izmaiņas ir visspēcīgākās. Turklāt šajā gadījumā efektīvi var izmantot satelītattēlus. Tie ir regulāri pieejami par plašām teritorijām, tādēļ iespējams iegūt atjauninātus datus daudz ātrāk un lētāk nekā ar aerofotogrāfiju un lauka mērījumiem.

Mežu atjaunošanās vai lauksaimniecības zemju aizaugšana satelītattēlos ir grūti konstatējama, jo koku vainagiem ir jāsasniedz noteikts blīvums, lai audzes spektrālā signatūra vairāk līdzinātos meža teritorijām. Tādēļ jāņem vērā, ka, novērojot mežu atjaunošanos klasifikācijas rezultātos, šis aizaugšanas process bija sācies jau pirms ilgāka laika.

Meža inventarizācijas parametru noteikšana atsevišķu koku vainagu līmenī

Šī metožu grupa ir balstīta uz atsevišķu koku automatizētu identifikāciju un/vai koka vainaga formas atdalīšanu. Pārsvarā visas koku identifikācijas metodes darbojas, pieņe-

mot, ka koka galotnei būs visaugstākā pikseļa vērtība tālīzpētes datos, bet apkārtējās vēr-
tības pakāpeniski kļūs mazākas. Multispektrālajos datos šis pieņēmums izriet no fakta, ka
koka vainaga galotne būs vislabāk apgaismota, salīdzinot ar citām vainaga daļām, līdz ar
to tā būs visgaišākā. Savukārt lidara virsmas modeļu gadījumā visnotaļ loģiski, ka koka
virsošne ir koka vainaga augstākā daļa. Termins “identifikācija” nozīmē koka virsošnes
koordinātu atrašanu, bet jēdzienu “atdalīšana” bieži lieto, lai aprakstītu koku vainagu kon-
tūru meklēšanu.

Biežāk lietotās metodes koku vainagu identifikācijai ir šādas:

- **šablonu salīdzināšanas metode.** Sīkāk tiks apskatīta darbplūsmas piemērā;
- **lokālo maksimumu metode.** Šīs metodes ietvaros attēlā tiek meklēti pelēko toņu
lokālie maksimumi, pieņemot, ka tie atbildīs koku virsošnēm.

Biežāk lietotās metodes koku vainagu kontūru atrašanai ir šādas:

- **ieleju sekošanas algoritmi.** Koku vainagu kontūras tiek zīmētas, sekojot “ielejām”,
kuras veido ēnas starp koku vainagiem;
- **reģionu audzēšanas algoritmi,** kas ir pretēja pieeja ieleju sekošanas algoritmiem.
Šajā gadījumā koka vainagam, sākot no viena punkta, pievieno līdzīgus pikseļus,
līdz koka vainaga forma ir pabeigta;
- **ūdensšķirtnes segmentācija** attēlu uzskata par 3D topogrāfiju, kurā tiek meklētas
t. s. ūdensšķirtnes līnijas. Reljefā par ūdensšķirtnes līnijām sauc tādus punktus, ku-
ros ūdens piliens varētu tecēt vairākos virzienos.

Koka vainagu līmenī informāciju par koku sugām var iegūt, veicot [90]:

- 1) tiešu klasifikāciju, kurā katrs koka vainags tiek uzskatīts par vienu novērojumu;
- 2) netiešu klasifikāciju, kur katrs pikselis koka vainagā tiek uzskatīts par vienu novēro-
jumu un vainaga koka suga tiek noteikta, apvienojot pikseļu klasifikācijas rezultātus
katra koka vainaga iekšienē.

Veicot tiešo klasifikāciju, koku sugas spektrālo deskriptoru kopu var papildināt arī ar
telpiskajiem deskriptoriem, tādiem kā formu, tekstūru un kontekstuālās sakarības, kā arī
iekļaut vides raksturlielumus, piemēram, reljefa augstumu, slīpumu un citus parametrus
[109], [119]. Attēla spektrālo vērtību raksturošanai izmanto filtrētas pikseļu intensitātes
vērtības un/vai pikseļu intensitāšu vidējo vērtību [112]. Īpaši svarīgi koku sugu klasifikā-
cijai ir tuvā infrasarkanā (*NIR*¹⁷) diapazonu mērījumu iekļaušana. Zviedrijā veiktajos pē-
tījumos, izmantojot lidara deskriptorus un *NIR* frekvenču joslas attēlus, kopējā precizitāte
koku sugu gadījumā pārsniedza 90 % [132].

Skaitliskie parametri, tādi kā koka augstums un vainaga diametrs, multispektrālo un
lidara datu kopīgās apstrādes gadījumā tiek nolasīti no lidara mērījumu datiem kā maksi-
mālais punkta augstums nDVM, savukārt vainaga diametrs tiek noteikts, izmantojot atse-
višķu koku vainagu segmentācijas rezultātus. Lidara dati piedāvā visprecīzāko risinājumu
koka augstuma noteikšanai, taču koku augstums nereti tiek novērtēts zemāks par patieso,
jo lāzera impulss visbiežāk netrāpa patiesajai koka virsošnei [82]. Lidara datu gadījumā
novērojama tendence, ka mazāko koku augstums tiek novērtēts augstāks par patieso, savu-
kārt lielāko koku augstums tiek novērtēts zemāks par patieso [82].

17 *NIR* – *Near InfraRed*.

4.3.4. Darbplūsmas piemērs

Meža inventarizācijas parametru noteikšana atsevišķu koku līmenī ir precīzāka nekā tad, ja tos mēģina novērtēt audzes vai pikseļa analīzes līmenī. Līdz ar to pirmais solis automatizētas meža inventarizācijas veikšanai ir atsevišķu koku identifikācija. Apskatīsim vienkāršu darbplūsmu, kurā izmantota šablonu salīdzināšanas metode.

Tālizpētes datu izvēle

Ieteicams izvēlēties pēc iespējas augstākas telpiskās izšķirtspējas datus. Ja attēlos būs redzamas pārāk sīkas detaļas, tad izšķirtspēju vienmēr iespējams samazināt. Vai izvēlēties multispektrālos vai lidara datus. Ja ir pieejami abi datu veidi līdzvērtīgā telpiskajā izšķirtspējā, tad to kopīga apstrāde var būt jūtami uzlabot precizitāti. Multispektrālie un lidara dati satur savstarpēji papildinošu informāciju. Lidara dati raksturo koku vainagu trīsdimensionālo struktūru, bet multispektrālajos datos redzama koku vainagu tonalitāte un apgaismojuma efekti. Viena datu veida gadījumā priekšroka dodama lidara datiem, jo apgaismojuma efekti multispektrālajos datos var apgrūtināt koku vainagu atšķiršanu, kā arī ir grūtāk noteikt koka virsotni. Turpmākajā darbplūsmā apskatīsim lidara datu izmantošanu (punktu datnē).

Tālizpētes datu pirmapstrāde

Pirmais solis ir lidara punktu datu pārveidošana attēlu formātā, lai tiem varētu lietot divdimensionālo šablonu salīdzināšanas metodi. 2.3. nodaļā aprakstīta digitālo virsmas un reljefa modeļu izveide. Atsevišķu koku atpazīšanai nepieciešams normalizētais digitālais virsmas modelis (nDVM). Apaļu objektu atpazīšanai teorētiski nepieciešami četri pikseļi, kas veido objektu [102]. Praksē jāreķinās, ka telpiskajai izšķirtspējai jābūt augstākai un objekts jāreprezentē lielākam pikseļu skaitam. Ja vēlamies atpazīt kokus, kuru vainaga diametrs ir apmēram trīs metri, tad telpiskajai izšķirtspējai jābūt vismaz 0,5 m/pikseli (skat. 2.2. nodaļu). Ar šādu izšķirtspēju arī jāveido digitālais virsmas modelis. Lidara datu apstrādei pieejami tādi bezmaksas risinājumi kā *FUSION* vai *QGIS* spraudņi.

Šablonu salīdzināšanas metode

Šablonu salīdzināšanas (ŠSM) metodes pamatideja (skat. 4-16. att.) ir attēlam “pārvietot pāri” šablonu pikseli pa pikselim un meklēt šablona novietojumus ar vislielāko sakritību starp šablonu un attēla apakšapgabalu [135]. ŠSM metodes rezultāts ir punktu saraksts, kas apraksta atsevišķu koku virsotņu potenciālās atrašanās vietas. ŠSM metodes veikspēja precizitātes un skaitļošanas laika ziņā ir atkarīga no veiksmīgas izmantoto šablonu izvēles.

Šablons ir parauga attēls, kas raksturo, kā koku vainags izskatās tālizpētes datos pie konkrētiem attēla ieguves apstākļiem un konkrētas koku sugas, koka vainaga izmēra un citiem nosacījumiem. Parasti viens šablons nespēj gana precīzi raksturot mežaudzi (ja vien tā nav viena vecuma plantācija), tādēļ izmanto šablonu kopas. Šablona mērķis ir modelēt koku vainagu izskatu konkrētos tālizpētes datos, tāpēc šablons lielākoties ir unikāli katram tālizpētes datu komplektam. Vienkāršākais šablonu kopas sagatavošanas veids ir atlasīt

koku vainagu šablonus manuāli (ar roku) no apstrādājamā attēla. Šablonu kopai vajadzētu ietvert biežāk sastopamās koku sugas un arī biežāk sastopamos koku vainagu izmērus. Tādējādi efektīvas šablonu kopas atrašana prasa iepriekšējas zināšanas par pētāmo teritoriju.

Sakritību jeb līdzību starp šablonu w un attēla reģionu f aprēķina, izmantojot normalizēto korelācijas koeficientu:

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_{s,t} [w(s, t) - \bar{w}] [f(x + s, y + t) - \bar{f}_{xy}]}{\sqrt{\sum_{s,t} [w(s, t) - \bar{w}]^2 \sum_{s,t} [f(x + s, y + t) - \bar{f}_{xy}]^2}} \quad (4.5.)$$

kur $\bar{w}$ – šablona pikseļu vidējā vērtība;

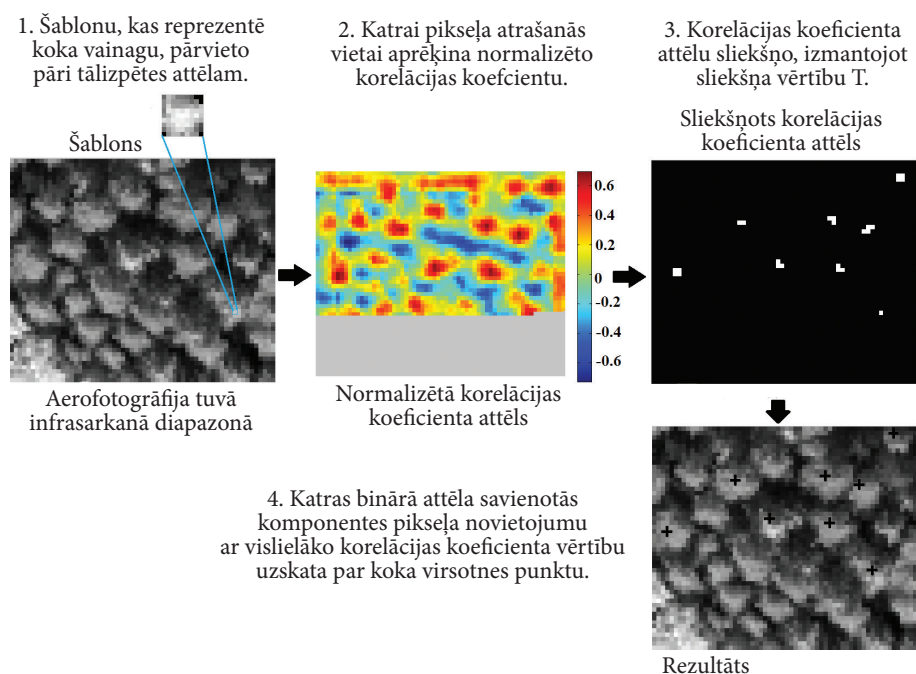
$\bar{f}_{xy}$ – attēla pikseļu vidējā vērtība reģionā, kas pārklājas ar šablonu w ;

s, t – summēšanas mainīgie, kas izvēlēti tā, lai attēls un šablons pārklātos.

Normalizētā korelācijas koeficienta vērtība var būt intervālā $[-1, 1]$ un augsta koeficienta vērtība piecina par labu atbilstību starp attēlu f un šablonu w , kas centrēts attēla f punktā ar koordinātēm (x, y) .

Šablonu salīdzināšanas metodi iespējams lietot arī vairāku slāņu attēliem. Tad normalizēto korelācijas koeficientu aprēķina katram attēla slānim ar katra šablona atbilstošo slāni un iegūtos korelācijas koeficientu attēlus savstarpēji saskaita un dala ar slāņu skaitu.

Nākamais solis ir korelācijas koeficienta attēla pārveidošana binārajā attēlā (sliekšņošana), lai atdalītu no pārējā attēla apgabalus ar vislabāko atbilstību, izmantojot empīriski noteiktu sliekšni T_γ . Sliekšnis T_γ ir vissvarīgākais TM metodes iekšējais parametrs, kas regulē līdzsvaru starp objektu izlaišanu (nepareizi noliedzoša algoritma atbilde) un gadījumu



4-16. att. Šablonu salīdzināšanas metodes vispārējā shēma.

miem, kad pārāk daudz citu objektu tiek atpazīti kā koki (nepareizi apstiprinoša algoritma atbilde). Zemāka sliekšņa vērtība pieļauj mazāk līdzīgu objektu atrašanu, taču rezultātā palielinās nepareizi apstiprinošo atbilžu skaits. Savukārt augsta sliekšņa vērtība var izraisīt augstas izlaišanas kļūdas (daudz koku vispār netiek identificēti).

Kad korelācijas koeficienta attēls ir pārveidots binārajā attēlā, tam veic savienoto komponentu¹⁸ identifikāciju, lai atdalītu atsevišķus priekšplāna objektus. Koka virsotnes koordinātas ir katras savienotās komponentes korelācijas koeficienta lokālā maksimuma atrašanās vietas koordinātas.

Ja izmanto vairākus šablonus, tad vienu un to pašu koku vainagu var identificēt ar vairākiem šabloniem. Tādējādi vienam koka vainagam metode atrod vairākus savstarpēji nedaudz nobīdītus virsotnes punktus. Šādi punkti tiek izslēgti, izvēloties vienu punktu un analizējot tā tuvāko apkārtni $D_{\min}$ pikseļu rādiusā. Ja apkārtņē atrodas vairāki potenciālās koka virsotnes punkti, tad rezultātu kopā atstāj tikai punktu ar visaugstāko korelācijas koeficientu, bet pārējos punktus izdzēš.

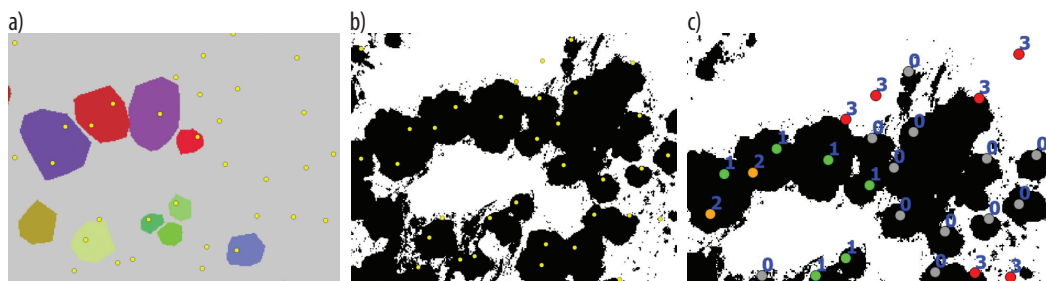
Precizitātes aprēķināšana

Datorizētās metodes koku vainagu identifikācijas rezultāts ir punktu kopa P , kas ietver koku atrašanās vietu koordinātas.

Metodes precizitātes novērtēšanai un kļūdu aprēķināšanai izmanto atbalsta datus:

- 1) atsevišķu koku vainagu daudzstūru karti. Atkarībā no datu pieejamības, iespējams izmantot lauka mērījumos noteiktas koku atrašanās vietas koordinātas vai arī daudzstūrus, kas sagatavoti, balstoties tikai uz vizuālo novērtējumu (piemēru skat. 4-17. (a) att.);
- 2) masku, kas norāda, kuros apgabalos noteikti neatrodas koku vainagi (piemēru skat. 4-17. (b) att.).

Izmantojot atbalsta datu kopu, kļūdas koku identifikācijā raksturo apstiprinājuma kļūda (nepareizi apstiprinošo atbilžu skaits) un identifikācijas kļūda (neidentificēto koku skaits).



4-17. att. (a) Ar punktiem apzīmēti koku identifikācijas metodes atrastie koku vainagi, daudzstūri apzīmē koku vainagu formu, kas noteikta lauka mērījumos vai pēc vizuāla novērtējuma; (b) baltā krāsā iezīmētas tās teritorijas, kurās nav koku vainagu; (c) katram punktam pievienots precizitātes novērtējuma kods: (0) – punktu neiekļauj precizitātes aprēķinos, (1) – punkts noteikts pareizi, (2) – punkts ir kļūdaini identificēts punkts, (3) – punkts atrodas teritorijā, kurā koku vainagu vispār nav.

¹⁸ Vairāk par savienotajām komponentēm un to izmantošanu skat. [23].

Identifikācijas kļūda raksturo, cik procenti no testa apgabalā esošajiem kokiem nav identificēti. Identifikācijas kļūdu parasti izsaka procentos, un tās teorētiskās robežas ir [0 %, 100 %], kur 0 % nozīmē, ka visi koki testa apgabalā ir atrasti pareizi, 100 % nozīmē, ka neviens koks testa apgabalā nav identificēts.

Identifikācijas kļūdu aprēķina šādi:

$$e_o = N_o / N_t \cdot 100 \quad (4.6.)$$

kur N_o – atbalsta daudzstūru skaits, kas neietver nevienu punktu no kopas P , t. i., neidentificēto koku skaits testa apgabalā;

N_t – kopējais koku skaits pētāmajā reģionā.

Apstiprinājuma kļūda raksturo, cik daudz citu objektu, kas nav koki, tiek atpazīti kā koki un cik gadījumos lielāki koku vainagi tiek identificēti kā vairāki koki. Zemākā apstiprinājuma kļūdas robeža ir 0 %, kas nozīmē, ka nav nepareizi apstiprinošu atbilžu, savukārt augšējā robeža teorētiski nav ierobežota, jo iespējama situācija, ka nepareizi identificēto objektu skaits ir lielāks par koku skaitu testa apgabalā.

Apstiprinājuma kļūdu aprēķina šādi:

$$e_c = N_c / N_t \cdot 100 \quad (4.7.)$$

kur N_c – punktu skaits kopā P , kas atrodas apgabalos bez koku vainagu noseģuma vai daudzstūros ar jau atrastu virsotnes punktu no P .

Precizitātes indekss apvieno apstiprinājuma un identifikācijas kļūdu:

$$AI(\%) = \frac{N_t - (N_c + N_o)}{N_t} \cdot 100 \quad (4.8.)$$

Ja precizitātes indekss diviem dažādiem pētījumiem ir vienāds, tad ir jāpievērš papildu uzmanība apstiprinājuma un izlaišanas kļūdām. No praktiskā viedokļa ieteicams izvēlēties gadījumu ar mazāko apstiprinājuma kļūdu. Metodes visbiežāk neidentificē maza izmēra kokus, kuru krājas vērtība ir relatīvi maza un būtiski neietekmē automatizētās meža inventarizācijas rezultātus. Savukārt augsta apstiprinājuma kļūda var sniegt nepatiesu krājas novērtējumu.

4.4. Pilsētvides tālīzpēte (27. lekcija)

4.4.1. Kopsavilkums

Pilsētvides analīze ir viens no sarežģītākajiem tālīzpētes uzdevumiem, jo salīdzinoši mazās teritorijās ir ievērojama objektu un materiālu dažādība. Pilsētvides izaicinājumu risināšanā tālīzpēte izmantojama tematisko karšu atjaunošanai un pārskatu sagatavošanai par kādu laika posmu. Darbplūsmas piemērā apskatīsim, kā iespējams atrast ēku kontūras, izmantojot multispektrālo aerofotogrāfiju un lidara datu kopīgu apstrādi.

4.4.2. Problēmas nozīmība

Pilsētās dzīvo vairāk nekā 75 % Eiropas Savienības iedzīvotāju [104]. Apdzīvojuma blīvums pilsētās ļauj izveidot daudzveidīgu un efektīvu infrastruktūru, taču rada arī daudz problēmu, kas saistītas gan ar sociāliem, gan ekonomiskiem, gan apkārtējās vides piesārņojuma faktoriem. Pilsētvide būtiski ietekmē globālo klimatu resursu pārtēriņa un vides izmaiņu dēļ. Daži no šādiem faktoriem, kas negatīvi ietekmē apkārtējo vidi un ir efektīvi novērojami, izmantojot tālīzpētes datus, ir mākslīgais segums un zema blīvuma apdzīvoto vietu izplešanās. Mākslīgais segums ierobežo ūdens noteces iespējas, radot gan plūdus, gan sausumu, kā arī apdraudot bioloģisko daudzveidību pilsētā un izmainot lokālo klimatu. Savukārt zema blīvuma apdzīvotajām vietām raksturīgs dabas resursu pārtēriņš un privāto automašīnu intensīva izmantošana.

Tālīzpētes dati var sniegt informāciju:

- pilsētvides kartēšanai dažādos mērogos;
- pārskatu izveidei;
- dažādu pārmaiņu scenāriju modelēšanai.

4.4.3. Pilsētvides kartēšana

Vispirms apskatīsim pilsētvides kartēšanas uzdevumus. Globālā mērogā satelīti ļauj novērot pilsētu teritoriju izmaiņu tendences. Saskaņā ar UNESCO datiem pilsētu iedzīvotāju skaits katru gadu pieaug par 60 miljoniem cilvēku, un tiek prognozēta megapilsētu (vairāk nekā 10 milj. iedzīvotāju) skaita palielināšanās. Urbanizācijas monitoringā īpašu vietu ieņem diennakts tumšajā laikā iegūtu attēlu izpēte. Apgaismojuma intensitātes kvantitatīvā analīze ļauj identificēt pilsētas reģionus, ko vieno noteikts ekonomiskās aktivitātes līmenis. 4-18. att. redzamas apgaismojuma izmaiņas dažās no Ķīnas metropolēm kopš 1992. gada [122]. Apgaismojuma intensitātes pieaugums uzrāda urbanizācijas skartās teritorijas, kā arī raksturo izmaiņu tempu.

Ja pilsētu teritorijas vēlamies kartēt, izmantojot vidējas telpiskās izšķirtspējas multispektrālos datus, tad klasifikācija atsevišķu pikseļu līmenī var nebūt pietiekama, jo atsevišķu pikseļu signatūras ir ļoti līdzīgas citu zemes pārseguma tipu signatūrām. Kvalitatīvai apdzīvoto teritoriju noteikšanai jāpievieno arī tekstūras analīze. Tekstūra raksturo pikseļu

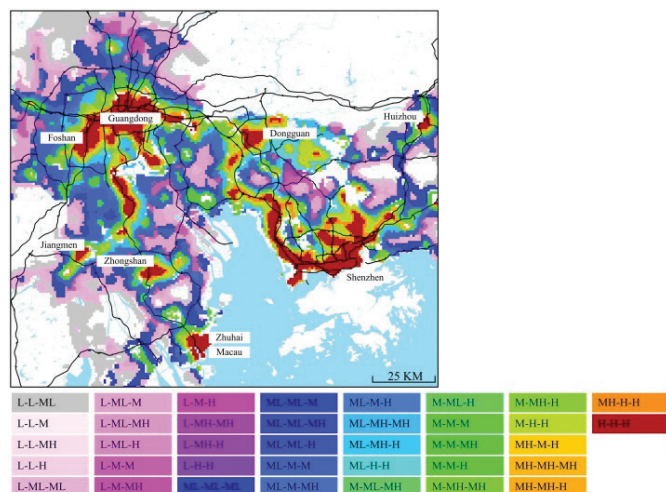
intensitāšu telpiskās sakarības. Ja kādā attēla reģionā pikseļu intensitātes ir līdzīgas, tad šādu tekstūru varam raksturot kā gludu. Ja specifisku dažādu pikseļu intensitāšu izvietojumu varam novērot nelielā pikseļa apkārtnē attēla reģionā, tad attēla reģionam ir izteikta mikrotekstūra. Vidējas telpiskās izšķirtspējas satelītattēlos apdzīvoto vidi varam novērot apgabalos ar vizuāli trokšņainu mikrotekstūru. Savukārt, ja specifisku rakstu varam novērot pikseļa lielā apkārtnē, tad tas ir attiecināms uz makrotekstūru. Piemēram, augstas telpiskās izšķirtspējas aerofotogrāfijās koku vainagi mežā veido makrotekstūru.

Viens no veidiem, kā pievienot klasifikācijas procesam tekstūras informāciju, ir izveidot pazīmju attēlus, kuros ir tekstūras deskriptoru vērtības katram pikselim (jāņem vērā, ka tekstūras deskriptorus rēķina, izmantojot pikseļa apkārtnes intensitāšu vērtības), un pievienot šos attēlus multispektrālajam joslām mašīnmācīšanās procesā.

Noderīgi tekstūru deskriptoru attēli ir entropijas un standartnovirzes filtrācijas rezultāti. Telpiskās filtrācijas pamati šajā grāmatā jau ir apskatīti. Entropijas un standartnovirzes filtrācija darbojas ļoti līdzīgi nelineārajai telpiskajai filtrācijai: apskatām pikseļa apkārtni un pārveidotajā attēlā apskatītā pikseļa atrašanās vietā ievieojam pikseļa apkārtnes intensitāšu vērtību standartnovirzi vai dispersiju. Raupjākām tekstūrām būs raksturīgas augstākas standartnovirzes un dispersijas vērtības, bet gludām tekstūrām – zemākas.

Šādam mērķim var kalpot arī Sobela un Laplasa maskas [23] vai citi malu detektori [23]. Tādu filtru, kas izteikti reaģē uz malām attēlā, galvenais trūkums ir izteikta trokšņainība, un ar tiem grūti noteikt atšķirības starp pilsētu teritoriju izteikto tekstūru un jebkurām citām malām attēlā. Šī problēma tiek veiksmīgi risināta ar konvolūcijas neironu tīkliem, kas spēj noteikt noderīgus tekstūras parametrus gan mikrotekstūras, gan makrotekstūras līmeņos, balstoties apmācības datos.

Vēl citi pikseļa apkārtnē aprēķināmi deskriptori ir no pelēko toņu sakritības matricas atvasināti deskriptori. Pelēko toņu sakritību matrica parāda, vai eksistē sakarības intensitāšu vērtībās starp pikseļiem noteiktā telpiskā novietojumā. Matricas konstruēšanu apskatīsim 4-19. att. redzamajā piemērā. Attēla fragmentā iespējamas tikai trīs intensitāšu vērti-



4-18. att. Apgaismojuma intensitātes izmaiņas Guangdong provincē Ķīnā 1992.–2002. gadā un 2002.–2012. gadā [122]. L – zems apgaismojuma līmenis, ML – vidēji zems, M – vidējs, MH – vidēji augsts, H – augsts.

bas: $L = \{1, 2, 3\}$. Līdz ar to pelēko toņu sakritību matricai būs trīs rindiņas un trīs kolonnas. Ja attēlā ir vairāk intensitāšu, piemēram, 256, tad bieži to skaitu samazina, lai pelēko toņu matricas izmērs būtu mazāks un tā būtu vieglāk interpretējama.

Nākamais solis ir telpisko sakarību definēšana starp diviem pikseļiem p un g , kuru intensitāšu sakarības vēlamies pētīt. Šajā piemērā nosakām, ka pikselis g atrodas pa labi no pikseļa p .

Apskatām visas intensitāšu vērtību kombinācijas, kas var veidot pelēko toņu sakritību matricas virsraksta rindiņa un kolonna (iekrāsotas pelēkā krāsā) un saskaitām, cik daudz šādu kombināciju ir testa attēlā. Pirmajā matricas elementā ievietojam (1,1) kombināciju kopskaitu, pirmās rindiņas otrās kolonnas elementā ievietojam (1,2) kombināciju kopskaitu un tā tālāk.

Attēla tekstūras izpratnei var analizēt pašu pelēko toņu sakritību matricu (ja vērtības koncentrējas ap matricas diagonāli, tad tekstūra ir ļoti viendabīga, pretējā gadījumā attēlam novērojama smalka tekstūra ar augstu kontrastu) vai lietot no tās atvasinātus deskriptorus. Parasti arī pelēko toņu sakritību matricu rēķina pikseļa apkārtnē, līdzīgi kā standartnovirzes filtra gadījumā.

Divi pelēko toņu sakritību matricas deskriptori ir (piemērus skat. 4-20. att.):

- kontrasts – parāda intensitāšu kontrastu starp pikseļiem p un g apskatītajā apgabalā;
- homogenitāte – raksturo pelēko toņu matricas elementu telpisko novietojumu ap matricas diagonāli.

Apdzīvoto teritoriju atpazīšanai var izmantot arī radara datus. Pilsētu teritorijām raksturīga augsta un laikā stabila radara starojuma refleksija, ko var izmantot, lai tās atšķirtu no citiem zemes pārseguma veidiem. Radara datus ir novērojams izteikts troksnis, taču tiem ir augstāka temporālā izšķirtspēja (atgādinām, ka radara tehnoloģiju atmosfēras apstākļi ietekmē maz), tādēļ var izmantot dažādu datumu attēlus trokšņa samazināšanai.

1	1	1	2
2	3	1	2
2	2	2	3
1	2	1	2

g

		p		
		1	2	3
1	2	1	1	
2	4	2	0	
3	0	2	0	

4-19. att. Pa kreisi: attēla fragments. Pa labi: pelēko toņu sakritību matrica šim attēla fragmentam.



4-20. att. (a) Sarkanā starojuma aerofotogrāfijas fragments, (b) pelēko toņu sakritību matricas homogenitāte, (c) pelēko toņu sakritību matricas kontrasts.

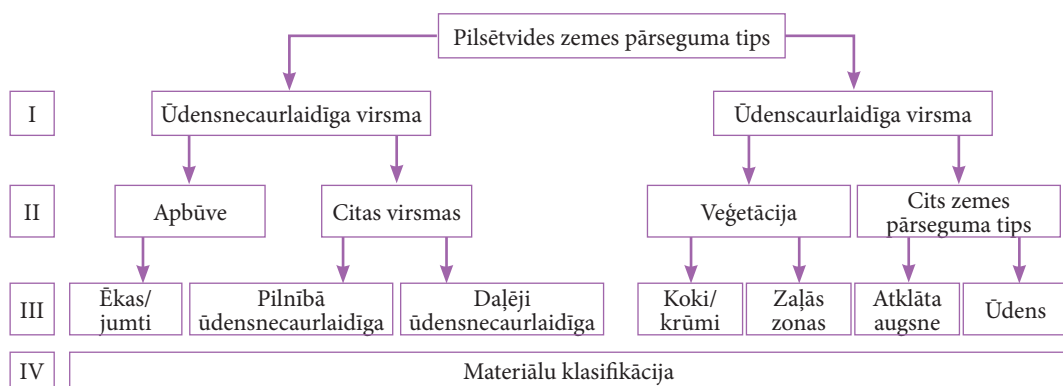
Augstas telpiskās izšķirtspējas dati ļauj kartēt pilsētvidi jau atsevišķu objektu līmenī. No datorizēto metožu viedokļa, jo vienkāršākas un savstarpēji atšķirīgākas ir materiālu un objektu pazīmes tālīzpētes datos, jo vieglāk uzdevums ir atrisināms un iespējams sasniegt augstāku precizitāti. Pilsētvide ir izaicinājums, jo salīdzinoši nelielā teritorijā var novērot lielu objektu un materiālu dažādību. Taču, par spīti grūtībām, pilsētvidei iespējams izveidot daudz dažādu datu slāņu.

Viens no pamatproduktiem ir zemes pārseguma/lietojuma kartes. Pilsētvides zemes pārsegumu iespējams klasificēt dažādos līmeņos, kā redzams 4-21. att.

Pirmā līmeņa pilsētvides klasifikāciju ūdenscaurlaidīgos un ūdensnecaurlaidīgos apgabalos var veikt, izmantojot pat vidējas telpiskās izšķirtspējas datus (10–30 metri uz pikseli). Ūdensnecaurlaidīgās virsmas pilsētā ietver ielu, ceļu, ietvju, autostāvvietu pārsegumus, kā arī ēku jumtus. Ūdensnecaurlaidīgo virsmu noseģuma kvantitāte un telpiskais izvietojums ir cieši saistīts ar ūdens noteci, kā arī lokālo klimatu pilsētā. Augsts ūdensnecaurlaidīgo virsmu noseģums palielina applūšanas risku spēcīgās lietusgāzēs, kā arī ievērojami paaugstina lokālo gaisa temperatūru pilsētā.

Pirmā līmeņa pilsētvides klasifikācijai izmanto uz pikseļu analīzi balstītas klasifikācijas metodes, kā arī attēlu apstrādi, lietojot spektrālo analīzi vai citas nestingrās klasifikācijas metodes. Var izmantot inverso korelāciju starp zaļās veģetācijas un ūdensnecaurlaidīgo virsmu noseģumu. Piemēram, var aprēķināt regresijas sakarības starp zaļās veģetācijas un ūdensnecaurlaidīgo virsmu noseģumu vai vienkāršoti pieņemt, ka ūdensnecaurlaidīgo virsmu noseģums ir aprēķināms kā starpība starp visu attēlu un zaļās veģetācijas noseģumu. Izmantojot šādu metodoloģiju, uzmanība jāpievērš attēla ieguves sezonai, kas var radīt ievērojamas neprecizitātes ūdensnecaurlaidīgo virsmu novērtējumā. Zaļās veģetācijas aktīvajā sezonā novērtējums būs augstāks nekā patiesībā, savukārt neaktīvajā periodā tas būs zemāks [149].

Otrā un trešā līmeņa klasifikāciju efektīvi ir iespējams veikt, izmantojot tikai augstas telpiskās izšķirtspējas datus, un visaugstāko precizitāti iespējams sasniegt, kopīgi apstrādājot gan multispektrālos, gan lidara datus. Šajā gadījumā attēla satura analīze, apskatot atsevišķus pikselus, vairs nav efektīva, un attēla interpretācija jāveic, balstoties uz objektiem attēlā. Objektu iespējams atdalīt ar 1) konvolūcijas neironu tīkliem un semantiskās segmentācijas (skat. 3.5.8. sadaļu) algoritmiem vai 2) objektu orientētās klasifikācijas metodēm (skat. 3.4.9. sadaļu).



4-21. att. Dažādu līmeņu zemes pārseguma klasifikācija pilsētvides izpētē [101].

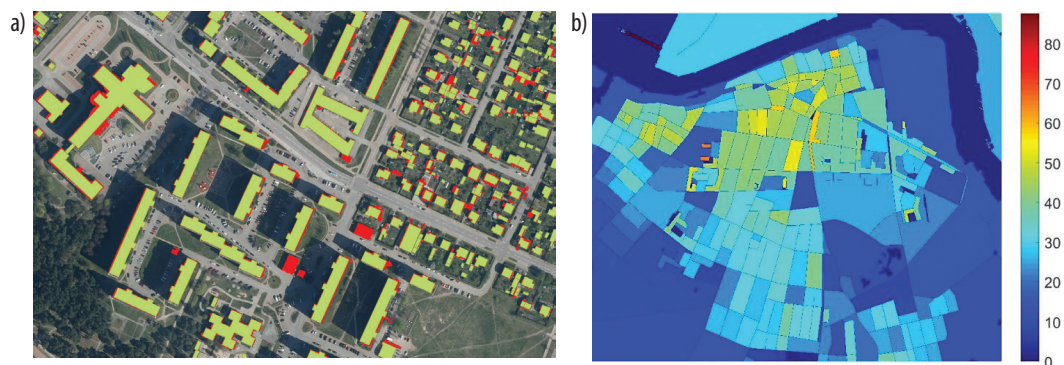
Attēlu segmentācijas metožu mērķis ir sadalīt attēlu līdzīgas spektrālās informācijas un tekstūras reģionos, tā veicot pāreju no atsevišķa pikseļa uz attēla apgabalu kā klasificējamo vienību. Segmentācijas metodes ir balstītas vai nu uz apgabalu t. s. ārējiem un iekšējiem deskriptoriem, vai šo abu konceptu apvienošanu. Apgabala ārējie deskriptori attiecas uz objektu robežām un malām. Piemēram, ēku un ceļu malām aerofotogrāfijās raksturīgas izteikti taisnas līnijas, ko var izmantot attēla segmentācijā. Savukārt apgabalu iekšējie deskriptori attiecas uz pikseļu intensitāšu vērtībām, kas veido apgabalu, un tie var raksturot gan objektu krāsu, gan tekstūru.

Izmantojot apgabalu kā klasificējamo vienību pikseļu vietā, paveras iespējas izmantot vairāk deskriptoru un klasificēt attēla pikseļus kontekstā ar to apkārtnēm. Segmentācijas metožu trūkumi galvenokārt saistīti ar pikseļu līdzīguma definēšanu un mēroga jautājumiem. Daudzas populāras segmentācijas metodes, tādas kā *SLIC* un *Jseg*, izmanto segmentācijas mēroga parametrus, kas var būt problemātiski apstākļos, kad attēlā jāatdala dažādu izmēru objekti. Pārāk lieli attēla apgabali ierobežos iespējas identificēt un atdalīt relatīvi mazus objektus, piemēram, automašīnas, savukārt pārāk sīki apgabali ierobežos deskriptoru reprezentativitāti, t. i., to izvēles pamatotību.

Segmentēto apgabalu zemes pārseguma klases iespējams atpazīt ar jebkuru klasifikācijas algoritmu. Pirms klasifikācijas algoritma lietošanas ir būtiski pārbaudīt, vai algoritms bez papildu apstrādes spēj izmantot deskriptorus, kuru vērtības ir atšķirīgos vērtību diapazonos. Piemēram, jau iepriekš apskatītajai k tuvāko kaimiņu metodei nepieciešama deskriptoru vērtību standartizācija.

Viens no efektīvākajiem apgabalu klasifikācijas algoritmiem, neskaitot mākslīgos neironu tīklus, ir *RF* algoritms (saīsinājumā no angļu valodas *Random Forest*). *RF* algoritms kā pamatvienību izmanto klasifikācijas kokus.

Klasifikācijas koki ir mašīnmācīšanās metode, kas konstruē strukturētu modeli no parauga (atbalsta) datiem. Klasifikācijas koka konstruēšanas rezultātā tiek noteiktas deskriptoru pārbaudes virknes, kas ļauj paredzēt datu punkta piederību klasificējamām klasēm. Klasifikācijas koka mezglos notiek deskriptoru vērtību pārbaudes, savukārt koka lapās atrodas deskriptoru pārbaudes rezultāts jeb atbilde uz jautājumu: kurai klasei pieder klasificētais datu punkts. Klasifikācijas kokus konstruē, rekursīvi dalot parauga datu kopu apakškopās, balstoties uz deskriptoru vērtību testiem. Sadalīšanu apakškopās pārtrauc, ja



4-22. att. (a) *OpenStreetMap* ēku poligoni iekrāsoti baltā krāsā, aerofotogrāfijas klasifikācijas rezultāts – melnā. (b) Ēku procentuāli nosegtās teritorijas Ventspilī, Ventas kreisajā krastā.

apakškopai piederošie datu punkti pieder vienai un tai pašai klasei un tālāka tās dalīšana tādējādi nav lietderīga [121].

RF apvieno vairākus klasifikācijas kokus un attēla apgabalam piešķir to klasi, kādu atpazīst vairākums klasifikācijas koku.

Ja ir jākartē konkrēti objekti, tad ieteicams izvēlēties tieši kartējamiem objektiem pielāgotas metodes vispārīgas zemes pārseguma klasifikācijas darbplūsmas vietā. Šajā nodaļā kā detalizēts piemērs tiks apskatīta ēku noteikšana. 4-22. att. redzami piemēri ēku klasifikācijas rezultātu izmantošanai, lai pētāmajā teritorijā noteiktu neregistrētas ēkas un aprēķinātu ēku noseguma daļu.

Ceturtā līmeņa klasifikācijas veikšanai īpaši nozīmīga ir datu spektrālā izšķirtspēja. Visefektīvākā ir hiperspektrālo datu izmantošana, taču tā ir saistīta ar ievērojamām datu ieguves izmaksām, kā arī datu apstrādē jārēķinās ar augstu datu dimensionalitāti.

4.4.4. Termālo attēlu izmantošana

Pilsētvides izpētē iespējams izmantot arī termālajā diapazonā iegūtus attēlus. Termālos attēlus bieži lieto, lai pētītu:

- Zemes virsmas temperatūras sadalījumu un tā saistību ar citiem apkārtējās vides parametriem, piemēram, zemes pārsegumu;
- pilsētu siltumsalas;
- siltuma zudumus no siltumtrasēm, ēku jumtiem un citiem objektiem.

Zemes virsmas temperatūras telpiskais sadalījums ir tieši saistīts ar zemes pārsegumu, proti, zaļās veģetācijas, asfalta un citu materiālu nosegumu, ielu un ēku ģeometriju, satiksmes intensitāti un citām cilvēku aktivitātēm. Šī temperatūra ietekmē gaisa slāņa temperatūru zemākajā atmosfēras slānī, respektīvi, lokālo klimatu. Daudzos pētījumos parādīta inversa korelācija starp veģetācijas indeksiem, kas reprezentē zaļās veģetācijas klātbūtni un zemes virsmas temperatūru. Jo vairāk zaļās veģetācijas pilsētā, jo mazāk uzkarst zemākais atmosfēras slānis tādu pārseguma materiālu ietekmē kā asfalts vai metāls.

Veicot pārrēķinu no pikseļu intensitātes vērtībām uz konkrētām temperatūras vērtībām, jāatceras, ka satelīta sensors nomēra spožumu virs atmosfēras, līdz ar to šīs vērtības ietekmē ne tikai no Zemes virsmas izstarotais starojums, bet arī Saules starojums, kā arī atmosfēras absorbcija un izkliede.

Bieži nav pieejama informācija par atmosfēras parametriem attēla ieguves brīdī, tādēļ pārrēķinu uz temperatūras vērtībām veic vienkāršoti, pieņemot, ka temperatūras vērtības var ietekmēt arī citi faktori un ka tās nav viennozīmīgi interpretējamas.

“LANDSAT 8” satelīta instruments TIRS ļauj iegūt termālos datus ar 60 m/pikseļi telpisko izšķirtspēju. Lai aprēķinātu temperatūras T vērtības Celsija grādos, vispirms pikseļa intensitātes vērtības f no pelēko toņu skalas ir jāpārveido uz spožuma vērtībām B ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$):

$$B = R_m \cdot f + R_a \quad (4.9.)$$

kur R_m ir kalibrācijas pastiprinājuma koeficients, R_a ir kalibrācijas nobīdes koeficients.

Abi koeficienti ir atrodamī gan satelītattēlu metadatos, gan LANDSAT lietotāja rokasgrāmatā.

Temperatūru var aprēķināt, izmantojot izteiksmi:

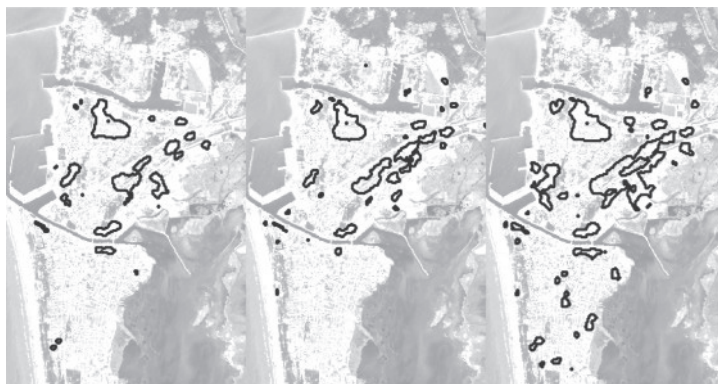
$$T = \frac{K_2}{\ln(K_1 / B + 1)} - 273 \quad (4.10.)$$

kur K_1 un K_2 ir kalibrācijas konstantes (*LANDSAT 8 TIRS* 10. frekvenču joslai $K_1 = 774,89 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, $K_2 = 1321,08 \text{ K}$).

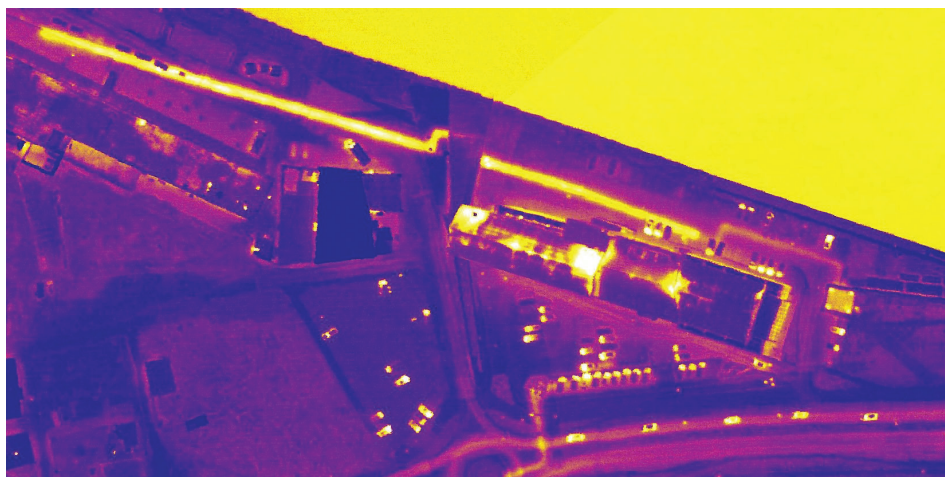
Plašs pētījuma lauks ir pilsētu siltumsalu izpēte. Siltumsala ir teritorija, kurā virsmas temperatūra ir augstāka nekā pārējā apkārtnē. Pilsētu veidotās siltumsalas ietekmē lokālo klimatu, piemēram, gaisa temperatūra ziemā un vasarā tajās ir augstāka. Termālie attēli ļauj noteikt pilsētu veidoto siltumsalu formu un to termālo intensitāti. Viens no veidiem siltumsalu atdalīšanai no pārējiem attēla reģioniem ir vienkāršota sliekšņošana:

$$B_{HI} = T > (\text{mean}(T) + \text{std}(T)) \quad (4.11.)$$

kur $\text{mean}(T)$ un $\text{std}(T)$ ir vidējā temperatūra un temperatūras standartnovirze pilsētas teritorijai atbilstošajam attēla apgabalam. Pirms sliekšņvērtības aprēķina ir būtiski izņemt no attēla ūdenim atbilstošās vērtības.



4-23. att. Siltumsalas Liepājā, kas aprēķinātas, izmantojot *LANDSAT 8 TIRS* attēlus, iezīmētas ar melnu robežu virs *LANDSAT* panhromatiskā satelītattēla [99]. Pirmais siltumsalu attēls iegūts vasarā, otrais – ziemā, trešais – pavasarī.



4-24. att. Termālā aerofotogrāfija. Gaišāka krāsa atbilst siltākai teritorijai, tumšāka – vēsākai.

4-23. att. redzams, ka satelītattēlos reģistrētā virsmas temperatūras sadalījumā nevar konstatēt apkures sezonas darbību. Siltumsalu atrašanās vietas Liepājā ir izteikti atkarīgas no zaļās veģetācijas un mākslīgā pārseguma sadalījuma.

Apkures sistēmu darbību var novērot termālajās aerofotogrāfijās, kas iegūtas, izmantojot lidmašīnas vai bezpilota lidaparātus.

Ēku apsilde ir būtiska pilsētas enerģijas patēriņa un siltumnīcefekta gāzu emisiju sastāvdaļa. Mūsdienu tehnoloģijas palīdz samazināt enerģijas patēriņu apkurei gan jaunajiem projektiem, gan jau esošajām ēkām, piemēram, privātmājām ir iespējams samazināt enerģijas patēriņu par 50–75 %, bet daudzdzīvokļu mājām – pat par 80–90 %.

4-24. att. redzamā aina iegūta ziemā, apkures sezonas darbības laikā. Plašā teritorija ar vienmērīgu un relatīvi augstu virsmas temperatūru atbilst neaizsalušam Liepājas kanālam. Gandrīz paralēli kanālam novērojama siltumtrase.

4.4.5. Lidara datu izmantošana

Lidara dati dod iespēju izveidot pilsētas trīsdimensiju modeli, kas lietojams arī citu informācijas produktu izstrādē. 3D modeļa kvalitāti telpiskās izšķirtspējas nozīmē nosaka mērījumu punktu blīvums. Augstas detalizētības 3D modeļus iespējams iegūt arī ar drona palīdzību, taču valsts mērogā šāds risinājums var nebūt finansiāli efektīvs, tādēļ ir aktuāli izmantot vispārēja lietojuma lidara datus dažādu produktu izveidei.

Situāciju modelēšanai var izmantot digitālo augstuma modeli, taču augstākas kvalitātes 3D modeļa izveidē ir jālieto rekonstrukcijas metodes. Rekonstrukcija šajā gadījumā nozīmē papildu informācijas par rekonstruējamo objektu iekļaušanu punktu mākoņa apstrādē, lai nodrošinātu labāku modeļa atbilstību reālajam objektam.

Šādas trīsdimensiju ainas ļauj modelēt dažādus procesus, kas ietekmē dzīves kvalitāti pilsētvidē, piemēram:

- noēnojumu un saņemtā saules starojuma intensitāti konkrētā punktā dažādos dienaksts un gada laikos;
- trokšņu ietekmi;
- gaisa piesārņojuma izplatību;
- potenciālu teritoriju applūšanu spēcīgu lietusgāžu laikā utt.

Savukārt ēku forma un augstums netiešā veidā ļauj novērtēt aptuveno iedzīvotāju skaitu, kas dzīvo pilsētā vai ko spēj uzņemt pilsēta pie pašreizējās apbūves. Vienkāršota metodoloģija ir noteikt ēkas tipu (vienas ģimenes, daudzdzīvokļu ēka) un reizināt katru ēkas tipu ar tam atbilstošo vidējo ģimenes lielumu. Ir iespējams novērtēt arī tādus dzīves kvalitātes rādītājus kā māju lielums, apbūves blīvums, veģetācijas kvalitāte, atvērto platību lielums u. tml.

4.4.6. Darbplūsmas piemērs

Apskatisim darbplūsmu māju jumtu kontūru atrašanai. Uzdevuma komplikētību nosaka gan apbūves sarežģītība apgabalā, ko vēlamies kartēt, gan tālīzpētes datu raksturlielumi, galvenokārt telpiskā izšķirtspēja.

Tālizpētes datu izvēle un pirmapstrāde

Ēku veiksmīgai atrašanai īpaši efektīva ir multispektrālo un lidara datu kopīga apstrāde. Šajā darblūsmā izmantosim krāsu infrasarkanās ortofotokartes (telpiskā izšķirtspēja 0,25 m/pikseli) un lidara datus (punktu blīvums aptuveni 7 punkti/m²). Pirmsapstrādes ietvaros ir jāveic zemes reljefa punktu filtrācija un pārējo punktu normalizācija, atņemot katra punkta augstuma vērtībai reljefa augstumu virs jūras līmeņa. Ir jāpārliciecinās, ka ortofotokartei un lidara modeļiem ir pietiekami laba ģeometriskā savietojamība. Ja starp datu kopām būs ievērojamas nobīdes, tad algoritmā ir jāiestrādā papildu soļi nobīžu novēršanai. Turpmāk aplūkotā darblūsma būs piemērota gadījumiem, kad krāsu infrasarkanās ortofotokartes ir iegūtas vasaras sezonā un koku vainagi no ēkām ir labi atšķirami tālizpētes datos.

Ēku klasifikācija

Šī soļa mērķis ir noteikt, kuri ortofotogrāfijas pikseļi un kuri lidara mērījumu punkti atbilst ēkām un kuri – citam zemes pārsegumam. Ja attēli ir iegūti vasarā, tad var lietot vienkāršu loģiku: ēku kā zemes pārseguma tipu raksturo augstums virs zemes virsmas, ko var noteikt, analizējot normalizēto lidara punktu L_n z koordinātas vērtību (z_{L_n}), un zema hlorofila aktivitāte, ko var noteikt krāsu infrasarkanajā aerofoto. Hlorofila aktivitāti var noteikt, aprēķinot normalizētās starpības veģetācijas indeksu NDVI. Iepriekš izklāstīto domu gaitu var izteikt ar loģisko operāciju palīdzību:

$$B = NDVI_{L_n} < T_{NDVI} \quad \text{AND} \quad z_{L_n} > T_z \quad (4.12.)$$

kur T_z ir sliekšņa vērtība, kas nosaka ēkas minimālo iespējamo augstumu, piemēram, trīs metri.

$NDVI_{L_n}$ – lidara mērījumu punktam atbilstošā NDVI vērtība.

T_{NDVI} ir t. s. hlorofila aktivitātes sliekšnis.

Vispārējā gadījumā materiāliem, kuriem nav raksturīga hlorofila klātbūtne, NDVI vērtība ir tuvu nullei, taču praksē sliekšņa vērtība ir jānosaka eksperimentāli, vizuāli novērtējot rezultātus.

Sarežģītākos gadījumos var izmantot vēl citus lidara punktu deskriptorus. Piemēram, daži noderīgi deskriptori ir:

- kaimiņu punktu skaits, kas atrodas punkta L apkārtnē ar diametru d un kam ir līdzīga z koordinātes vērtība. Jumtu plakni noteikti veido vairāki punkti, tāpēc punkti, kuru apkārtnē atrodas ļoti maz līdzīga augstuma kaimiņu, visticamāk, atbilst troksnim, gaisa pārvades līnijām vai ielu apgaismojumam;
- z koordinātes dispersija punkta L apkārtnē ar diametru d . Koku vainagi atstaro lidara signālu dažādos augstuma līmeņos atkarībā no koku vainaga struktūras, taču ēku jumtu atstarojums sagaidāms ar daudz mazāku z koordinātes variāciju nelielā apkārtnē;
- punkta L attālums no kādas vidējās plaknes, kas aprēķināta, izmantojot L apkārtnes punktus. Ēku jumtu punktiem sagaidāma aptuvena atrašanās uz vienas vidējās plaknes, bet koku vainagu gadījumā punktu izvietojumam šādas sakarības nav novērojamas.

Pēc ēkām piederošo punktu atrašanās tos iespējams parādīt binārajā attēlā un izveidot masku, kā redzams 4-25. att. Binārā attēla priekšplāna objektiem var atrast savienotās komponentes (skat. [23]), un izslēgt tās, kuru izmērs ir pārāk mazs, lai tās varētu atbilst ēkām.

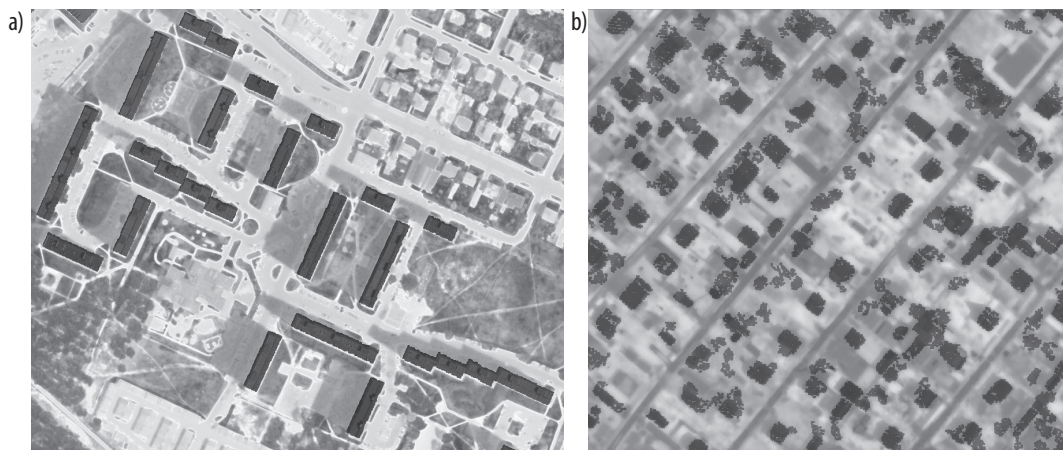
Ēku kontūru atrašana

Pēc klasifikācijas uzdevuma veikšanas ir zināmas potenciālo ēku atrašanās vietas, taču binārajā maskā ēku kontūras ir ļoti trokšņainas un iespējams, ka klasifikācijas neprecizitāšu dēļ ēku kartei pievienoti arī citi objekti. Citu objektu filtrācijai nepieciešamas sarežģītākas metodes, bet, ja binārajā maskā ēku kontūras jau ir gana labi izteiktas, tad var ar daudzstūru aproksimācijas metodēm iegūt kvalitatīvu ēkas kontūru. Daudzstūru aproksimācijas metodēs var arī iestrādāt nosacījumus, ka leņķiem ēku stūros jābūt taisniem.

Šajā piemērā apskatīsim daudzstūru aproksimāciju, izmantojot t. s. apvienošanas tehniku un robežu sekošanas algoritmu. Ēku kontūru meklēšanas rezultāts ir elektroniskā karte, un algoritma uzdevums ir atrast ēku jumtu daudzstūru stūru koordinātas, ko pēc tam var ierakstīt elektroniskās kartes datnē.

Metodes pamatideja ir secīgi atlasīt katras savienotās komponentes robežu veidojošos pikseļus, vienlaikus mēģinot to aprakstīt ar taisnām līnijām.

1. Algoritma izpildi sākam, iestatot savienotās komponentes augšējo kreiso pikseli kā sākuma punktu w_0 un $w = w_0$. Fona pikseli, kas ir w_0 kaimiņš virzienā pa kreisi, apzīmējam ar b . Iestatām līnijas numuru $l = 1$. Saglabājam w koordinātas datu struktūrā, kas uzglabā visu robežas pikseļu koordinātas, un piešķiram līnijas numuru l .
2. Analizējam pikseļa w astoņus kaimiņus pulksteņrādītāja kustības virzienā, sākot no b . Tikko šajā secībā $n_1, n_2, \dots, n_8$ atrodam pikseli n_k , kas pieder savienotajai komponentei, saglabājam n_k koordinātas datu struktūrā, kas uzglabā visu robežas pikseļu koordinātas. Iestatām $w = n_k$ un $b = n_{k-1}$, kur b ir iepriekšējais pikselis secībā. Piešķiram līnijas numuru l .
3. Visus punktus, kam ir piešķirts līnijas numurs l , mēģinām aprakstīt ar taisnu līniju,



4-25. att. Atrastās ēkas iekrāsotas melnā krāsā.

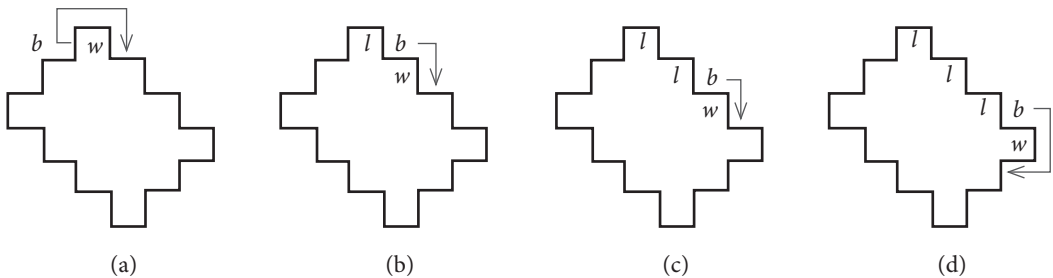
lietojot mazāko kvadrātu metodi. Mazāko kvadrātu metode šajā gadījumā nosaka pirmās kārtas polinoma koeficientus p_1 un p_2 : $y = p_1 \cdot x + p_2$.

4. Aprēķinām, kāds ir lielākais atlasīto robežas pikseļu attālums līdz līnijai $y = p_1 \cdot x + p_2$. Ja šis attālums nepārsniedz sliekšni T_{dist} , tad saglabājam p_1 un p_2 kā līnijas l parametrus un turpinām ar nākamo algoritma soli. Ja attālums pārsniedz sliekšni T_{dist} , tad konkrētajam pikselim w piešķiram līnijas numuru $l = l + 1$ un turpinām nākamo algoritma soli.
5. Ja $w = w_0$, tad pārtraucam algoritma darbību. Citos gadījumos atgriežamies pie otrā soļa.

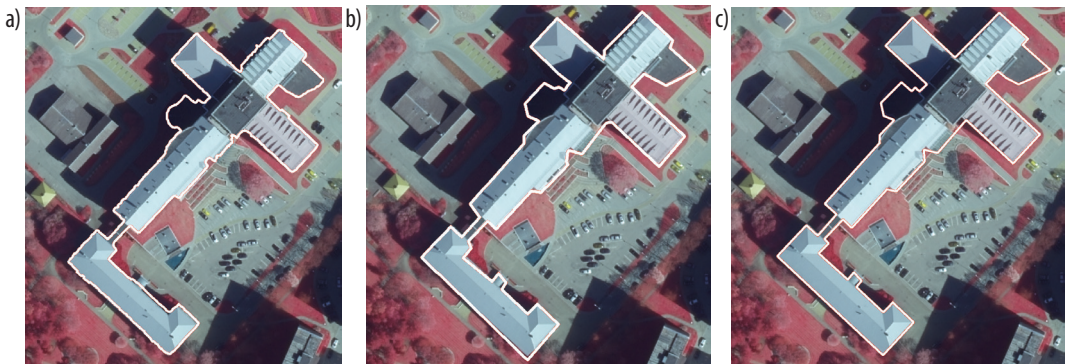
Pēc algoritma izpildes mūsu rīcībā ir savienotās komponentes robežu aprakstošo līniju parametri p_1 un p_2 pulksteņrādītāja kustības virzienā. Zinot līnijas parametrus un to secību, ēku stūru punktus var aprēķināt kā divu secīgu līniju L_1 un L_2 krustpunktus. Ja savienotajai komponentei ir īsa robeža jeb robežu veido maz pikseļu, tad krustpunkti, kas atrasti ar šīs metodes palīdzību, var neatbilst patiesajiem ēkas stūriem. Taču, ja robežu reprezentē gana daudz pikseļu, tad daudzstūru aproksimācija ar apvienošanas metodi sniegs ļoti labus rezultātus.

Ir pieejami līniju parametri, tāpēc var aprēķināt arī lenķi, ko veido divas secīgas līnijas, un, ja tas nav taisns, tad veikt korekcijas vienas vai abu līniju parametrus tā, lai veidotos taisns lenķis ēkas stūrī.

Rezultātā visu secīgo līniju krustpunkti veido ēkas jumta kontūrai atbilstošo daudzstūri.



4-26. att. Robežu sekošanas algoritma darbības shēma.



4-27. att. (a) Ēkas kontūra bez daudzstūru aproksimācijas, (b) veikta kontūras daudzstūra aproksimācija, (c) veikta lenķu korekcija ēkas stūros. Atšķirības ir novērojamas sīkās detaļās.

Precizitātes aprēķini

Atbalsta datus nepieciešamas precīzi iezīmētas ēku kontūras, un katrai ēkas kontūrai atbilstošajam daudzstūrim jābūt apzīmētam ar unikālu numuru, ja vēlamies precizitāti novērtēt ne tikai pikseļu, bet arī objektu līmenī.

Algoritma darbības rezultātā iegūst bināro masku. Arī atbalsta datus iespējams pārreķināt tādā pašā telpiskajā izšķirtspējā un salīdzināt ar algoritma rezultātiem pikseli pa pikselim. Ja algoritms piešķir tipu “ēka” tam pašam pikselim, kas atbilst ēkai atbalsta datus, tad tā ir pareizi apstiprinoša atbilde (TP^{19}). Ja ēka nepareizi konstatēta tur, kur ēkas nav, tad tā ir nepareizi apstiprinoša atbilde (FP^{20}). Ja kāds ēkas pikselis netiek atpazīts, tad tā ir nepareizi noliedzoša atbilde (FN^{21}).

Ēku noteikšanas precizitātes raksturošanai bieži lieto trīs parametrus: pabeigtību (P), pareizību (Pa) un kvalitāti (K):

$$P = \frac{\|TP\|}{\|TP\| + \|FN\|} \quad (4.13.)$$

$$Pa = \frac{\|TP\|}{\|TP\| + \|FP\|} \quad (4.14.)$$

$$K = \frac{\|TP\|}{\|TP\| - \|FP\| + \|FN\|} \quad (4.15.)$$

Šos parametrus var rēķināt arī objektu līmenī. Tādā gadījumā jādefinē, cik lielā mērā atbalsta datu ēkas kontūras daudzstūrim ir jāpārklājas ar algoritma atrasto daudzstūri, lai rezultātu varētu uzskatīt par pareizi apstiprinošu (TP). Objektu līmenī precizitātes rādītāji, visticamāk, būs augstāki, nekā rēķinot tos atsevišķu pikseļu līmenī.

Atsevišķu pikseļu līmenī nobīdes var arī nebūt saistītas ar algoritma nepareizu darbību, bet ar atšķirībām starp to, kā cilvēks manuāli iezīmējis ēku kontūras, un to, kā tas notiek automatizēti.

¹⁹ TP – True Positive.

²⁰ FP – False Positive.

²¹ FN – False Negative.

4.5. Plūdu un ūdens piesārņojuma detektēšana (28. lekcija)

4.5.1. Kopsavilkums

Iepazīsimies ar tālīzpētes mikroviļņu tehnoloģiju lietojumiem plūdu un ūdens virsmas piesārņojuma detektēšanā. Pirmajā gadījumā kā piemērs analizēts Somā (Igaunijā) veiktais eksperiments, lai izpētītu SAR tehnoloģiju efektivitāti applūdušu mežu masīvu identifikācijai un interpretācijai. Otrajā gadījumā apskatīsim vienas polarizācijas tehnoloģijas (reģistrācijai) un polarimetriskās tehnoloģijas (interpretācijai) dažādu naftas un ķīmisko piesārņojumu detektēšanai, kas tika lietotas tālīzpētes eksperimentā Ziemeļjūrā.

4.5.2. Problēmu nozīmība

Plūdi ir viena no postošākajām dabas katastrofām. Eiropā apmēram 3/4 no kopējām apdrošināšanas atlīdzībām ir saistītas ar plūdu nodarītajiem postījumiem. Plūdi parasti ir saistīti ar nokrišņiem, un applūdušās teritorijas bieži sedz mākoņi. Tāpēc SAR ir būtiska loma plūdu detektēšanā un monitoringā. SAR signāls spēj iespieties koku lapotnē un mijiedarboties ar zemes vai ūdens virsmu zem kokiem, tādējādi sniedzot informāciju arī par applūdušiem mežiem, ko citādi grūti vai pat neiespējami kartēt. Plūdi mežos nodara lielu kaitējumu ekosistēmām, palielina siltumnīcefekta gāzu emisiju, kavē koku augšanu, kā arī veicina zemes virsmas eroziju.

Arī jūru un okeānu piesārņojums ar naftas un citiem ķīmiskiem produktiem ir liela ekoloģiska problēma, jo ik gadu ūdenī nonāk ap miljonu kubikmetru dažādu naftas un ķīmisko produktu. Šī piesārņojuma galvenais cēlonis (ap 80 %) ir ļaunprātība, proti, lielāki un mazāki kuģi jūrā mazgā naftas produktu tvertnes, nolej veco vai nekvalitatīvo degvielu utt., lai izvairītos no samaksas par šo darbību izpildi ostās. Mazākā mērā (ap 20 %) šo piesārņojumu izraisa katastrofas un avārijas naftas produktu ieguves un transportēšanas sistēmās. Pastiprinātā kontrole, ko veic ar SAR satelītu palīdzību, ir devusi iespēju samazināt piesārņojuma gadījumu skaitu, kas apliecina šīs kontroles efektivitāti un nozīmību.

4.5.3. Mikroviļņu mijiedarbība ar applūdušu mežu

Radara signālu (mikroviļņu diapazonā) mijiedarbība ar applūdušu mežu ir visai komplicēta, jo atpakaļizkliedētais signāls veidojas kā dažādu mijiedarbības veidu kombinācija.

4-28. att. redzami spēcīgākie atpakaļizkliedes mehānismi minētajā vidē, izmantojot šādus apzīmējumus (σ^0 – atpakaļizkliedes koeficienti, skat. 1.4.7. sadaļu):

- σ_d^0 – divkārsa refleksija no koku stumbriem un zemes vai ūdens virsmas;
- σ_m^0 – vairākkārtēja refleksija no lapotnes, zemes virsmas un citiem virsmas objektiem;
- σ_c^0 – telpiskā izkliede koku lapotnēs;

- σ_s^0 – refleksija no zemes vai ūdens virsmas;
- σ_t^0 – refleksija no koku stumbriem.

Ūdens virsmu applūdušā mežā var uzskatīt par gludu virsmu (EMS mikroviļņu diapazonam), no kuras notiek starojuma spoguļatstarošanās. Savukārt, ja mežs nav applūdis – notiek difūzā atstarošanās, ko bieži var modelēt Braga izkliedes (skat. 1.4.6. sadaļu) tuvīnājumā. Applūdušā meža gadījumā tiek būtiski ietekmēti trīs atpakaļizkliedes mehānismi:

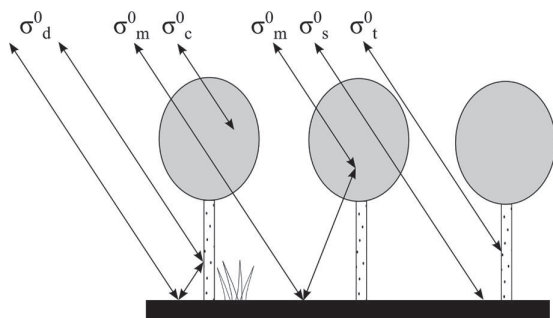
- vairākkārtējā refleksija no lapotnes un zemes (ūdens) virsmas (σ_m^0 palielinās);
- refleksija no zemes vai ūdens virsmas (σ_s^0 samazinās);
- dubultrefleksija no koku stumbriem un zemes (ūdens) virsmas (σ_d^0 palielinās).

Plūdu gadījumā palielinās arī reflektētā signāla pilnā jauda, ļaujot izstrādāt vairākus paņēmienus plūdu detektēšanai un kartēšanai.

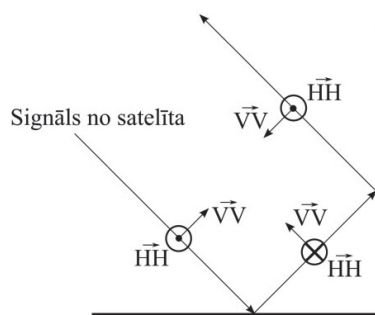
Dubultās atstarošanās gadījumā koku stumbri uz zemes (ūdens) virsmas veido t. s. divplakņu kakta atstarotāju. Viens no šādas dubultrefleksijas raksturīgiem efektiem ir aptuveni 180° lielas starpības veidošanās starp HH un VV polarizētu signālu fāzēm. Horizontālas polarizācijas viļņa fāze mainās par 180° katru reizi, kad vilnis atstarojas, bet vertikālas polarizācijas viļņiem šāda fāžu nobīde nenotiek (4-29. att.). Rezultātā, kad EMS vilnis ir atstarojies no abām plaknēm, starp HH un VV polarizācijas viļņiem veidojas 180° liela fāžu nobīde. Ja divplakņu kakta virsmas ir elektriski vadītāji, tad minētā fāžu nobīde ir 180° neatkarīgi no starojuma krišanas leņķa. Taču, ja virsmas ir dielektriskas, tad atbilstoši Frenela formulām (1.78–1.81) fāžu nobīde ir atkarīga no starojuma krišanas leņķa β un sasniedz savu maksimālo vērtību pie $\beta = 45^\circ$.

Arī citi atpakaļizkliedes mehānismi izraisa polarimetriskus efektus. Piemēram, koku lapotnes anizotropijas dēļ horizontāli un vertikāli polarizēts EMS izplatās caur to ar atšķirīgiem ātrumiem, izraisot papildu fāžu nobīdi starp HH un VV signāliem. Nelielus fāžu nobīdes efektus izraisa arī citi EMS mijiedarbības veidi ar applūdušu mežu.

SAR lietojumos HH un VV polarizācijas signālu fāžu starpības bieži raksturo, izmantojot t. s. HH-VV polarimetrisko kanālu, ko aprēķina, atņemot VV signāla komplekso vērtību no HH signāla kompleksās vērtības. HH-VV kanālā signālam maksimālā vērtība ir gadījumos, kad HH un VV signālu fāzes atšķiras par 180° , minimālā – gadījumos, kad signālu fāzes sakrīt. Lai arī HH kanālu pašu par sevi var izmantot mežu plūdu kartēšanai, tomēr HH-VV polarimetriskais kanāls nodrošina augstāku kontrastu starp applūdušām un neapplūdušām teritorijām.



4-28. att. Atpakaļizkliedes mehānismi applūdušā mežā [77].



4-29. att. Fāžu nobīdes HH un VV polarizācijas signālos skaidrojums.

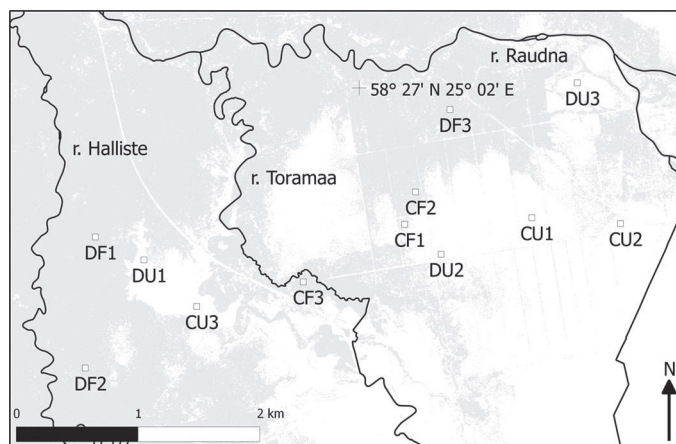
4.5.4. Somā (Igaunija) eksperiments

Lai novērtētu atšķirību starp HH un HH-VV kanāliem un to piemērotību meža plūdu kartēšanai, notika eksperimentāli pētījumi Somā nacionālajā parkā, Igaunijā. Regulāro pavasara plūdu laikā tika veikti mērījumi 12 teritorijās ar dažādām koku sugām un atšķirīgiem koku augstumiem. Pētījumā tika izmantoti divi satelīta TerraSAR-X attēli, no kuriem viens bija iegūts pirms plūdiem, otrs – plūdu laikā. Abu SAR attēlu izšķirtspēja (rezeļa izmēri) bija $1,2\text{ m} \times 6,6\text{ m}$, bet starojuma krišanas leņķis $\beta = 23^\circ$. 12 meža teritorijas tika iedalītas divās grupās (4-4. tab.). Pirmajā (F) grupā tika iekļautas teritorijas, kas nebija applūdušas 3. martā, bet bija applūdušas 25. martā. Otrā (U) grupa ietvēra teritorijas, kas abos minētajos datumos applūdušas nebija. Turklāt izvēlētās teritorijas tika iedalītas atkarībā no tā, vai tās pārsvarā veidoja skuju (C) vai lapu (D) koki. Visas grupas tika apzīmētas ar cipariem atkarībā no tajās augošo koku vidējā augstuma.

Pētījuma teritorijas karte redzama 4-30. att., pētījumā izmantotie attēli – 4-31. att., tā augšējā rindā ir HH kanāla attēli, apakšējā – HH-VV kanāla attēli. Kreisajā kolonnā izvietoti 3. marta attēli, labās puses kolonnā – 25. marta attēli.

4-4. tab. Meža teritoriju raksturlielumi.

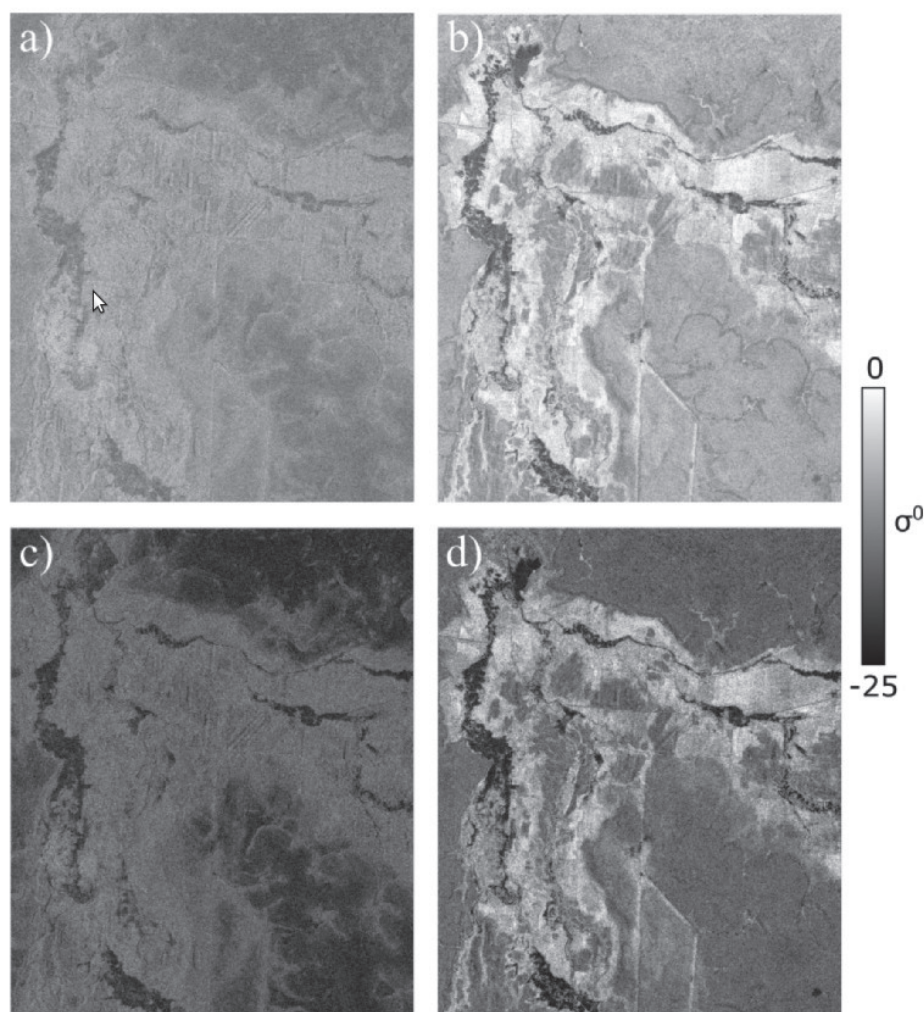
Nr.	Skuju/Lapu, %	Augstums, m	Lapotnes slēgums, %
CF1	86/14	23–28	80
DF1	0/100	20–28	75
CF2	70/30	16–18	75
DF2	5/95	14–19	81
CF3	80/20	7	77
DF3	0/100	5–7	78
CU1	91/9	25–29	71
DU1	0/100	23–24	73
CU2	87/13	12–16	75
DU2	38/62	14–16	67
CU3	90/10	1–10	76
DU3	3/97	5–10	77



4-30. att. Pētījuma teritorijas karte. Plūdu apjoms 25. martā iezīmēts ar gaiši pelēko krāsu.

Applūdušās teritorijas ir skaidri saskatāmas 4-31. att. labās puses kolonnā (attēlos (b) un (d)), jo tās ir gaišākas, liecinot par lielākām atpakaļizkliedes (refleksijas) koeficienta vērtībām. Pilnais refleksijas koeficients σ^0 plūdu ietekmē palielinājās visām applūdušajām (F) teritorijām. Visos gadījumos HH-VV kanālā tika reģistrēts lielāks σ^0 pieaugums nekā HH kanālā.

Lielākais σ^0 vērtību pieaugums gan HH, gan HH-VV kanālos tika novērots skuju kokiem CF3 grupā (aptuveni 5 dB abos kanālos). Lapu koku gadījumā rezultāti bija līdzīgi (8 dB grupai DF3), kā tas redzams 4-32. att. Visos gadījumos HH-VV kanālā tika reģistrēts lielāks σ^0 vērtību pieaugums nekā HH kanālā. Šī pieauguma atšķirības starp kanāliem bija robežās no 0,12 dB (CF3 grupai) līdz 1,6 dB (DF3 grupai). Vidēji lielākas atšķirības bija lapu koku gadījumā (1,3 dB), savukārt skuju koku gadījumā – tikai 0,77 dB. Neapplūdušajās (U grupas) teritorijās σ^0 vērtību izmaiņām bija gadījuma raksturs, kas liecina par cēloņsakarību starp plūdiem un σ^0 vērtību izmaiņām applūdušajās (F grupas) teritorijās.

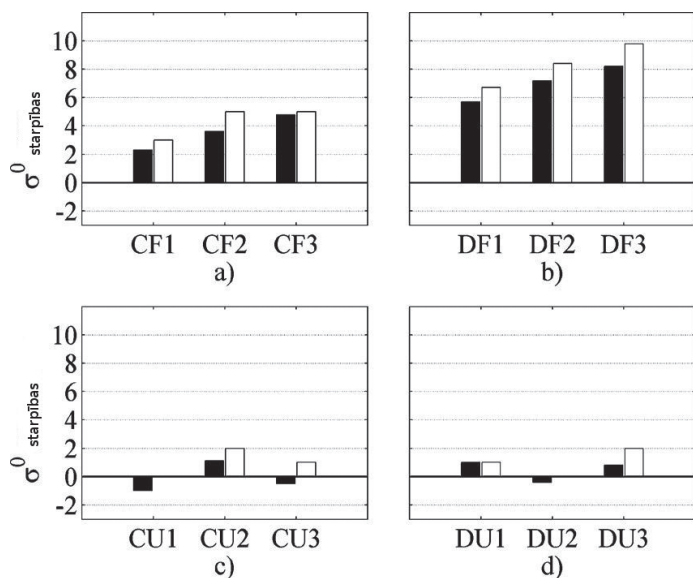


4-31. att. Satelīta *TerraSAR-X* tālīzpētes attēli 3. martā un 25. martā.

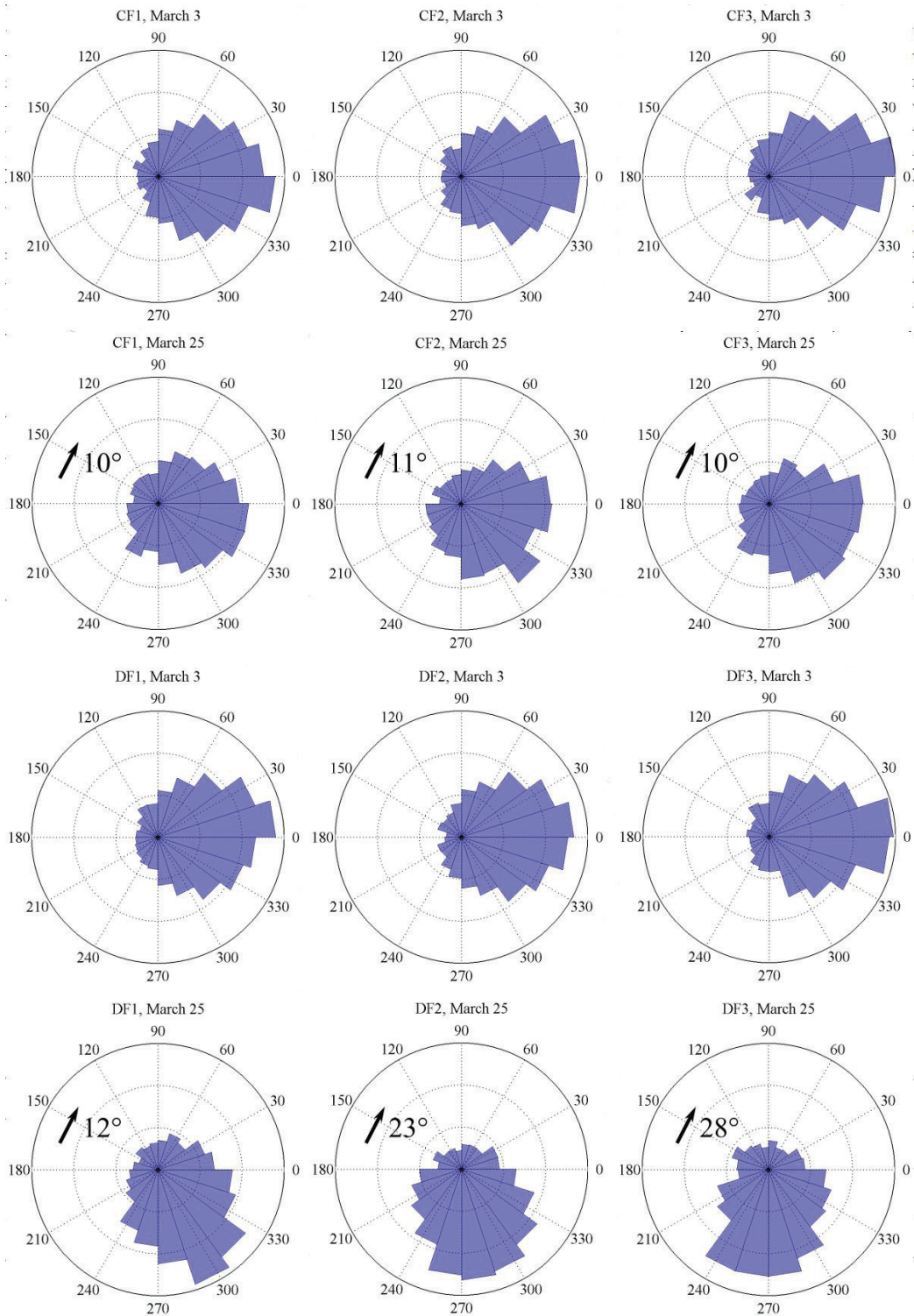
Pētījuma rezultāti liecina, ka HH-VV kanāls attēlos nodrošina lielāku kontrastu starp applūdušām un neapplūdušām teritorijām, taču kontrasta pieaugums ir atkarīgs no biomasas daudzuma konkrētajā teritorijā. Pilnais atpakaļizkliedes koeficients σ^0 palielinās, ja koku augstums samazinās. Turklāt pētījums tika veikts pavasarī, kad lapas vēl nebija izplaukušas, tādēļ lapu koku teritorijās kontrasta pieaugums bija lielāks nekā skuju koku gadījumā.

Lai pārliecinātos, ka radara mikroviļņu starojums ir sasniedzis zemes (ūdens) virsmu zem koku lapotnes, jāpievērš uzmanība signālu fāžu starpībai HH un VV kanālos (4-33. att.). Redzams, ka fāžu starpība visiem 3. marta mērījumiem ir aptuveni vienāda ar nulli. Plūdu laikā, t. i., 25. martā, minētā fāžu starpība palielinās. Palielinājums ir izteiktāks lapu koku grupām, jo lielāka mikroviļņu starojuma daļa spēj sasniegt ūdens virsmu zem lapotnes. Neapplūdušajām teritorijām fāžu starpība bija vidēji robežās no 5° līdz 8° .

Nobeigumā var secināt, ka kontrasta pieaugums HH-VV kanālā ir lielāks nekā HH kanālā, taču kontrasta pieaugumu starpība nav liela (0,2 dB līdz 1,6 dB). Lai to palielinātu, ir jāstrādā ar lielākiem starojuma krišanas leņķiem β un jāizmanto mikroviļņu starojuma C vai L joslas.



4-32. att. Vidējais σ^0 vērtību pieaugums starp 3. martu un 25. martu. Melnā krāsa attiecas uz HH kanālu, baltā krāsa – uz HH-VV kanālu.



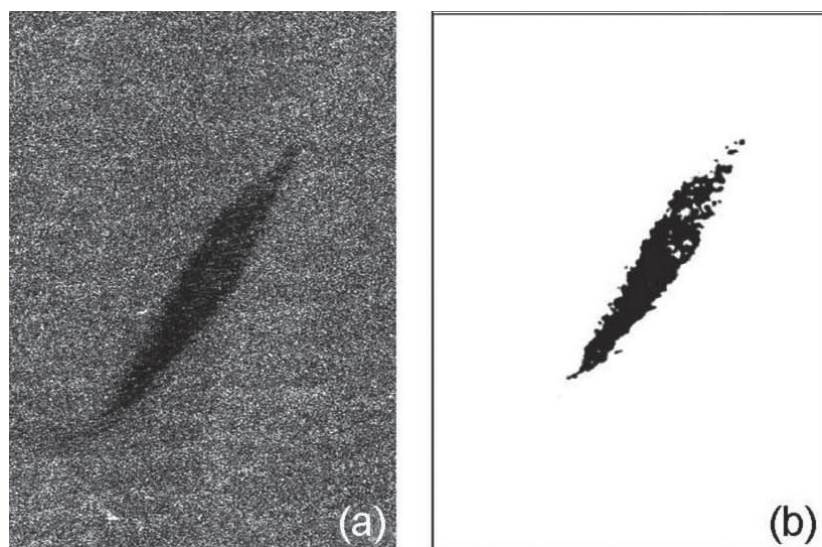
4-33. att. Fāžu nobīde starp HH un VV kanālu signāliem applūdušo teritoriju gadījumos.

4.5.5. Vienas polarizācijas tehnoloģijas

Turpmāk aplūkosim otru problēmu – ūdens virsmu (jūru un okeānu) piesārņojuma ar naftas produktiem detektēšanu. Atbilstoši difrakcijas teorijai EMS izkļiedes īpašības ļoti mainās pie nosacījuma $\lambda \sim d$ (šeit λ – EMS viļņa garums, bet d – tekstūras “grauda” izmērs), tāpēc SAR attēlos ir samērā viegli identificēt un atšķirt jūras virsmas apgabalus ar dažādiem viļņu augstumiem. Naftas produkti uz ūdens virsmas veido plānu plēvīti, kas noslāpē sikos vilnīšus, tādējādi izmainot tekstūras parametrus, kas galvenokārt ir atkarīgi no vēja ātruma un virziena. Jūru un okeānu apgabalus bez mazu vilnīšu komponentes klātbūtnes (tajos notiek mikroviļņu spoguļatstarošanās no ūdens virsmas) viegli identificēt kā tumšus plankumus SAR attēlos [126].

Šos plankumus iespējams segmentēt, un tie ļoti daudzos gadījumos atbilst naftas produktu piesārņojumam uz ūdens virsmas [85]. Sākotnējos SAR attēlos ir izteikta spekļa komponente, tādēļ segmentācijai jāizmanto specifiski statistiskie filtri. Ļoti bieži izmanto CFAR²² filtrus [141], jo tie ir labi piemēroti šādas segmentācijas veikšanai (4-34. att. labās puses attēls).

Metode kopumā ir ļoti efektīva, jo apvieno lielu pārklājumu ar augstu telpisko izšķirtspēju, turklāt nav atkarīga no laikapstākļiem un apgaismojuma, taču tai piemīt arī vairāki trūkumi. Pirmkārt, šīs metodes lietošana iespējama tikai pie noteikta stipruma vēja, kas formē jūras virsmas tekstūru. Ja vēja nav vai arī tas ir vājš, ūdens virsma ir mierīga, viļņu tekstūra ir neizteikta un metode nedarbojas. Šādi bezvēja (vāja vēja) apgabali pasaules okeānā nav retums, un tie SAR attēlos ir ļoti līdzīgi ar naftas produktiem piesārņotiem apgabaliem (notiek EMS spoguļrefleksija). Turklāt metode nedarbojas arī stipra vēja (vētru) apgabalos, jo tur naftas produktu plēvīte tiek noārdīta un sajaukta ar ūdeni. Tādējādi vienas polarizācijas SAR attēlos ne visi tumšie plankumi atbilst naftas produktu piesārņojumam, bet vismaz daļa no tiem ir t. s. māņu apgabali (*look-alike areas*). Māņu apgabalus SAR at-



4-34. att. Naftas produktu piesārņojuma SAR attēls [126].

²² CFAR – Constant False Alarm Rate.

tēlos formē ne tikai bezvējš, bet arī dažādas citas plēves uz ūdens virsmas. Tās var būt gan bioloģiskas izcelsmes, gan antropogēnas izcelsmes (citi piesārņojumi), bet SAR attēlos tās atdalīt ar šo metodi nav iespējams. Tāpat nav iespējams iegūt arī kādu kvantitatīvu novērtējumu (piemēram, plēves biezumu) piesārņojuma apjomam (izņemot tā laukumu). Šādu attēlu precīzas klasifikācijas veikšanai ir ļoti nepieciešami atbalsta dati (aerofotogrāfijas), kas nereti ir dārgi iegūstami.

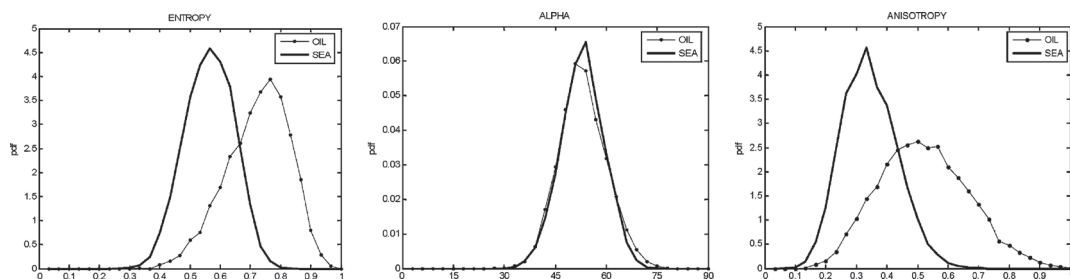
4.5.6. Polarimetriskās tehnoloģijas

Vienas polarizācijas SAR datus vienkārši pietrūkst informācijas, lai veiktu to viennozīmīgu un pareizu klasifikāciju. Papildu informāciju iespējams piesaistīt, gan izmantojot jau pieminētos atbalsta datus, gan strādājot ar vairākām polarizācijām. Tad iespējams izmantot visu *PolSAR* metožu arsenālu un veikt ievērojami precīzāku ūdens virsmas piesārņojuma klasifikāciju.

Ūdens virsmas naftas produktu piesārņojuma detektēšanai ar *PolSAR* tehnoloģijām parasti izmanto mikroviļņu C joslas un L joslas EMS. Iegūtajiem SAR attēliem aprēķina polarizācijas (kovariances un koherences) matricas un veic to dekompozīciju saskaņā ar "H/A/ α " metodi (skat. 2.6.8. sadaļu). Tas ļauj aprēķināt entropijas, anizotropijas un alfa leņķa vērtības katram attēla pikselim un to vērtības statistiski salīdzināt dažādiem attēla apgabaliem [126].

4-35. att. redzamas entropijas, alfa leņķa un anizotropijas vērtību varbūtības blīvuma funkcijas ar naftas produktiem piesārņotiem apgabaliem (punktotās linijas) un tīrai jūras virsmai (nepārtrauktās biezās linijas). Redzams, ka entropijas un anizotropijas vidējās vērtības šajos gadījumos ir nobīdītas attiecīgi par 16 % un 18 % un var kalpot par indikatoriem, lai identificētu bezvēja māņu apgabalus. Alfa leņķa vidējās vērtības atšķiras tikai par 0,1 %, un tās šim mērķim izmantot nevar.

Citas izcelsmes māņu apgabalu identifikācija ir ievērojami komplicētāka. Dažādu bioloģiskas vai antropogēnas izcelsmes plēvju klātbūtni uz ūdens virsmas ir vieglāk identificēt, strādājot ar L joslas EMS. Šajā joslā mikroviļņu starojuma refleksija no tīra ūdens virsmas labi atbilst iepriekš apskatītajam Braga modelim, savukārt virsmām, kas klātas ar plēvēm, novērojamas izteiktas novirzes no Braga modeļa teorētiskajām vērtībām. Lai izpētītu šo jautājumu detalizētāk, 1994. gada 11. oktobrī Ziemeļjūrā [126] tika veikts eksperimentāls neliela apjoma piesārņojums ar septiņām dažādām ķīmiskām vielām (degvielas, to spirta

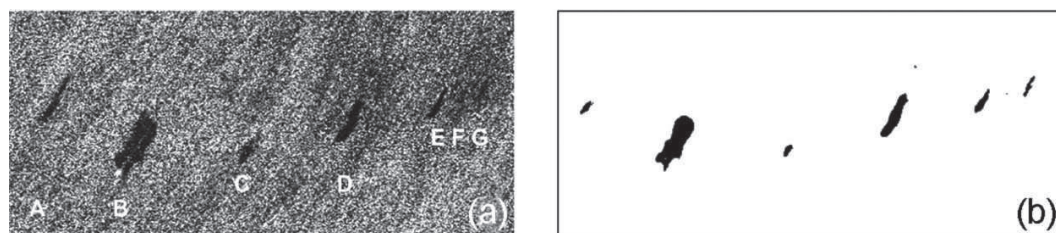


4-35. att. Entropijas, alfa leņķa un anizotropijas vērtību varbūtības blīvuma funkcijas tīriem un piesārņotiem ūdens virsmas apgabaliem [126].

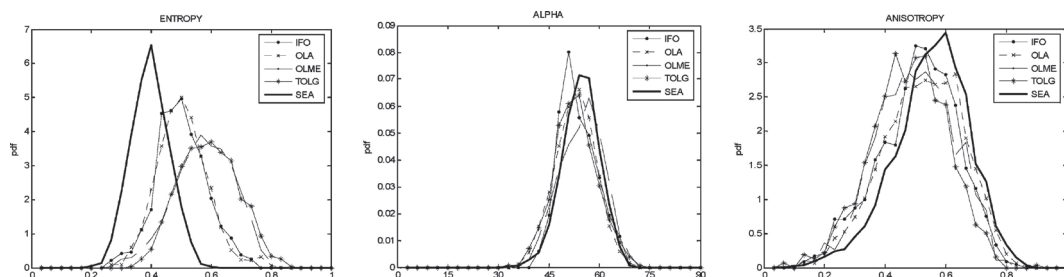
piedevas u. c.). Eksperimenta apgabals tika novērots ar satelīta SIR-C/X SAR sensoriem EMS C joslā un veikta iegūto attēlu segmentācija ar CFAR filtriem (skat. 4-36. att.).

Katram no reģistrētajiem tumšajiem plankumiem tika veikta polarizācijas matricu “H/A/ α ” dekompozīcija un konstatēts, ka vislielākās atšķirības novērojamas entropijas vērtībām (4-37. att.).

Tādējādi entropiju var izmantot par indikatoru, lai ne tikai nodalītu māņu apgabalus naftas produktu piesārņojuma klasifikācijai, bet arī lai identificētu citus jūras virsmas piesārņojuma veidus. Pirmie soļi sperti arī, lai noteiktu dažādus piesārņojuma kvantitatīvos parametrus (plēves biezumu u. c.), taču tas nav vienkārši, jo to ļoti ietekmē laikapstākļi un daudzi citi grūti prognozējami procesi okeānā (iztvaikošanas intensitāte, straumes, emulsifikācija, sedimentācija, biodegradācijas parametri u. c. faktori).



4-36. att. Eksperimenta apgabals Ziemeļjūrā un tā segmentācijas rezultāts [126].



4-37. att. Entropijas, alfa leņķa un anizotropijas vērtību varbūtības blīvuma funkcijas tīram ūdenim un dažādi piesārņotiem ūdens virsmas apgabaliem [126].

4.6. Zālāju tālzpēte, izmantojot SAR (29. lekcija)

4.6.1. Kopsavilkums

Zālāji ir kompleksa lauksaimniecisko platību komponente, kas atkarīga no liela skaita dažādu faktoru ietekmes. Šīs komplicētības dēļ līdz šim tie nav tikuši daudz pētīti ar tālzpētes metodēm. Tādēļ iepazīsimies ar Igaunijas pieredzi SAR polarimetrisko un interferometrisko tehnoloģiju izmantošanā pļaujas un citu lauksaimniecisko aktivitāšu detektēšanai zālāju platībās. Nobeigumā daži vārdi arī par citām apskatīto SAR metožu lietošanas jomām.

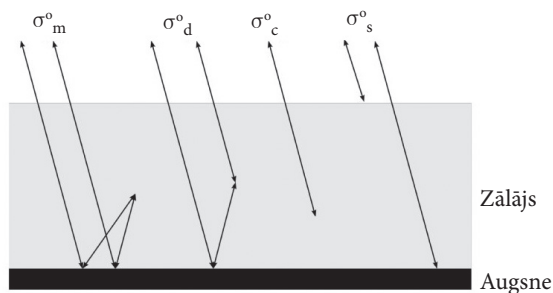
4.6.2. Problēmas nozīmība

Zālāji veido lielu daļu no lauksaimniecībā izmantojamās zemes Eiropā un pasaulē. Tiem ir ievērojama loma ne tikai lopkopībā kā lopbarības avotam, bet arī ekosistēmu saglabāšanā, nodrošinot bioloģisko daudzveidību un novēršot zemes virsmas eroziju. Tā ir kompleksa vide, kas atkarīga no klimata, laikapstākļiem, lauksaimnieciskās izmantošanas veida u. c. faktoriem. Iespējams, šī iemesla dēļ zālāji nav tik bieži pētīti kā citi lauksaimniecībā izmantojamo zemju tipi. Tomēr pēdējā laikā padziļinātas klimata izmaiņu izpētes ietvaros arī zālāju tālzpētei tiek veltīta lielāka uzmanība. Viens no šādas izpētes aspektiem ir pļaušanas detektēšana, izmantojot mikroviļņu tehnoloģijas lauksaimniecībā izmantoto zālāju platībām. Informācija par pļaujām un citām zālāju apsaimniekošanas darbībām ir svarīga, piemēram, Eiropas Savienības institūcijām, kas veic lauksaimniecības subsīdiu sadali un to izmantošanas kontroli.

4.6.3. SAR signālu mijiedarbība ar zālāju

Līdzīgi kā gadījumos ar mežiem, arī zālāju gadījumā reflektētais signāls veidojas kā dažādu mijiedarbības veidu kombinācija, kurā var noteikt galvenos atpakaļizkliedes mehānismus (skat. 4-38. att.):

- σ_m^o – vairākkārtīga refleksija no zāles stiebriem un zemes virsmas;
- σ_d^o – divkārtīga refleksija no zāles stiebriem un zemes virsmas;



4-38. att. Atpakaļizkliedes mehānismi EMS mijiedarbībā ar zālāju [77].

- σ_c° – telpiskā izkliede no zāles slāņa;
- σ_s° – refleksija no augsnes vai zālāja augšējā slāņa.

Atsevišķo atpakaļizkliedes mehānismu intensitāte ir atkarīga no zālāja jeb veģetācijas īpašībām, izmantotā EMS viļņu garuma, signālu polarizācijas, kā arī starojuma krišanas leņķa. Pēdējie trīs faktori ir saistīti ar satelītu un tajā uzstādīto sensoru. Pieņemot, ka tie nemainās vai arī ir modelējami tālīzpētes attēlu iegūšanas brīžiem, var izmaiņas reģistrēt tajā signālā saistīt ar izmaiņām pētāmajā veģetācijā.

4.6.4. Polarimetriskā metode

Lai pētītu zālājus ar SAR polarimetriskajām metodēm, izmantosim divus raksturīgus parametrus: entropiju H , ko aprēķina saskaņā ar iepriekš apskatītās “H/A/α” metodes matemātisko modeli (skat. 2.6.8. sadaļu), vai tā speciālgadījumu – “H2α” dekompozīcijas modeli. Pēdējais (proti, “H2α” modelis) atšķiras no “H/A/α” modeļa ar to, ka aprēķinos izmanto tikai HH un VV polarizācijas signālus. Tādējādi “H2α” dekompozīcija ir vienkāršots “H/A/α” dekompozīcijas variants.

Otrs izmantotais parametrs būs HH un VV polarizācijas signālu šķērskorelācijas (jeb koherences) koeficients, ko aprēķina atbilstoši formulai

$$\gamma_{HHVV} = \frac{|\langle s_{HH} s_{VV}^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_{HH} s_{HH}^* \rangle \langle s_{VV} s_{VV}^* \rangle}} \quad (4.16.)$$

kur ar $\langle \rangle$ apzīmēta vidējās vērtības aprēķināšanas darbība, ar $*$ – kompleksās saistības darbība. Attēlu fragmentus s_{HH} un s_{VV} izvēlas, izmantojot digitālo attēlu apstrādes telpiskā formālisma (skat. 3.1.5. sadaļu) maskas, kas nedrīkst būt pārāk mazas, lai γ_{HHVV} novērtējums būtu statistiski pamatots un pietiekami precīzs.

Kā mērījumu materiāls polarimetrisko parametru aprēķināšanai un analīzei tika izmantoti SAR attēli un lauka mērījumu (atbalsta) dati, kas iegūti 2013. gadā 11 lauksaimniecībā izmantojamu zālāju fragmentos. Šie fragmenti bija izvēlēti Igaunijas centrālajā daļā un tika apsekoti visu vasaru. Atbalsta mērījumi tika veikti no 11. maija līdz 5. oktobrim vienlaikus ar SAR satelītu pārlidojumiem. Šie zālāji pārsvarā tika izmantoti lopbarības audzēšanai, tāpēc tika ievākta informācija par biomasas apjomu, zāles augstumu, kā arī ūdens daudzumu veģetācijā un augsnes slānī. Tika fiksēti datumi, kad notika zāles plauja un lauku aparšana.

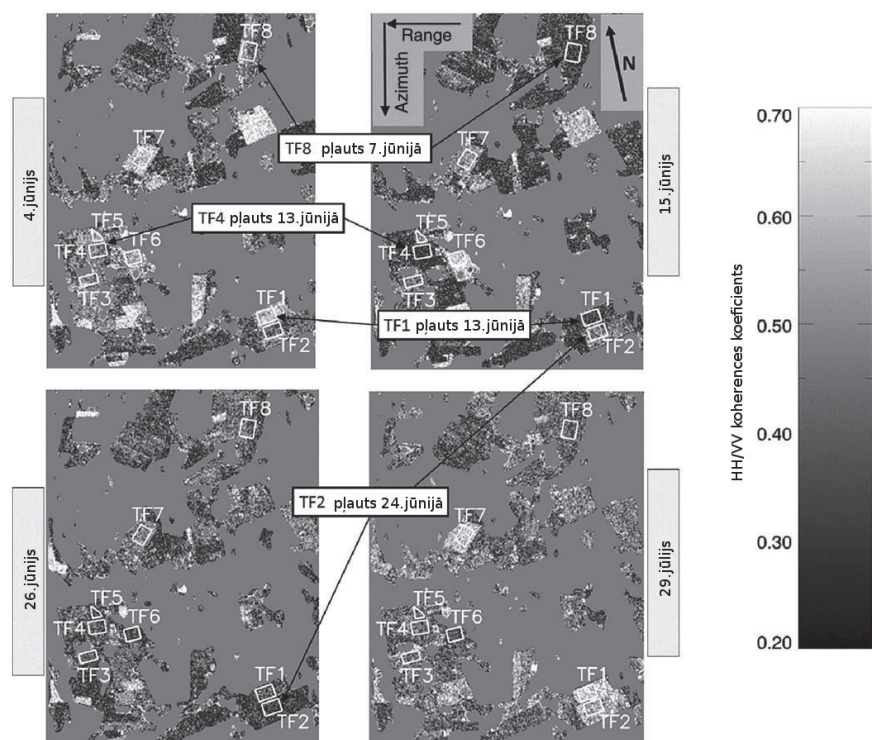
SAR attēli tika iegūti ar divu satelītsistēmu palīdzību: *TanDEM-X (TDX)* un *Radar-sat-2 (R2)*. *TDX* pārlidojumi notika gan no rīta (plkst. 7.30 pēc vietējā laika), gan pievakarē (plkst. 19). Savukārt R2 satelītattēli tika iegūti tikai no rīta (plkst. 7.30). Starojuma krišanas (apstarošanas) leņķi abiem satelītiem bija līdzīgi, robežās no 40° līdz 44°. R2 signāliem bija četras polarizācijas (HH, VV, HV un VH), savukārt *TDX* signāliem – tikai divas polarizācijas (HH un VV). Abos gadījumos bija iespējams aprēķināt iepriekš minētos polarizācijas parametrus, proti, entropiju H un koherences koeficientu γ_{HHVV} .

HH un VV polarizācijas parametru izmantošanas lietderība ir saistīta ar anizotropiju zālāju veģetācijā. Zāles stublāji ir liela daļa no virszemes biomasas, un tie izteikti mijiedarbojas ar VV polarizācijas signāliem. Pēc plaujas stublāji (ja tos atstāj uz lauka) ir novietoti horizontāli, un tādējādi tie izteikti mijiedarbojas ar HH polarizācijas signāliem. Tātad iz-

maiņas HH un VV polarizācijas signālos var liecināt par izmaiņām pētāmās veģetācijas orientācijā.

Ja salīdzina polarimetrisko parametru vērtības pirms un pēc plaujas, tad jāsecina, ka γ_{HHVV} vērtības vairumā gadījumu samazinās, bet entropijas H vērtības palielinās. TDX attēlos, kas iegūti pievakarē, šī likumsakarība bija spēkā 11 gadījumos no 13, bet attēlos, kas iegūti no rīta, – četros gadījumos no četriem. R2 satelīttattēlos minētā likumsakarība tika novērota 10 gadījumos no 12. Abi parametri (γ_{HHVV} un H) uzrādīja lielākas izmaiņas TDX attēlos. R2 attēli tika iegūti retāk nekā TDX attēli, bieži starp plauju un nākamo R2 attēlu pagāja ilgāks laiks nekā TDX attēliem. Šajā laika posmā, iespējams, daļa veģetācijas struktūru sāka atjaunoties (ataugt).

R2 attēlos entropija H vidēji pieauga par $\Delta H_{R2}=0,029$, TDX – attēlos par $\Delta H_{TDX}=0,07$. R2 attēlos koherences koeficienta γ_{HHVV} vērtība vidēji samazinājās par $\Delta\gamma_{HHVV}^{(R2)}=-0,042$, kamēr TDX attēlos – par $\Delta\gamma_{HHVV}^{(TDX)}=-0,12$.²³ 4-39. att. redzama četru plauju ietekme uz koherences koeficientu γ_{HHVV} . Zālāju fragmenti, kas tika izmantoti pētījumā, atzīmēti ar baltu kontūru un numurēti no TF1 līdz TF8. Attēlā var redzēt γ_{HHVV} vērtību samazināšanos, ko izraisa plauja: fragmentiem TF1, TF4 un TF8 koherence samazinās no 4. jūnija līdz 15. jūnijam, TF2 – no 15. jūnija līdz 16. jūnijam. Fragmentam TF1 koherences koeficients samazinājās no 0,60 līdz 0,36, fragmentam TF2 – no 0,48 līdz 0,33, fragmentam TF4 – no 0,47 līdz 0,30, fragmentam TF8 – no 0,48 līdz 0,32. Taču 29. jūlija attēlā tika novērota arī koherences atjaunošanās (domājams, veģetācijas ataugšanas rezultātā).

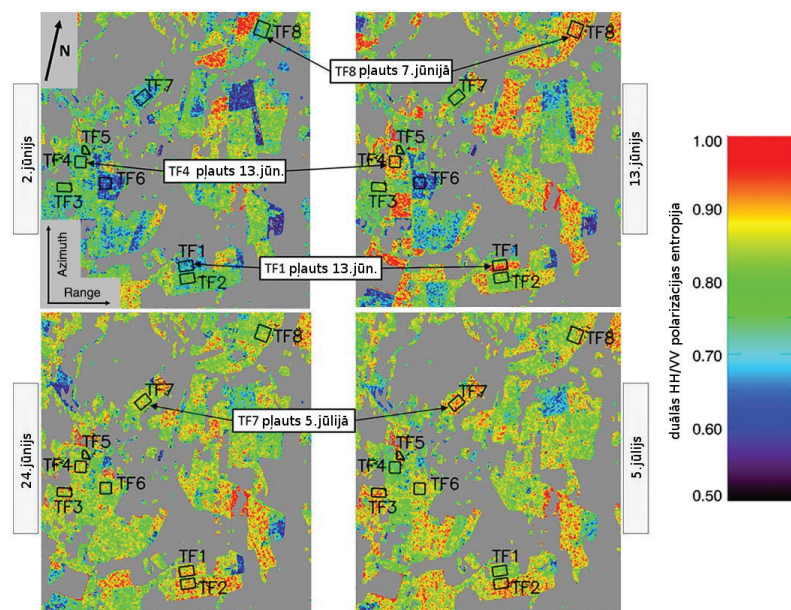


4-39. att. Koherences koeficienta γ_{HHVV} vērtības satelīta TDX attēlos [148].

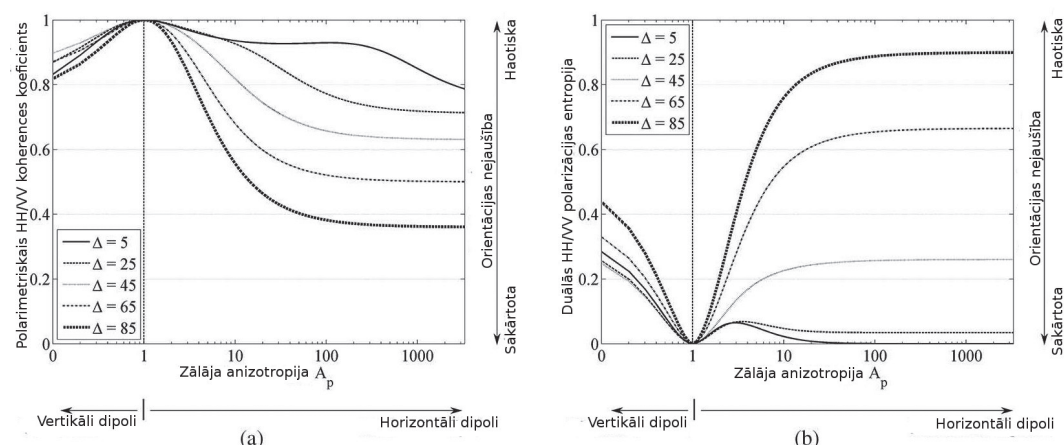
²³ Gan entropijas H , gan koherences koeficienta γ_{HHVV} minimālā vērtība ir 0, maksimālā vērtība ir 1.

4-40. att. savukārt redzama pļaujas ietekme uz “ $H2\alpha$ ” dekompozīcijas entropijas H vērtībām. Zālāju fragmenti šajā attēlā atzīmēti ar melnu kontūru un, līdzīgi kā iepriekš, numurēti no TF1 līdz TF8. Zīmējumā attēlotas satelitattēlu entropijas H vērtības, kas pļaujas rezultātā palielinās. Fragmentam TF1 entropija pieaug no 0,69 līdz 0,89, fragmentam TF4 – no 0,76 līdz 0,90, fragmentam TF7 – no 0,85 līdz 0,89, fragmentam TF8 – no 0,76 līdz 0,90.

Koherences koeficienta γ_{HHVV} un entropijas H izmaiņas ir saistītas arī ar to, cik daudz veģetācijas tika atstāts uz lauka pēc pļaujas. Šo parametru vērtības mainījās mazāk gadījumos, kad uz lauka tika atstāts mazāk par 0,5 kg zāles uz 1 m².



4-40. att. “ $H2\alpha$ ” dekompozīcijas entropijas H vērtības satelīta TDX attēlos [148].



4-41. att. γ_{HHVV} un H teorētiskās vērtības atkarībā no zālāja anizotropijas A_p un orientācijas nejaušības Δ [148].

Koherences koeficienta γ_{HHVV} un entropijas H izmaiņas iespējams pamatot, izveidojot fizikālu EMS mijiedarbības ar zālāju matemātisko modeli, kas pielāgots divu polarizāciju gadījumam [89]. Šāda modeļa gadījumā divdimensionāla koherences matrica ir uzrakstāma formā

$$\underline{T} = f_v \begin{Bmatrix} T_{11} & T_{12} \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} \\ T_{12}^* \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} & T_{22} \left(1 + \frac{\sin 4\Delta}{4\Delta} \right) \end{Bmatrix} \quad (4.17.)$$

kur

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{4}{15} (A_p - 1)^2 + \frac{4}{3} (A_p - 1) + 2 \\ T_{12} &= \frac{4}{15} (A_p - 1)^2 + \frac{2}{3} (A_p - 1) \\ T_{22} &= \frac{2}{15} (A_p - 1)^2 \end{aligned}$$

kur f_v – veģetācijas tilpuma izkliedes intensitāte;

A_p – anizotropijas funkcija, kas atkarīga no izkliedējošo objektu formas un relatīvās dielektriskās caurlaidības ($A_p \rightarrow 0$ vertikāla dipola gadījumā, $A_p = 1$ sfēriskas formas gadījumā un $A_p \rightarrow \infty$ horizontāla dipola gadījumā);

Δ – parametrs, kas raksturo izkliedējošo objektu orientācijas īpatnības ($\Delta = 0^\circ$, kad objekti ir regulāri orientēti, bet $\Delta = 90^\circ$, kad to orientācija ir haotiska).

Ar šo matemātisko modeli var teorētiski aprēķināt sagaidāmās koherences koeficienta γ_{HHVV} un entropijas H vērtības.

Pieņemot, ka zālāju veģetāciju iespējams modelēt kā dipolus, tad vertikālai (nepļautai) zālei atbilst $0 < A_p < 1$, bet horizontālai (nopļautai, kas atstāta uz lauka) $1 < A_p < \infty$. 4-41. att. redzams, ka pie noteiktiem objektu (zāles stiebru) orientācijas nosacījumiem, proti, $\Delta > 45^\circ$, mainoties dipolu orientācijai no vertikālas uz horizontālu, sagaidāma koherences koeficienta γ_{HHVV} samazināšanās (attēla kreisā puse) un entropijas H palielināšanās (attēla labā puse).

4.6.5. Interferometriskā metode

SAR interferometrija ir piemērota tehnoloģija, lai pētītu izmaiņas laikā. Veģetācijas analīzes gadījumos var mērit temporālo koherenci (dekorelāciju) γ_t , ko izraisa zāles kustība (vēja dēļ) laika posmā starp divu SAR attēlu iegūšanu. Jau redzējām, ka to tuvināti modelē formula:

$$\gamma_{\text{temp}} = \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\sigma_x^2 \sin^2 \beta + \sigma_z^2 \cos^2 \beta \right) \right) \quad (4.18.)$$

kur σ_z^2 – nestacionaritātes (zāles kustības) dispersija vertikālā virzienā;

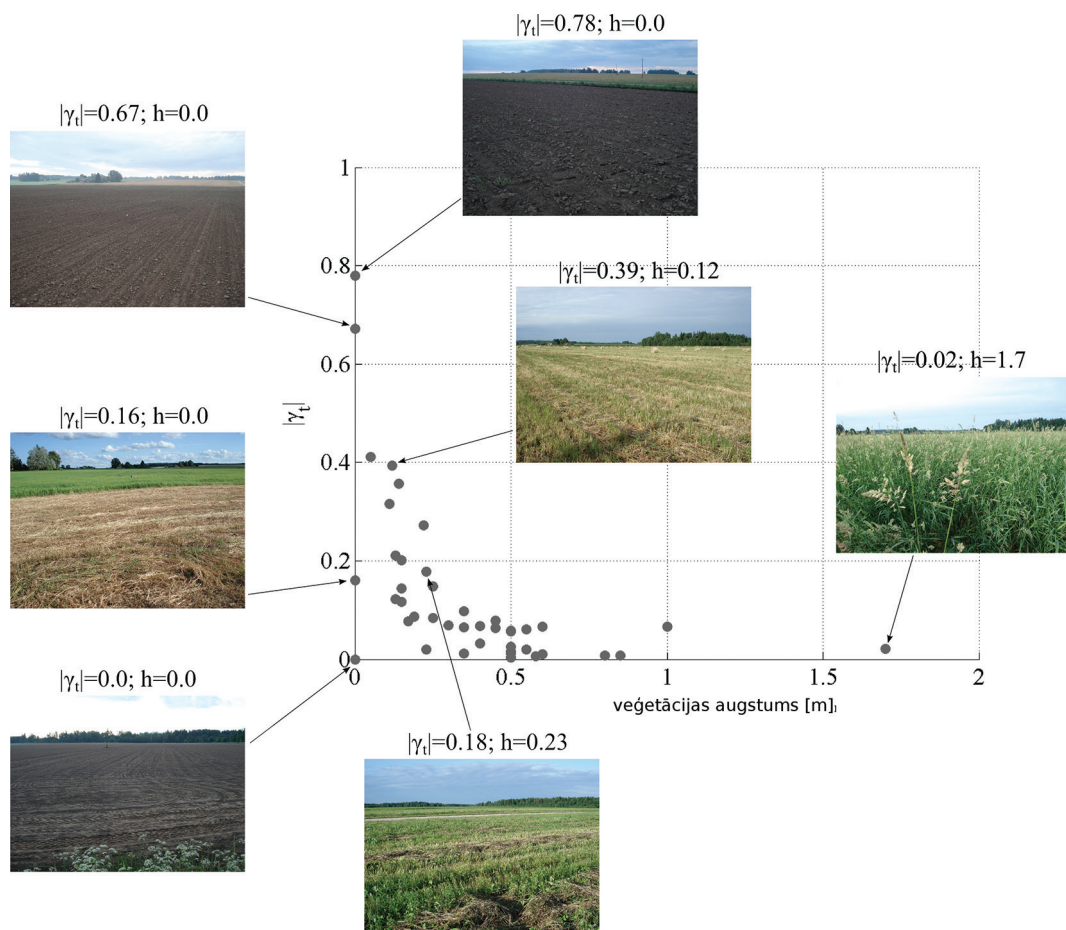
σ_x^2 – nestacionaritātes (zāles kustības) dispersija radiālajā virzienā;

β – starojuma krišanas leņķis.

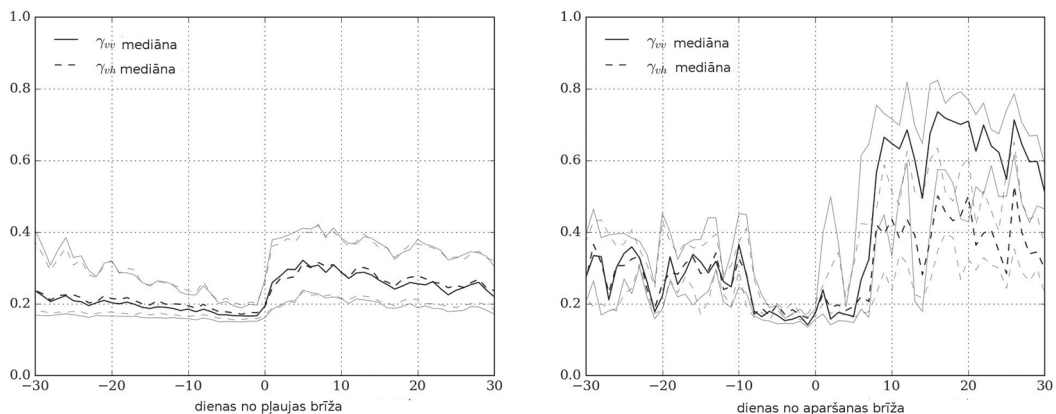
No šīs formulas izriet, ka temporālā koherence samazinās, ja veģetācijas nestacionaritāte (haotiskā kustība) ir lielāka. Ja veģetācijas ir maz (piemēram, pēc pļaujas), haotiskās kustības nav un koherencei vajadzētu būt augstai.

4-42. att. redzami 2013. gada mērījumu kampaņas mērījumu rezultāti, kurā izmantoja satelīta *COSMO-Skymed* (CSD) DInSAR attēlu pārus par vienu un to pašu vietu uz zemes ar vienas dienas starpību. Kopumā tika apstrādāti četri DInSAR attēlu pāri, divi jūnijā un pa vienam jūlijā un augustā. Katrā no pāriem tika izvēlēti 10 fragmenti, kopā veidojot 40 apstrādājamo fragmentu pārus. Salīdzinot zāles augstumu h un temporālo koherenci γ_t , redzams, ka patiešām pastāv inversa sakarība starp šiem lielumiem un 4-42. att. redzamās vērtības kvalitatīvi labi atbilst izvēlētajā matemātiskā modeļa vērtībām. Lielākas temporālās koherences koeficienta γ_t vērtības patiesi tika reģistrētas gadījumos, kad zāle bija pilnībā nopļauta. Taču redzami arī divi izņēmumi: $\gamma_t = 0,16$ pie $h = 0$ un $\gamma_t = 0$ pie $h = 0$. Šie gadījumi ir saistīti ar lietainiem laikapstākļiem un aparšanu pēc pļaujas. Abos gadījumos apstākļi uz lauka bija ievērojami mainījušies laika posmā starp satelīta pārlidojumiem.

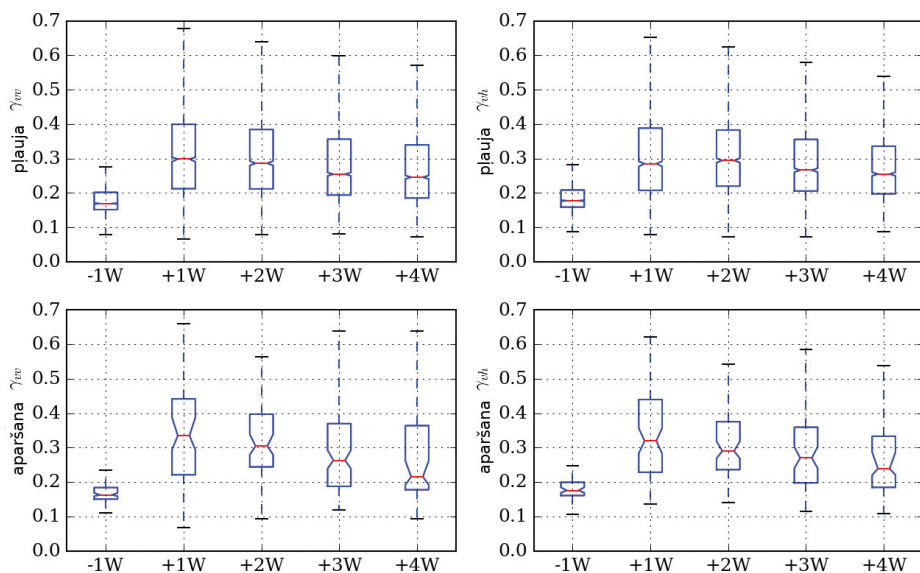
2017. gadā Igaunijā tika iegūti atbalsta dati par 1135 zālāju fragmentiem, lai izpētītu sakarības starp pļauju un satelīta “*Sentinel-1*” (S1) DInSAR attēlu temporālo koherenci. Satelīts S1 ļauj iegūt attēlu pārus ik pēc sešām dienām ar HV un VV polarizāciju. Kopumā tika apstrādāti 386 S1 attēlu pāri, kas aptvēra laika posmu no 1. maija līdz 30. oktobrim, un izmantoti atbalsta mērījumi par 1373 pļaujas un 55 aparšanas gadījumiem. Rezultātā tika



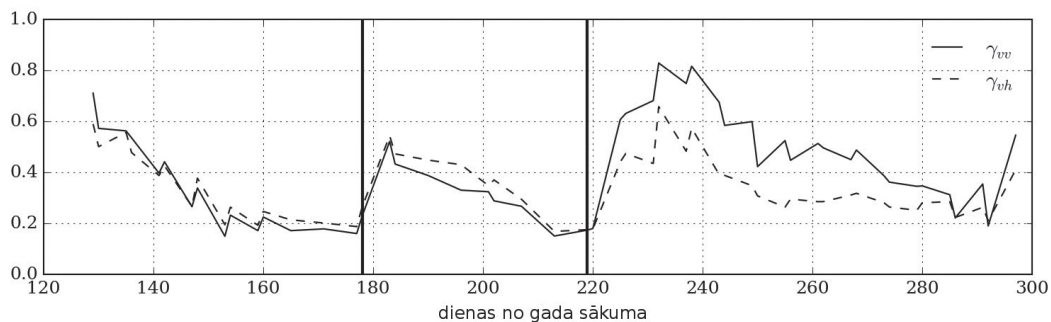
4-42. att. Sakarība starp zāles garumu h un temporālās koherences koeficientu γ_t .



4-43. att. γ_t vērtību signatūras VH (pārtrauktas līnijas) un VV (nepārtrauktas līnijas) polarizācijām.



4-44. att. Temporālās koherences koeficienta γ_t vērtību izmaiņas plaujas (augšējā grupa) un aparšanas (apakšējā grupa) gadījumā. Katra diagramma atbilst vienai nedēļai.



4-45. att. γ_t^{VV} un γ_t^{VH} vērtības vienam zālājam sezonas garumā.

iegūtas plaujas un aparšanas signatūras, kas ietver abu polarizāciju minimālās, maksimālās un mediānas vērtības (4-43. att.). Abu aktivitāšu (plaujas un aparšanas) gadījumos temporālā koherence pieaug pēc aktivitātes veikšanas. VV polarizācijas gadījumos starpība starp γ_t vērtībām pēc un pirms aktivitātes ir lielāka. Izteikti tas redzams aparšanas gadījumā (4-43. att. labās puses attēlā). Mediānas vērtības 4-43. att. aprēķinātas ar vienas dienas soli, sākot ar 30 dienām pirms aktivitātes un beidzot ar 30 dienām pēc aktivitātes.

Ja salīdzina temporālās koherences mediānu vērtības vienu nedēļu pirms un vienu nedēļu pēc aktivitātes (4-44. att.), tad redzams, ka γ_t^{VV} plaujas gadījumā pieaug no 0,17 līdz 0,30, aršanas gadījumā – no 0,16 līdz 0,34.

Otras polarizācijas (VH) gadījumā temporālās koherences mediānu vērtības (γ_t^{VH}) pieaug no 0,18 līdz 0,28 (plauja) un no 0,18 līdz 0,32 (aparšana). Taču 30 dienas pēc plaujas veģetācija ir lielā mērā atjaunojusies, un γ_t vērtības tuvojas vērtībām pirms aktivitātes.

4.45. att. redzamas viena zālāja γ_t^{VV} un γ_t^{VH} vērtības no 1. maija līdz 30. oktobrim. Ar vertikālām līnijām apzīmētas aktivitātes, no kurām pirmā ir plauja, otrā – aršana. Redzams, kā γ_t vērtības pavasarī, zālei augot, samazinās. Tās sasniedz minimālo vērtību pirms aktivitātēm, kad zāle ir visgarākā.

4.6.6. Nobeiguma piezīmes

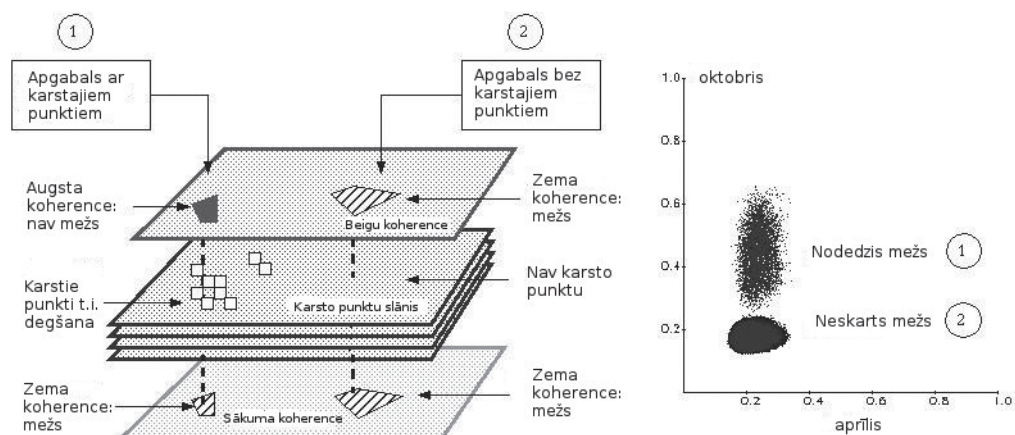
Gan polarimetriskās, gan interferometriskās SAR tālīzpētes tehnoloģijas var izmantot, lai sekmīgi pētītu un novērotu lauksaimnieciskās aktivitātes. Īpaši ērti izmantošanai ir satelīta “Sentinel-1” dati, jo tie tiek iegūti regulāri un ir pieejami par brīvu. Latvijas ģeogrāfiskajam platumam atbilstošajos apstākļos katrās sešās dienās tiek iegūti četri attēli (divi attēlu pāri divās polarizācijās), kas ir izmantojami neatkarīgi no mākoņainības vai citiem laikapstākļiem.

Taču, strādājot ar DInSAR tehnoloģijām, t. i., analizējot temporālās koherences vērtības, jāpievērš uzmanība laikapstākļiem. Ja interferometrisko pāri veidojošajos attēlos mitruma daudzums veģetācijā un augsnē būs ļoti atšķirīgs, koherence būs zema. Tādējādi lietus var “nomaskēt” plauju vai citu lauksaimniecības aktivitāti. Vispārējā gadījumā lietus ietekme uz temporālo koherenci ir ļoti komplicēta. Tā atkarīga no lietus stipruma, augšņu tipa, drenāžas apstākļiem (ko ietekmē lauka slīpums) un citiem parametriem. Viens no vienkāršākajiem problēmas risinājumiem ir izmantot pēc iespējas vairāk attēlu, tādējādi statistiski samazinot lietus radīto efektu ietekmi.

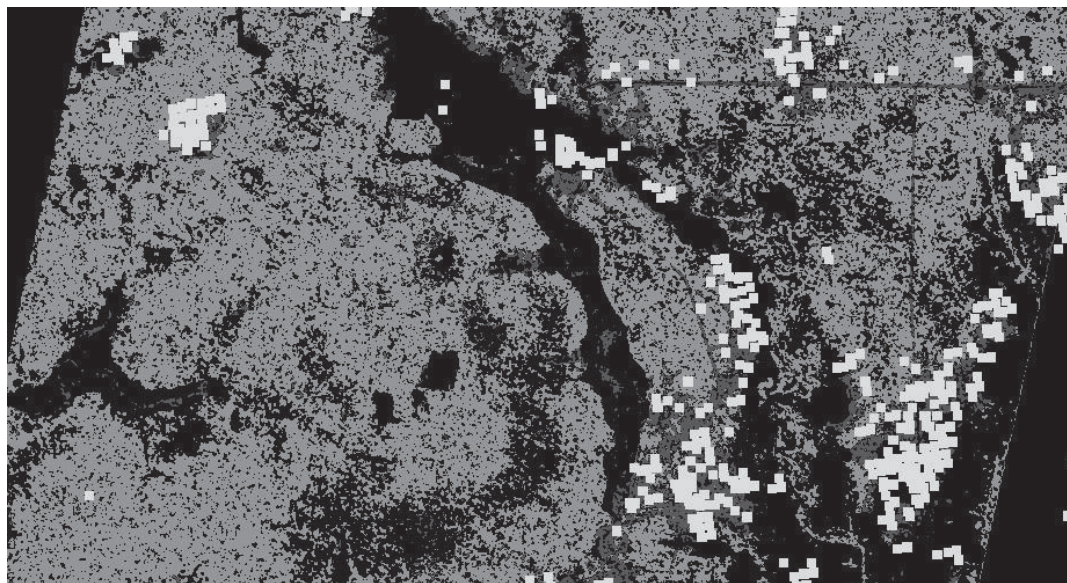
Telpiskajai izšķirtspējai ir liela nozīme daudzos tālīzpētes lietojumos. Analizētajos gadījumos (bet ne tikai) īpaši jāņem vērā, ka koherences koeficientus var aprēķināt, tikai veicot telpisko vidējošanu (gan polarimetriskajā, gan interferometriskajā gadījumā). Piemēram, izmantojot satelīta “Sentinel-1” attēlus, lai iegūtu koherences koeficientu vērtības ar pieņemamu signāla/troksņa attiecību, vidējošanas maska jāizvēlas 5×20 pikselus liela. Tai atbilst aptuveni $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ lieli laukumi uz zemes virsmas, kas nosaka minimālos zālāju izmērus, ko iespējams analizēt, izmantojot “Sentinel-1” datus.

Vēl ir interesanti atzīmēt, ka ļoti līdzīgas metodes un algoritmus izmanto mežu masīvu samazināšanās monitoringos (4-47. att.). Īpaši tas attiecas uz ekvatoriālajiem mežiem, kuri lielāko laika daļu slēpti zem mākoņiem un kuru regulāra apsekošana iespējama tikai ar SAR tehnoloģijām. Mežu masīvi samazinās galvenokārt divu iemeslu dēļ – izciršana

vai mežu ugunsgrēki. Abos gadījumos (līdzīgi kā pēc zālāju pļaujas vai aršanas) izteikti palielinās temporālās koherences koeficienta γ_t vērtība (4-46. att.). Apgabali²⁴ ar augstām temporālās koherences vērtībām (melnie apgabali) nav klāti ar mežiem, apgabali ar zemām (mežiem raksturīgām) koherences vērtībām (pelēkie apgabali), visticamāk, ir klāti ar mežiem, bet apgabali, kuros neilgā laikā temporālās koherences koeficienta vērtības mainījušās no zemas uz augstu (klāti baltiem kvadrātiņiem), ir apgabali, kuros mežs izzudis laika posmā starp interferometrisko pāru epohām. Šeit ar baltajiem kvadrātiņiem atzīmēti t. s. “karstie punkti” (*hot spots*), proti, ar infrasarkanā diapazona optiskajiem sensoriem reģistrēti spēcīga termiskā starojuma avoti, kas liecina par mežu ugunsgrēkiem pētāmajā apgabalā.



4-46. att. Meža ugunsgrēku reģistrēšanas algoritma blokshēma.



4-47. att. Mežu samazināšanās detektēšanas piemērs (DInSAR tehnoloģijas).

²⁴ Attēli attiecas uz Indonēzijas ekvatoriālā meža apgabaliem.

4.7. Citi tālzpētes lietojumi (30. lekcija)

4.7.1. Kopsavilkums

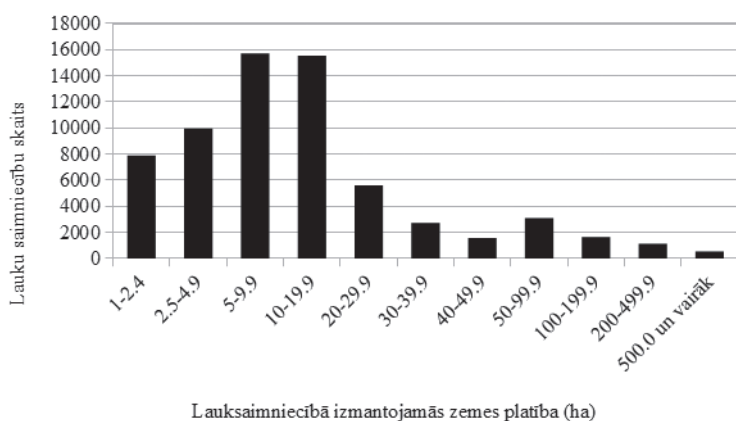
Šajā nodaļā tiks apskatīti vēl citi tālzpētes datu lietojumi, nepiedāvājot konkrētas darbplūsmas. Tās mērķis ir iedvesmot lasītāju, parādot, cik daudz dažādas ģeoinformātikas problēmas un uzdevumus var atrisināt ar tālzpētes palīdzību, īpaši uzsverot multispektrālo datu izmantošanu.

4.7.2. Lauksaimniecība

Saskaņā ar Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datiem par 2016. gadu vidējā lauku saimniecības apsaimniekotā platība ir apmēram 28 hektāri (skat. 4-48. att.). Ar laukkopību kopumā nodarbojās 42,6 % no saimniecību kopskaita, bet ar jauktu augkopību un lopkopību – 14,8 %. Platību ziņā visvairāk tiek sētas tādas tehniskās kultūras kā rapsis un tādas graudaugu kultūras kā ziemas un vasaras kvieši, griķi, rudzi u. c. Ņemot vērā relatīvi nelielo lauku saimniecību izmēru (Amerikas Savienotajās Valstīs vidējais lauku saimniecības izmērs ir 179 ha), Latvijas lauksaimniecībā papildu informācijas ieguvei visizdevīgāk ir izmantot satelītu un dronu datus. Lauksaimniecības vajadzībām ir nepieciešama bieža datu atjaunināšana, un satelītu regulāri sniegtie dati un elastīgā drona lidojumu plānošana spēj nodrošināt gan spektrāli detalizētus, gan augstas telpiskās izšķirtspējas risinājumus.

Klimata pārmaiņas, vides piesārņojums un pieaugošā cilvēku populācija nosaka lauksaimniecībai mērķi saražot aizvien vairāk produkcijas, tajā pašā laikā samazinot saimniekošanas negatīvo ietekmi uz apkārtējo vidi un taupot resursus. Precīzā lauksaimniecība ir potenciāls risinājums ceļā uz šī mērķa sasniegšanu.

Precīzā lauksaimniecība ir saimniekošanas koncepcija, kas ietver moderno tehnoloģiju un metožu izmantošanu, lai pielāgotu lauksaimniecības darbus atbilstoši optimāliem scenārijiem laikā un telpā. Konvencionālās lauksaimniecības ietvaros ļoti bieži visam laukam



4-48. att. Lauku saimniecību iedalījums pēc lauksaimniecībā izmantojamās zemes platības 2016. gadā (Centrālās statistikas pārvaldes dati).

piemēro viena mēslojuma, herbicīdu un pesticīdu devu, tādējādi atsevišķi lauka apgabali var saņemt pārāk daudz vai, tieši pretēji, pārāk maz apstrādes. Īpaši negatīvi gan cilvēka, gan apkārtnes vides veselību var ietekmēt herbicīdu un pesticīdu nepareiza un pārmērīga lietošana.

GPS izmantošana lauksaimniecības tehnikā (traktoros u. c.) ļauj precīzi noteikt tās atbrašanās vietu laukā un piemērot atšķirīgas ķīmikāliju devas atkarībā no augsnes parametriem, auga attīstības procesa fāzes un iespējamām problēmsituācijām. Atšķirīgu devu pielāgošanai izmanto ĢIS atbalstu un informāciju no visdažādākajiem avotiem. Lai noteiktu precīzu lauka apstrādes metodiku, var izmantot iepriekšējo gadu ražas kartes, kartes no sensoriem, kas pievienoti lauksaimniecības tehnikai, augšņu kartes, kā arī tālzipētes datu apstrādes rezultātus.

Daži no tālzipētes datu lietojumiem precīzajā lauksaimniecībā ir:

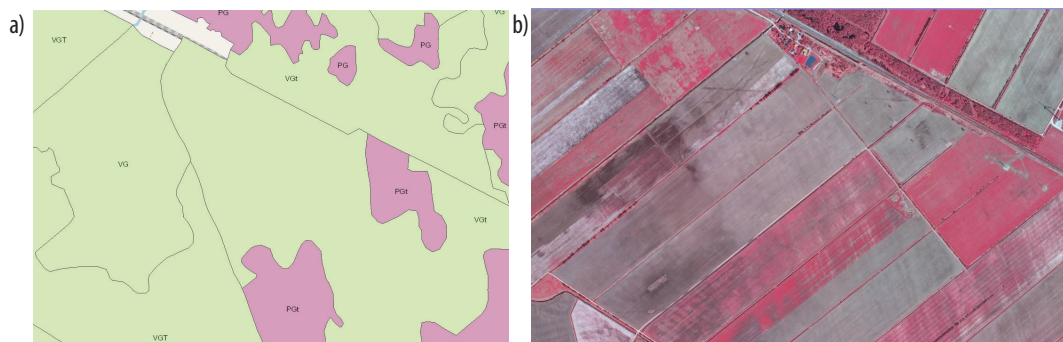
- augsnes parametru kartēšana;
- nepieciešamās mēslojuma un/vai herbicīdu un pesticīdu devas noteikšana;
- nezāļu apjoma un citu problēmsituāciju novērtēšana.

Augsnes kartēšana

Lauksaimniecības augsnes ir viens no galvenajiem resursiem veiksmīgai saimniekošanai. Izvēloties augsnes parametriem atbilstošos kultūraugus un apstrādes metodes, iespējams paaugstināt ražīgumu, tajā pašā laikā novēršot augsnes noplicināšanos.

Latvijā ir izstrādāta augšņu karšu digitālā datubāze, kas ietver digitalizētas Valsts zemes dienesta Centrālajā arhīvā un Latvijas Valsts arhīvā esošās vēsturiskās augšņu kartes. Tajās pieejama informācija par augsnes veidu, kvalitatīvo vērtību un dziļrakumiem. Tālzipētes dati ļauj augsnes parametrus kartēt telpiski detalizētāk, nekā tas ir finansiāli izdevīgi, izmantojot lauka mērījumus (skat. 4-49. zīm). Ortofotokartē redzama augstāka detalizētība nekā augsnes veida kartē, kas var būt saistīts ar dažādiem augsnes parametriem, tādiem kā mitruma līmenis vai augsnes ķīmiskais sastāvs.

Augsnes veida noteikšanā īpaši svarīga ir spektrālā izšķirtspēja. Dažādu ķīmisko elementu klātbūtni var atpazīt pēc to spektrālajām īpašībām dažādās elektromagnētiskā starojuma frekvenču joslās. Aramzemju gadījumā ir izdevīgi pētīt attēlus laika posmā, kad redzama atklāta augsne. Teorētiski augsnes parametrus iespējams novērtēt, arī analizē-



4-49. att. (a) Augsnes veida karte (Latvijas Republikas Zemkopības ministrija); (b) krāsu infrasarkanā ortofotokarte (Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra, 2018).

jot zaļās veģetācijas spektrus, taču tas uzdevumu ievērojami sarežģī. Arī atklātas augsnes spektrālās vērtības ietekmē ne tikai augsnes veids, bet vēl citi augsnes un atmosfēras parametri: augsnes tekstūra, mitruma līmenis, organisko vielu un dzelzs oksīda klātbūtne augsnē.

Ir pieejamas vairākas zemes virsmu veidojošo materiālu spektru bibliotēkas, piemēram, *ASTER* spektrālā bibliotēka, kas ietver vairāk nekā 2000 dažādu materiālu spektrālās signatūras. Pikseļa spektrālās vērtības ar datorizēto metožu palīdzību var salīdzināt ar bibliotēkas signatūrām un izvēlēties vislīdzīgāko.

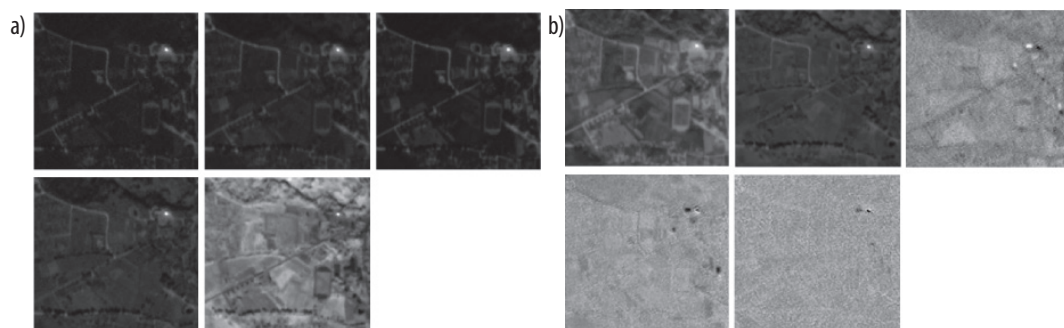
Augsnes tekstūras noteikšanā noderīgi ir termālie dati, jo augsnes tekstūra būtiski ietekmē augsnes mitruma līmeni, tādējādi ietekmējot virsmas temperatūru. Līdzīgi apsvērumi ļauj novērtēt arī meliorācijas sistēmu efektivitāti. Meliorācijas cauruļu atrašanās vietās augsne izžūst ātrāk, un virsmas temperatūra izmainās, ko arī var novērot termālajos attēlos, ja to telpiskā izšķirtspēja ir pietiekami augsta [110].

EMS refleksiju no augsnes būtiski ietekmē temporālie aspekti, piemēram, mitruma līmeņa izmaiņas, tāpēc kvalitatīvai augsnes kartēšanai ieteicams izmantot tālzipētes attēlu laika rindas efektīvai mainīgo un stabilo efektu atdalīšanai. Vācijas zinātnieki to paveica, apvienojot piecus *RapidEye* satelītattēlus multitemporālā attēlā ar 25 slāņiem (katram *RapidEye* satelītattēlam ir piecas frekvenču joslas) un izmantojot galveno komponentu transformāciju [81].

Galveno komponentu transformācija (skat. [23]) ļauj samazināt informācijas atkārtosanos multispektrālajos datos. Apskatot 4-50. att. (a), var jau vizuāli novērtēt, ka dažādu frekvenču joslu attēli izskatās ļoti līdzīgi. Tātad tajos ir līdzīga informācija, kas palielina datu daudzumu, bet nesniedz jaunas zināšanas. Datu dimensionalitātes samazināšana tiek sasniegta, transformējot korelētos datus uz jaunu datu kopu (t. s. galvenajām komponentēm), kas ir savstarpēji nekorelētas un sakārtotas tā, ka pirmās galvenās komponentēs ir nozīmīgākā informācija, kas ir pieejama oriģinālajos attēlos.

4-50. (b) att. redzams, ka pirmā galvenā komponente ietver visnozīmīgāko attēlu informāciju, savukārt pēdējās komponentes pārsvarā atbilst troksnim attēlos vai sīkām, maznozīmīgām detaļām.

Tātad laikā stabils augsnes kartējums iespējams, izmantojot pirmās galvenās komponentes, bet mainīgās teritorijas novērojamas augstākas kārtas galvenajās komponentēs.



4-50. att. (a) *RapidEye* piecu frekvenču joslu attēlu paraugi; (b) *RapidEye* attēla parauga piecu galveno komponentu attēli.

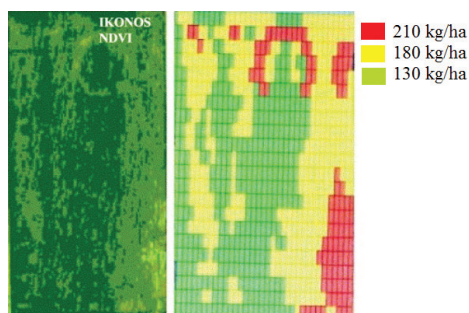
Mēslojuma un miglošanas precīza lietošana

Precīzajā lauksaimniecībā īpaša nozīme ir droniem, izmantojot to iegūtos datus, var nodrošināt telpiski detalizētas lauku kartes. Dronu datu ieguve ir neinvazīva metode, kas sējumus negatīvi neietekmē. Datu analīzi iespējams veikt datorizēti, tādējādi maksājot tikai par skaitļošanas laiku, nevis eksperta darbu. Rezultātā iegūtās lauku kartes var plaši izmantot vairākas ieinteresētās personas (gan zemnieki, gan kontrolējošās institūcijas).

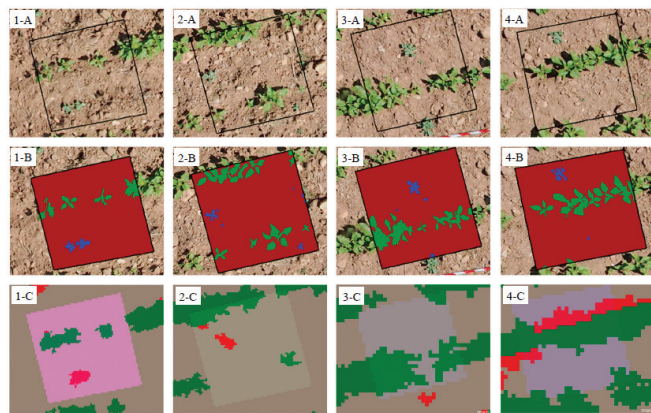
Arī Latvijā un citās Baltijas valstīs tiek piedāvāti dronu lidojumu pakalpojumi, kuru galvenais galaprodukts ir veģetācijas indekss NDVI, kas tiek pārveidots biomasas, slāpekļa nodrošinājuma, augu viendabības un citās kartēs.

Veģetācijas indekss, kas noteikts, izmantojot drona datus, pētījumos ir uzrādījis labu korelāciju ar veģetācijas indeksa mērījumiem, izmantojot instrumentus uz zemes [152]. NDVI pēc būtības raksturo lapu atstarojumu, kas korelē ar slāpekļa koncentrāciju augu zaļajā masā. Konstruējot regresijas sakarības starp NDVI un slāpekļa koncentrācijas laukā mērījumiem, iespējams izveidot precīzas slāpekļa mēslojuma devu kartes, kā redzams 4-51. att. Mēslojuma lietošana saskaņā ar šīm kartēm ļauj iegūt optimālu ražu, samazinot izmaksas un pasargājot apkārtējo vidi no piesārņojuma.

Dronu izmantošana nezāļu kartēšanai plašāk ir pētīta saulespuķu un kukurūzas sējumos. Saulespuķu sējumos pētījumi uzrāda daudzsološus rezultātus, sasniedzot pat 91 %



4-51. (a) att. Slāpekļa mēslojuma precīza lietojuma karte, izmantojot normalizētās starpības veģetācijas indeksa analīzi [143].



4-51. (b) att. Pirmajā rindā redzami saulespuķu sējumu drona uzņēmumi, otrajā rindā – manuāli klasificēti atbalsta dati, trešajā rindā – dažādu algoritmu lietošanas rezultāti [131].

precizitāti nezāļu identifikācijā, ko būtiski ietekmē attēla telpiskā izšķirtspēja un augu izmērs attēlu ieguves laikā. Metodes pārsvarā ir balstītas uz zaļās veģetācijas un augsnes segmentāciju, kam seko kultūraugu un nezāļu atpazīšana, izmantojot gan attēlu spektrālās īpašības, gan augu novietojumu attiecībā pret sējumu rindām.

Augsnes un veģetācijas klasifikācijai var izmantot spektrālos indeksus, kas palīdz uzsvērt atšķirības starp abu materiālu spektrālajām signatūrām. Šādam mērķim var izmantot jau zināmo NDVI vai kādu citu veģetācijas indeksu. Pēc tam indeksa attēlu pārveido binārajā attēlā, izmantojot t. s. Otsu sliekšņošanas metodi. Otsu metode ir ļoti populāra attēlu binarizācijā, jo tā ļauj noteikt efektīvu sliekšņa vērtību.

Pētījumā [131] augu rindas tika noteiktas, secīgi sadalot attēlu dažādas orientācijas līnijās, sākot no leņķa 0° un beidzot ar 180° . No visiem leņķiem izvēlamies to, pie kura katrā līnijā ir maksimālais zaļās veģetācijas nasegums. Pēc augu rindu noteikšanas var klasificēt, ka visi augi rindas ietvaros ir kultūraugi, bet visi augi ārpus rindām ir nezāles.

Nezāļu lokalizācijas uzdevums Latvijas graudaugu kultūrām ir sarežģītāks tā vienkāršā apstākļa dēļ, ka tādu graudaugu kā kviešu vai rudzu stādi ir mazāka izmēra un ne vienmēr izvietoti perfekti atšķiramās līnijās ar ievērojamām atstarpēm starp līnijām. Līdz ar to, izmantojot drona datus Latvijas laukos, jānodrošina pietiekami augsta telpiskā izšķirtspēja un jāizvēlas piemērotākas datu apstrādes metodes, piemēram, konvolūcijas neironu tīkli.

Sējumu un kultūru identifikācija

Graudaugu kultūrām ir raksturīgas straujas pikseļu spektrālo vērtību izmaiņas laikā, tādēļ klasiskie mašīnmācīšanās algoritmi ir jāapmāca katram vienā laikā iegūtam attēlam atsevišķi. Attīstoties dziļās apmācības un neironu tīklu metodēm, ir izstrādātas neironu tīklu modifikācijas, kas ir īpaši piemērotas laika rindu analīzei: paplašinātie īstermiņa atmiņas neironu tīkli *LSTM*²⁵.

LSTM tīkls ir rekurento neironu tīklu paveids. Rekurentie neironu tīkli aprēķinos izmanto ne tikai konkrēto datu paraugu, bet arī iepriekšējo informāciju. Lauksaimniecības kultūru atpazīšanai šādā veidā var efektīvi izmantot temporālo informāciju [140], piemēram, lejupielādēt multispektrālo satelītattēlu laika rindu, un katru kultūru klasificēt nevis pēc viena datuma spektrālajām vērtībām, bet gan pēc spektrālo vērtību izmaiņām laikā.

Ražas prognozēšana

Ražas prognozēšana ir būtiska ne tikai precīzajā lauksaimniecībā, bet arī plaša mēroga monitoringam, lai laikus prognozētu situāciju tirgos un iespējamās problēmas dažādos reģionos.

Plaša mēroga ražas prognozēm var izmantot multispektrālos satelītattēlus. Ja plaša mēroga sējumu bojājumi ir konstatējami pēc spektrālajām atšķirībām, tad precīzāku ražas prognožu ieguvei ir nepieciešami ievērojama apjoma atbalsta dati vai komplikētas darbplūsmas. Ražas prognožu sagatavošanai ir jāzina, kādas kultūras aug konkrētajās teritorijās. Daudzām graudaugu šķirnēm raža korelē ar fotosintēzes aktivitāti noteiktos laika posmos, tādēļ arī ražas prognozēm bieži izmanto regresijas sakarības starp veģetācijas

²⁵ *LSTM* – Long Short-Term Memory.

indeksiem un ražu apjomu [137]. Precīzākai modelēšanai izmanto graudaugu augšanas modeļus, kas ietver arī tādus papildu parametrus kā meteoroloģiskie apstākļi un augsnes parametri.

4.7.3. Ūdens resursu monitorings

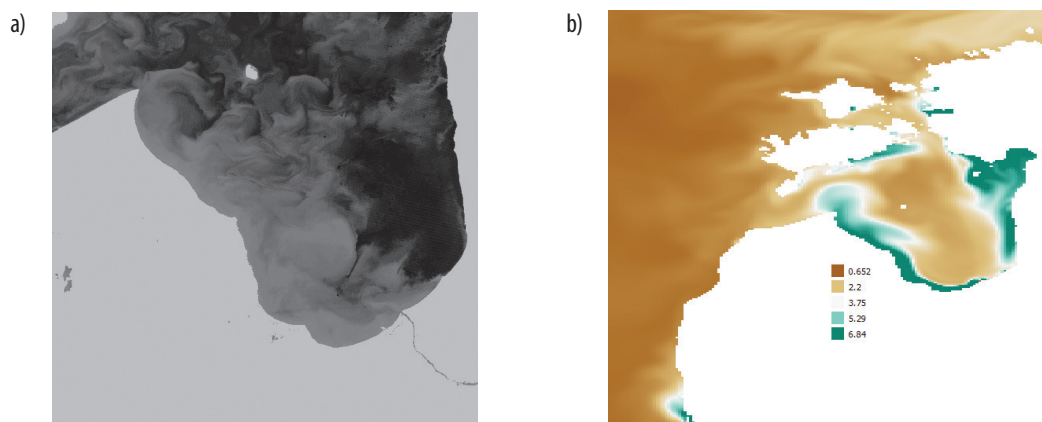
Apmēram 71 % Zemes virsmas klāj ūdens. Vidējas un zemas telpiskās izšķirtspējas satelītattēlu izmantošana ir piemērots risinājums plaša mēroga ūdens kvalitātes un parametru kartēšanai.

Satelītattēli termālajā diapazonā ļauj novērot ūdens objektu sasilšanas un atdzišanas procesus, kā arī pētīt globālās sasilšanas tendences. Termālie attēli pēc vizuālā uzlabojuma metožu lietošanas ir intuitīvi viegli analizējami, taču sasaiste starp reālajiem temperatūras mērījumiem, izmantojot lauka instrumentus, un temperatūru, ko var aprēķināt no satelītattēliem, prasa rūpīgu atmosfēras apstākļu analīzi un datu kalibrāciju (skat. 1.7.6. sadaļu).

4-52. (a) att. redzams Rīgas jūras līča termālais “LANDSAT-8” TIRS satelītattēls, kam lietota kontrasta uzlabošana ūdens teritorijām atbilstošajos attēla apgabalos. Novērojams, kā līcī ieplūst siltāks ūdens no Daugavas, un var secināt, ka pūš austrumu vējš, jo siltākais ūdens ir sadzīts līča rietumu piekrastē.

Hlorofila koncentrācija (mg/m^3) raksturo fitoplanktona klātbūtni, kas, no vienas puses, ir viens no nozīmīgākajiem barības avotiem jūrās un okeānos, bet, no otras puses, norāda arī uz pastiprinātu aļģu attīstību piesārņojuma ietekmē. Hlorofils maina ūdens spektrālo signatūru, tādēļ visbiežāk hlorofila noteikšanas algoritmi ir balstīti uz regresijas sakarību noteikšanu starp hlorofila koncentrācijas mērījumiem uz zemes un datiem no satelītattēlu spektrālajām joslām vai to kombinācijām.

Līdzīgi kā temperatūras novērtējumos, arī hlorofila mērījumi var būtiski atšķirties no atbalsta mērījumiem, ko iespējams daļēji izskaidrot arī ar atšķirīgo mērogu, kādā tiek veikta satelītattēla ieguve un kādā – atbalsta mērījumi [134]. Ideālā situācijā būtu jānodrošina, lai attēlu un atbalsta mērījumu ieguve notiktu vienā un tajā pašā laikā [105]. Augstāku



4-52. att. (a) “LANDSAT-8” TIRS termālais satelītattēls, kam veikta kontrasta uzlabošana; (b) Copernicus programmas hlorofila koncentrācijas novērtējuma karte Baltijas jūrai un Rīgas jūras līcim.

precizitāti uzrāda algoritmi, kas ir pielāgoti datu ieguves sezonai un pētāmajam apgabalam [120].

Copernicus ģeogrāfisko datu programma piedāvā lejupielādēt jau sagatavotas hlorofila (skat. 4-52. (b) att.) un citu parametru kartes, kas iegūtas, veicot satelīta “*Sentinel-3*” datu apstrādi. Baltijas jūra ir uzskatāma par gana komplicētu teritoriju, tai raksturīgi optiski sarežģīti apstākļi piekrastes zonā un augsta ūdens duļķainība. Tādēļ *Copernicus* programmā iekļautajai darbplūsmāi *C2RCC* būtu nepieciešama papildu apmācība tieši Baltijas jūrai.

Bez hlorofila koncentrācijas vēl tiek novērtēti tādi lielumi kā ūdens sāļums, jūras ledus parametri, suspendēto un organisko vielu koncentrācija, kā arī citi raksturlielumi.

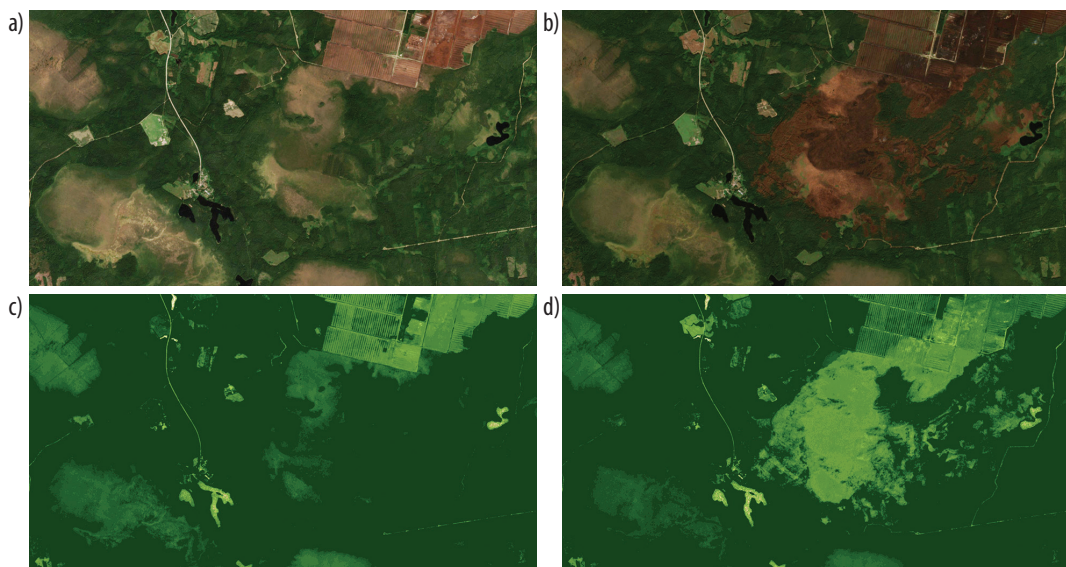
4.7.4. Dabas katastrofu monitorings

Dabas katastrofu gadījumos ir nepieciešama ātra informācijas ieguve par cietušajām teritorijām glābšanas plānu izveidei un īstenošanai, savukārt pēc katastrofas tālīzpēte var palīdzēt novērtēt notikušās izmaiņas zemes pārsegumā.

Ugunsgrēki

Multispektrālajos attēlos ugunsgrēka laikā var novērot dūmus, bet specifiska informācija par degošo platību var nebūt redzama. Savukārt pēc ugunsgrēka ar multispektrālo attēlu palīdzību var novērtēt cietušās teritorijas apjomu. Rastra attēlos pilnībā var novērot izmaiņas zemes pārsegumā, ko reģistrēt lauka mērījumu procesā ir gana laikietilpīgi.

2018. gada vasarā Valdgales pagasta kūdras un meža ugunsgrēka attīstības un seku novērošanā tika izmantoti *Copernicus* programmas ārkārtas situāciju pārvaldības pakalpojuma dati. Ugunsgrēkā kopā izdega aptuveni 1000 hektāru, kas gan ir mazāk par Latvijas “re-



4-53. att. “*Sentinel-2*” satelītattēli pirms un pēc postošā ugunsgrēka Valdgales pagastā: (a), (b) dabisko krāsu attēls, (c), (d) normalizētās starpības veģetācijas indekss.

kordistu” Bažu purva ugunsgrēku 1992. gadā, kad izdega 3000 hektāru. 4-53. att. redzams ugunsgrēka apgabals pirms ugunsgrēka, ugunsgrēka laikā un pēc tā.

Ugunsgrēka sekas analizē, pētot izdegušās teritorijas apjomu un izmaiņas zemes pārsegumā. Izdegušo teritoriju visbiežāk kartē, pētot spektrālās izmaiņas attēlos pirms un pēc ugunsgrēka. Savukārt viena attēla ietvaros izdegušo teritoriju spektrālo atšķiramību var novērtēt, izmantojot dažādus multispektrālo attēlu indeksus, piemēram, normalizētās starpības veģetācijas indeksu NDVI un normalizētās starpības izdegušo teritoriju indeksu NBR^{26} . NBR aprēķina:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (4.19.)$$

kur NIR – tuvā infrasarkanā starojuma frekvenču joslas attēls;

$SWIR$ – īso viļņu infrasarkanā starojuma frekvenču joslas attēls.

Augsta NBR vērtība liecina par veselīgas veģetācijas klātbūtni pētāmajā teritorijā, zema vērtība – uz atklātu augsni vai izdegušu teritoriju.

Ugunsgrēku mežu teritorijās riska mazināšanas pasākumu izstrādē tālizpēte var palīdzēt ar degmateriāla karšu izstrādi. Ugunsgrēka risku nosaka tādi parametri kā degmateriāla mitruma līmenis, biomasa, horizontālais un vertikālais materiāla izvietojums. Šos parametrus kartē ar mašīnmācīšanās algoritmu palīdzību un augstāku precizitāti iespējams sasniegt, apvienojot multispektrālos un lidara datus, jo lidars sniedz informāciju par pētāmā apgabala trīsdimensionālo struktūru, kas ir īpaši svarīga ugunsgrēku modelēšanai.

Vētras

2005. gada 8.–9. janvārī Latviju skāra viens no postošākajiem orkāniem pēdējā pusgadsimta laikā. Ventspīlī maksimālais vēja ātrums sasniedza 40 metrus sekundē, atstājot pilsētu bez elektroapgādes. Orkāns nopostīja apmēram 16 000 hektāru mežaudžu, bojātās koksnes apmēram sasniedzot 7,4 miljonus kubikmetru [146].

Vidējas telpiskās izšķirtspējas satelītattēlos šādi ievērojami, taču nehomogēnas struktūras bojājumi var būt grūti analizējami jaukto pikseļu problemātikas dēļ (skat. 2.2.6. sadaļu). Kvalitatīvi noderīgāki ir augstas telpiskās izšķirtspējas dati, kuros iespējams veikt



4-54. att. “Formosat-2” multispektrālie satelītattēli pirms un pēc vētras “Klauss” 2009. gadā Francijas dienvidrietumos [88].

26 NBR – Normalized Burn Ratio.

izmaiņu analīzi ne tikai pikseļu, bet jau objektu līmenī. Objektos balstīta attēla analīze nozīmē to, ka pirms klasifikācijas metožu lietošanas attēlu segmentē līdzīgas tonalitātes un tekstūras reģionos. Katru no šiem reģioniem uzskata par apstrādājamo vienību, ko klasificē atsevišķu pikseļu vietā.

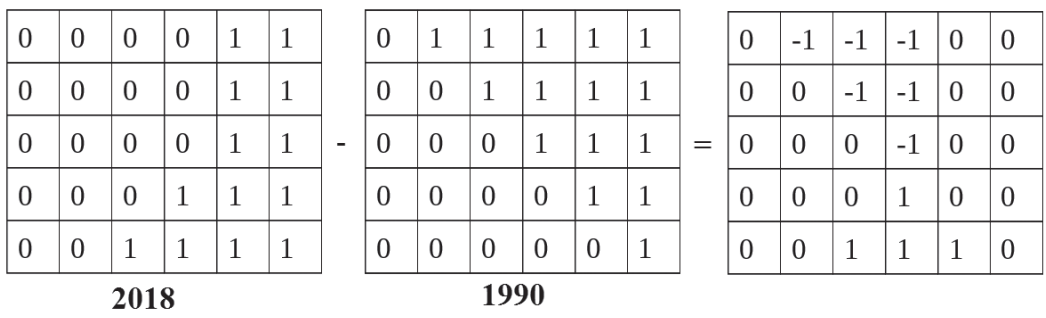
Krasta erozija

Jūras krasta erozija notiek gan dabisku faktoru ietekmē (vētras), gan cilvēka darbības rezultātā (būvniecība piekrastes akvatorijā un uz tuvējās sauszemes). Latvijā krasta erozija skar aptuveni 65 % jūras krasta līnijas [114].

Regulāri iegūstamie satelītattēli var būt telpiski detalizēts informācijas avots par krasta līnijas izmaiņām laika gaitā.

Turpmāk raksturota krasta līniju izmaiņu noteikšanas metodika.

1. Jānodrošina precīza dažādos laika periodos iegūtu attēlu reģistrācija, lai novērstu izmaiņas, kas ir saistītas tikai ar attēlveides sistēmas darbību. Manuāli attēlu ģeometriskās korekcijas var veikt, izmantojot zemes atbalsta punktus, kas atbilst cilvēka veidotiem objektiem piekrastes zonas tuvumā. Automatizēti attēlu koreģistrāciju var veikt, izmantojot šķērskorelācijas aprēķinus, lai noteiktu labāku sakritību starp diviem attēliem. Attēlu reģistrācijas precizitātes aprēķiniem vislabāk noder mākslīgi veidotas krasta līnijas, ko mazāk ietekmē epizodiskas ūdens līmeņa svārstības.
2. Katrā attēlā jāidentificē krasta līnijai piederošie pikseļi. Krasta līniju definē kā sašķares zonu starp ūdens un sauszemes teritorijām. Tās noteikšanā īpaša nozīme ir infrasarkanās frekvenču joslas attēliem, jo šajā elektromagnētiskā starojuma diapazonā ūdenim raksturīga relatīvi spēcīga absorbcija. Krasta līnijas noteikšanai iespējams izmantot visdažādākās metodes, sākot no vienkāršiem risinājumiem, tādiem kā spektrālo indeksu sliekšņošana vai malu noteikšana, un beidzot ar mašīnmācīšanās algoritmu lietojumiem.
3. Tālāka krasta līnijas detalizācijas pakāpe ir atkarīga no izmantoto attēlu telpiskās izšķirtspējas. Ja nepieciešams, tad līnijas formu iespējams matemātiski izlīdzināt.
4. Ja jānosaka tieši krasta līnijas izmaiņas, tad vienkāršākā pieeja izmaiņu notiekšanai ir attēlu atņemšana. Ja divos dažādos laika periodos iegūtiem attēliem aprēķina ūdens teritoriju maskas (ar "1" apzīmējot ūdens teritorijas, ar "0" – visas pārējās), tad šo masku starpība raksturo ūdens teritoriju izmaiņas. Negatīva starpība parāda

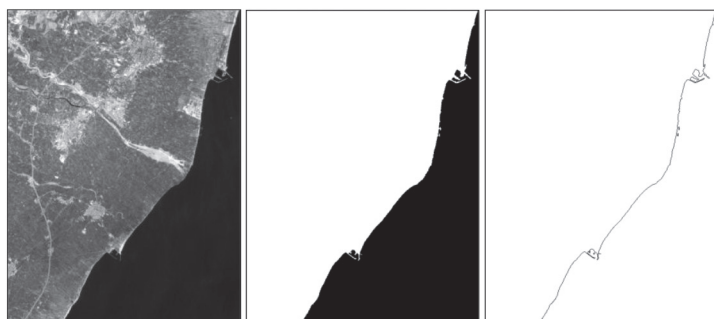


4-55. att. Izmaiņu noteikšana, izmantojot attēlu atņemšanu.

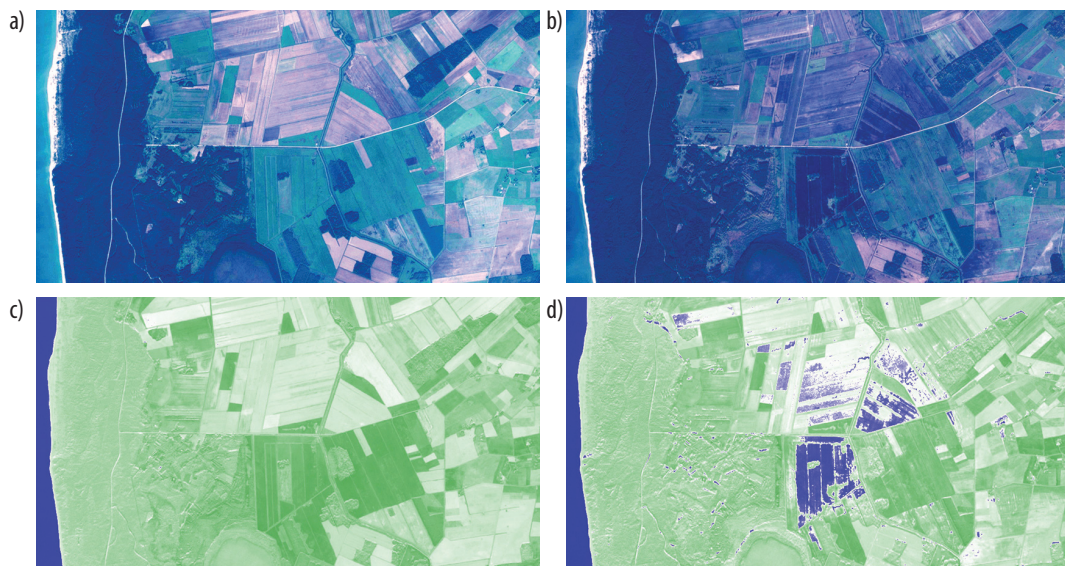
krasta līnijas atkāpšanos, pozitīva starpība liecina par depozītu veidošanos (skat. 4-55. att.). Taču var kartēt arī atšķirības starp jau izkorigētām līniju formām vektorformātā.

5. Jāņem vērā, ka krasta līnijai ir raksturīgas sezonālas un epizodiskas izmaiņas, taču erozijas tendenču novērtēšanai ir būtiska galvenā tendence. Šādas dabiskās svārstības var izslēgt, izmantojot vairākus satelītattēlus gadā un aprēķinot vidējo krasta līniju.

Līdzīgu metodiku var lietot applūdušu teritoriju kartēšanai plūdu gadījumā. Multi-spektrālo datu lietojumu gan ierobežo mākoņu nose gums, tādēļ uzdevumu daudz efektīvāk iespējams veikt, izmantojot radara datus (skat. 4.5. nodaļu). 4-57. att. redzamas applūdušas lauksaimniecības zemes 2017. gada spēcīgo lietavu ietekmē.



4-56. att. Krasta līnija, kas noteikta, izmantojot "LANDSAT" TM sensora datus [130].



4-57. att. "Sentinel-2" satelītattēli pirms un pēc plūdiem Ventspils novadā: (a), (b) dabisko krāsu attēls, (c), (d) normalizētās starpības ūdens indekss.

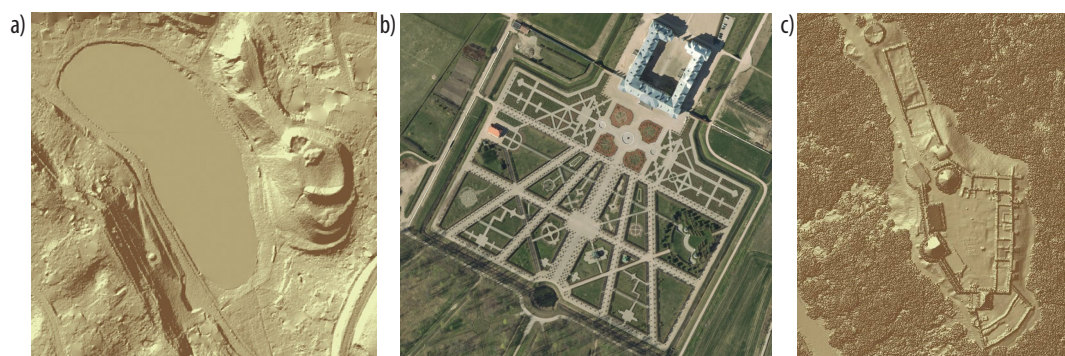
4.7.5. Arheoloģija

Arheoloģija ir vēstures zinātņu nozare, kas pēti seno tautu dzīvesveidu un kultūru pēc arheoloģiskajos izrakumos iegūtajiem materiāliem. Tālīzpētes tehnoloģijas var piedāvāt unikālu papildu informāciju par arheoloģiskajiem pieminekļiem.

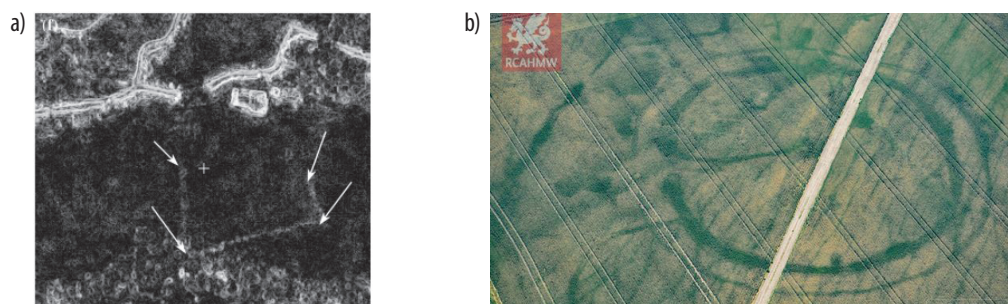
Tālīzpētes aspektā arheoloģiskos pieminekļus var iedalīt redzamajās struktūrās virs zemes un struktūrās zem zemes. Šāds iedalījums var šķist triviāls, taču tas ietekmē tālīzpētes datu izvēli un datu apstrādes metodes. Par redzamajām struktūrām var uzskatīt vēsturiskās celtnes, drupas un reljefa struktūras, tādas kā pilskalns, grāvji un seno ceļu struktūras. Reljefa izpētē īpaša nozīme ir lidara datiem, kas ļauj kartēt mikroreljefu arī zem koku vainagu naseguma. Savukārt aerofotogrāfijas atvieglo liela mēroga objektu kartēšanu, kaut vai analizējot šos datus vizuāli (skat. 4-58. att.).

Mikroreljefu iespējams pētīt arī redzamās gaismas attēlos, pievēršot uzmanību ēnu rakstam pie zema Saules augstuma leņķa. Parasti aerofotografēšanu cenšas veikt tā, lai ēnu efekti ir pēc iespējas mazāki, tāpēc vispārēja lietojuma aerofotogrāfijas var nebūt piemērotas.

Pazemes struktūru piemēri ir apraktas celtnu drupas, kanālu un dīķu sistēmas, kā arī ceļi. Šādas arheoloģiskās atradnes multispektrālajos attēlos iespējams identificēt pēc īpašām iezīmēm augsnē un veģetācijā. Augsnes iezīmes nozīmē augsnes krāsas un tekstūras parametru izmaiņas.



4-58. att. (a) Talsu ezera un pilskalns digitālais reljefa modelis, (b) Rundāles pils un parks dabisko krāsu ortofotokartē, (c) Turaidas pils digitālais virsmas modelis (Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra, 2018).



4-59. att. (a) Viduslaiku klostera daļējas kontūras NDVI attēlā, lietojot malu detektēšanu [117]; (b) romiešu villas kompleksa elementi dabisko krāsu aerofotogrāfijā [115].

Daudzi pētījumi ir saistīti tieši ar veģetācijas, īpaši labības laukos, iezīmju izpēti. Nelielā dziļumā esošie arheoloģiskie objekti var ietekmēt augu augšanas apstākļus, izmainot augšnes ķīmisko sastāvu vai mitruma līmeni. Līdz ar to arheoloģisko objektu teritorijās augi izskatās citādi nekā blakus apgabalos izmēru un tonalitātes ziņā.

4-59. (a) att. redzams apstrādes metožu lietojums *QuickBird* satelītattēlam no kāda viduslaiku klostera pētījumiem. *QuickBird* satelītattēla multispektrālo joslu telpiskā izšķirtspēja (2,88 m/pikseli) tika uzlabota, izmantojot panhromatisko joslu un pēc malu detektora lietošanas gan tuvā infrasarkanā, gan veģetācijas indeksa NDVI attēlam, tika meklēti regulāri raksti, kas atbilstu viduslaiku ciemata atliekām.

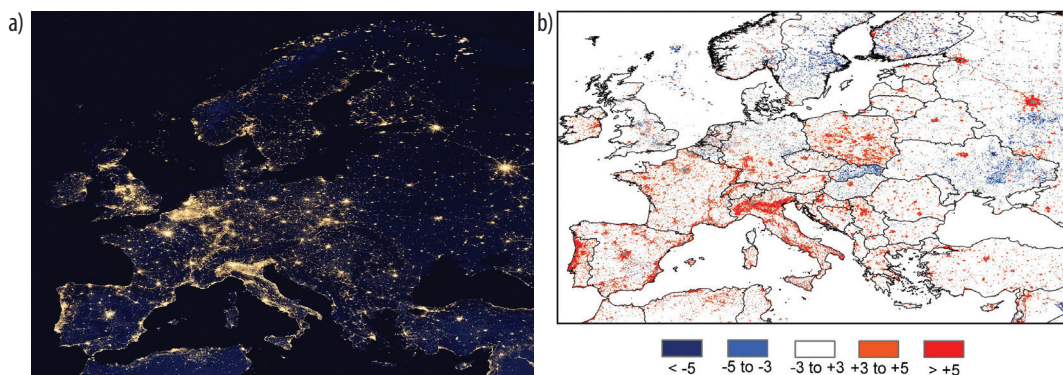
Savukārt 4-59. (b) att. aerofotogrāfijā redzamas senas romiešu villas paliekas Velsā. Karstuma vilnis 2018. gada vasarā bija nopietns pārbaudījums zaļajai veģetācijai, taču aerofotografēšana šajā laikā ļāva pamanīt daudzus iepriekš nekonstatētus vēstures pieminekļus. Seno nocietinājumu grāvju vietās augiem pieejami bagātīgāki barības vielu un ūdens krājumi, tādēļ tur tie ir veselīgāki un zaļāki, veidojot pamanāmas zīmes lauksaimniecības zemēs.

4.7.6. Nakts attēlu izmantošana

Satelītattēli, kas iegūti diennakts tumšajā periodā (skat. 4-60. (a) att.), sniedz unikālu iespēju izpētīt mākslīgā nakts apgaismojuma telpisko sadalījumu, kas ļauj analizēt gaismas piesārņojumu, ekonomiskās aktivitātes, apdzīvotības blīvumu un sadalījumu, urbanizācijas tendences, potenciālās gāzu emisijas un citus faktorus.

Viens no satelītu instrumentiem, kas ļauj iegūt nakts satelītattēlus, ir *Suomi NPP*. Šis satelīts atkārtoti novēro vienu un to pašu vietu uz zemes plkst. 01.30 un 13.30. Satelīta instrumentā, kas veic datu iegūvi redzamās gaismas un tuvā infrasarkanā diapazonā, ir iestrādāta īpaša frekvenču josla nakts attēlu ieguvei ar paaugstinātu jutību. Frekvenču joslas centrs ir 700 nm, un tā ir 400 nm plata, tātad tā ir ļoti plata frekvenču josla maksimālai enerģijas koncentrēšanai signālā.

Lielbritānijas zinātnieki veica nakts attēlu apkopošanu un precīzu kalibrāciju, lai izpētītu mākslīgā nakts apgaismojuma izmaiņas laika posmā no 1995. līdz 2010. gadam. Rezul-



4-60. att. (a) Eiropas nakts satelītattēls (*NASA* attēls); (b) apgaismojuma izmaiņas no 1995.–2000. gada līdz 2005.–2010. gadam. Pozitīvas vērtības parāda apgaismojuma pieaugumu, negatīvas vērtības – tā samazinājumu [80].

tāti liecināja, ka Eiropas mērogā gaismas piesārņojums ir pieaudzis (skat. 4-60. (b) att.).

Gaismas piesārņojums ietekmē ne tikai cilvēku labsajūtu un veselību, bet arī apkārtējo ekosistēmu. Pētījums Vidusjūras krastos parādīja, ka eksistē sakarības starp apdraudētu jūras bruņurupuču ligzdošanas vietu un mākslīgā nakts apgaismojuma telpisko sadalījumu [125].

Neparastāks nakts attēlu lietojums ir bioluminiscences fenomenu detektēšana plašā mērogā. Vairāki tropisko ūdeņu iemītņieki, tādi kā noteiktas baktērijas, koraļļi, moluski un galvkāji, emitē nelielu starojumu redzamās gaismas diapazonā. *DMSP/OLS* instruments 1995. gada vasarā pie Somālijas krastiem ļāva reģistrēt šādu fenomenu 15 000 km² platībā, un tā eksistenci apstiprināja arī jūrnieki.

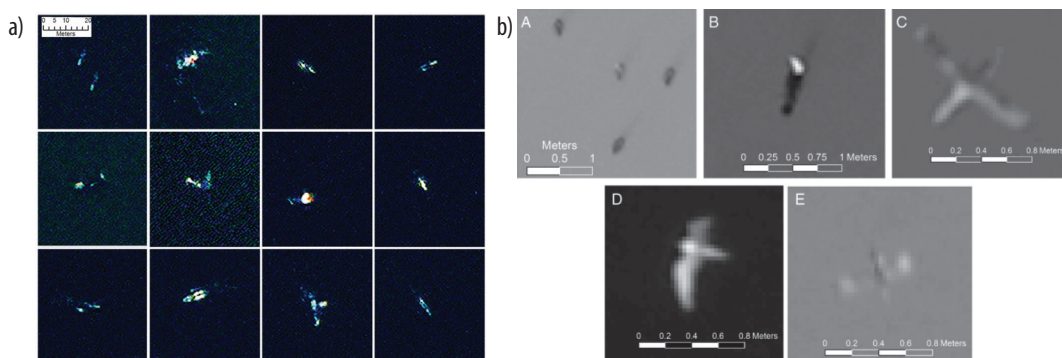
4.7.7. Dzīvās dabas monitorings

Savvaļas dzīvnieku populācijas novērtēšanā iespējams izmantot aerofotogrāfijas no lidmašīnām vai bezpilota lidaparātiem un dažos gadījumos pat satelītattēlus. Redzamās gaismas attēlu izmantošanu ierobežo telpiskā izšķirtspēja, un pētāmajai teritorijai ir jābūt gana atklātai, bez koku vainagu naseguma, lai dzīvniekus attēlos vispār varētu saskatīt.

4-61. (a) att. redzami automatizētas vaļu identifikācijas rezultāti, izmantojot *WorldView-3* satelītattēlus. *WorldView-3* augstā telpiskā izšķirtspēja un īpaša frekvenču josla piekrastes teritoriju izpētei ļauj saskatīt objektus arī nelielā dziļumā zem ūdens virsmas. Pētījumā 113 km² plašā apgabalā tika identificēti 55 vaļi.

Dzīvnieku identifikācijai izmanto arī termālās kameras, kuru attēlos novērojams kontrasts starp dzīvnieku siltajiem ķermeņiem un apkārt esošo zemes pārsegumu. Ja telpiskā izšķirtspēja nav pietiekami augsta, tad dzīvnieku noteikšana, izmantojot tikai vienu attēlu, bieži ir neprecīza, jo attēlos saskatāmi arī citas izcelsmes “siltie punkti”.

Augstāku precizitāti nodrošina vairāku termālo attēlu apstrāde, kas iegūti ar salīdzinoši nelielu laika intervālu, piemēram, 10 minūšu intervālu. Vienkārša pieeja būtu pārveidot termālo attēlu uz bināro attēlu, atlasot tikai siltos apgabalus. Ja viens un tas pats objekts dažādos laika periodos iegūtu termālo attēlu binārajās maskās atrodas vienā un tajā pašā vietā, tad pieņem, ka tas nav dzīvnieks. Šādā veidā dzīvnieku klasei pievieno arī automašīnas un cilvēkus, ko attēlos var filtrēt, balstoties uz binārā objekta formu un izmēru. [129]



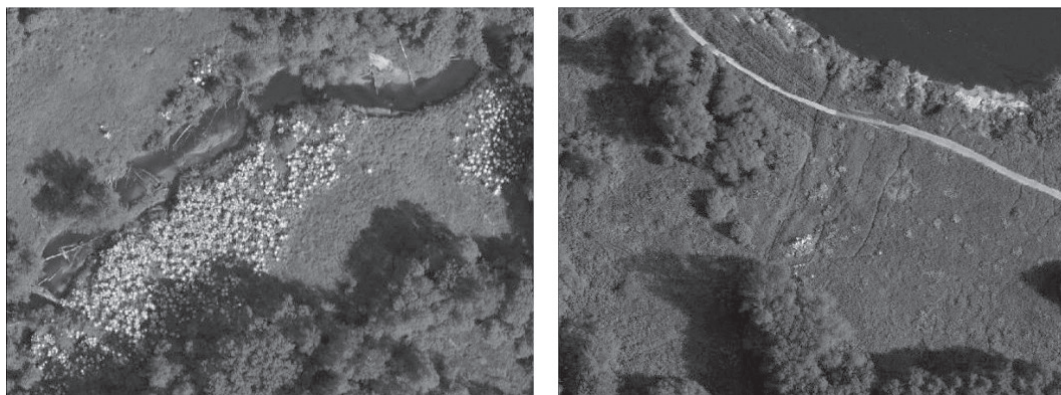
4-61. att. (a) *WorldView-3* satelītattēlu fragmenti, kuros, iespējams, redzami vaļi [97]; (b) jūras putni aerofotogrāfijās [87].

Multispektrālie attēli ļauj kartēt arī dažādus biotopus. Biotops nozīmē viendabīgu platību, kas ir piemērota noteiktu augu, sēņu un dzīvnieku sugu eksistencei. Lielākā daļa biotopu ir nosakāmi pēc to veģetācijas īpatnībām, tādēļ, analizējot zemes pārseguma spektrālās un tekstūras parametru vērtības, var veikt viendabīgu teritoriju kartēšanu un klasificēt to piemērotību konkrētām dzīvnieku un augu sugām.

Vides risinājumu institūta pētījumi par griezēm piemērotu biotopu modelēšanu parādīja augstu lidara datu izmantošanas potenciālu veģetācijas augstuma raksturošanai. 75 % uzskaitīto griestu bija sastopamas teritorijās, kas saskaņā ar modeli uzskatāmas par tām īpaši piemērotām.

Hiperspektrālie dati ar informāciju par daudzām šaurām frekvenču joslām var palīdzēt invazīvo augu sugu identifikācijai. 4-62. att. redzama viena no bīstamākajām invazīvo augu sugām Latvijā – latvāni. Latvāņiem raksturīga audžu veidošanās, un hiperspektrālās aerofotogrāfijas, it īpaši ziedēšanas laikā, ir piemērotas latvāņu kartēšanai.

Protams, multispektrālos datus iespējams izmantot vēl daudzās citās jomās, kurās nepieciešama ģeogrāfiskā informācija par teritorijām, objektiem un parādībām tajās. Vienīgie ierobežojumi ir saistīti ar interesējošo objektu reģistrēšanas iespēju attēlos un regulāru attēlu pieejamību. Tomēr jāņem vērā, ka automatizēta datu apstrāde prasa atvēlēt resursus arī pētījumu veikšanai un metožu validācijai plašākās teritorijās, lai tālīzpētes dati sekmīgi iekļautos ikdienas kartēšanas uzdevumu veikšanā.



4-62. att. Latvāni ziedēšanas laikā augstas telpiskās izšķirtspējas redzamās gaismas aerofotogrāfijā (Vides risinājumu institūta attēls).

Atsauces

1. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics, vol. 1*, Addison-Wesley publishing company, inc., Reading, Massachusetts, Palo-Alto, London, 1963.
2. B. M. Yavorsky, A. A. Detlaf. *Kurs fiziki (krievu valodā), vol. 3*, izd. Vishaja Shkola, Maskava, 1967.
3. W. G. Rees. *Physical Principles of Remote Sensing, second edition*, Cambridge University Press, 2001.
4. Keith R. McCloy. *Resource Management Information Systems: Remote Sensing, GIS and Modelling*, second edition, Taylor & Francis Group edition, Boca Raton, London, New-York, 2006.
5. I. Tamm. *Osnovi teorii elektrichestva* (krievu val.), izd. "Nauka", Maskava, 1966.
6. E. Riekstiņš. *Matemātiskās fizikas metodes*, izd. "Zvaigzne", Rīga, 1969.
7. B. M. Budak, S. V. Fomin. *Kratnīje integrali i rjadi* (krievu val.), izd. "Nauka", Maskava, 1967.
8. G. A. Korn, T. M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*, cMGRW Hill Book company, inc, New-York, Toronto, London, 1961.
9. B. M. Javorskij, A. A. Detlaf. *Spravochnik po fizike* (krievu val.), izd. "Nauka", Maskava, 1965.
10. J. Žagars, I. Vilks. *Astronomija augstskolām*, 2. pārstrādātais izdevums, LU Akadēmiskais apgāds, Rīga, 2007.
11. O. Students. *Optika*, izd. "Zvaigzne", Rīga, 1971.
12. J. Lintz, D. S. Simonett (eds). *Remote Sensing of Environment*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1976.
13. J. Žagars, J. Zvirgzds, J. Kaminskis. *Globālās navigācijas satelītu sistēmas (GNSS)*, Ventspils Augstskola, 2014.
14. G. Asrar (ed.). *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New-York, 1989.
15. B. Hapke. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*, Cambridge University Press, 1993.
16. A. T. Young. *Rayleigh scattering*, Appl. Opt. 20, 522–535, 1981.
17. C. F. Bohren, D. Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley, New York, 1983.
18. C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*, New York: Wiley-Interscience, 2010.
19. C. V. Raman. *A new radiation*, Indian J. Phys. 2: 387–398, 1933.
20. J. C. Stover. *Optical Scattering: Measurement and Analysis*, SPIE Optical Engineering Press, 1995.
21. J. T. Houghton. *The Physics of Atmospheres, second edition*, Cambridge University Press, 1997.
22. M. D. McFarlane. *Digital Pictures Fifty Years Ago*, Proc. IEEE, vol. 60, no. 7, 1972.
23. R. C. Gonzalez, R. E. Woods. *Digital Image Processing*, 2nd edition, Prentice-Hall Inc., New-Jersey, 2002.
24. C. A. Poynton. *A Technical Introduction to Digital Video*, John Wiley & Sons, New-York, 1996.
25. S. Butherworth. *On the Theory of Filter Amplifiers*, Wireless Engineer, vol. 7, 1930.
26. A. Freeman (translator), J. Fourier. *The Analytical Theory of Heat*, Cambridge University Press, London, 1878.
27. E. O. Brigham. *The Fast Fourier Transform and its Applications*, Prentice Hall, N. J. 1988.
28. T. G. Stockham, Jr. *Image Processing in the Context of a Visual Model*, Proc. IEEE, vol. 60,

No. 7, 1972.

29. N. Wiener. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1942.
30. S. Beucher, F. Meyer. *The Morphological Approach of Segmentation: The Watershed Transformation*, Mathematical Morphology in Image Processing (E. Dougherty – editor), Marcel Dekker, New-York, 1992.
31. D. L. Turcotte. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1997.
32. T. M. Lillesand, R. W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*, J. Wiley & Sons, Inc., New-York, 1994.
33. K. Tempfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, L. L. F. Janssen (eds.). *Principles of Remote Sensing*, ITC, Enschede, The Netherlands, 2009.
34. R. Bakeman, J. M. Gottman. *Observing interaction: An introduction to sequential analysis*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1997.
35. K. Ciolkovskij. *Issledovanije mirovih prostranstv reaktivnimi priborami* (krievu val.), Maskava, 1903.
36. E. A. Roy. *Orbital motion*, 4-th edition, IOP Publishing, Ltd., Bristol & Philadelphia, 2005.
37. A. Gray, *A Treatise on Gyrostatics and Rotational Motion*, London: Macmillan, 2007.
38. H. Rhody. *Geometric Image Transformations* Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, 2005, (rhody@cis.rit.edu).
39. R. Miller. *The Dream Machine*, Krieger Publ. Co., 1993.
40. A. Batut. *La Photographie aerienne par cerf-volant*, Paris, Gauthier-Villiers, 1890.
41. J. C. Curlander, R. N. Mcdonough. *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*, Wiley, New York, 1991.
42. J. Askne. *Microwaves for Remote Sensing and Communication*, 8th edition, Department of Radio and Space Science Chalmers University of Technology, Goteborg, 1998.
43. J. T. Houghton. *The Physics of Atmospheres*, 3rd edition, Cambridge University Press, Cambridge UK, ISBN 0-521-80456-6, 2002.
44. I. G. Cumming, F. H. Wong. *Digital processing of synthetic aperture radar data*. Artech house, 1(2):3, 2005.
45. C. Olmsted. *Alaska SAR facility scientific SAR user's guide*. University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute. ASF-SD-003, 1993.
46. J. Nicoll. *SAR Processing*, University of Alaska, Fairbanks, 2006.
47. A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou. *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*, IEEE Geoscience and remote sensing magazine, march 2013.
48. M. Younis. *Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications*, 6th ESA Advanced training course on land Remote Sensing, Bucharest, 14–18 September, 2015.
49. The University of Kansas, School of Electrical Engineering and Computer Science, Training course *Synthetic-Aperture Radar (SAR) Basics*, 2018.
50. S. Rahman. *Focusing Moving Targets Using Range Migration Algorithm in Ultra Wideband Low Frequency Synthetic Aperture Radar*, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2010.
51. W. M. Boerner. *Basic Concepts in Radar Polarimetry*, UIC-ECE Communications, Sensing & Navigation Laboratory 900 W. Taylor St., SEL (607) W-4210, M/C 154, CHICAGO IL/USA-60607-7018.

52. J. S. Lee, E. Pottier. *Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications*, Boca-Raton FL, USA, CRC Press, 2009.
53. G. Sinclair. *Modification of the Radar Target Equation for Arbitrary Targets and Arbitrary Polarization*, Report 302-19, Antenna Laboratory, The Ohio State University Research Foundation, 1948.
54. G. Sinclair. *The Transmission and Reception of Elliptically Polarized Waves*, Proceedings of the IRE, vol. 38, no. 2, pp. 148–151, 1950.
55. K. Papathanassiou, I. Hajnsec. *Tutorial on SAR polarimetry* – ESA Earth Online, 2005.
56. A. Freeman, S. L. Durden. *A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, 1998.
57. J. D. Olivie. *H/alpha decomposition and unsupervised Wishart classification for dual-polarized polarimetric SAR data*, Master in Telecommunication Engineering Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2015.
58. B. Delaunay. *Sur la sphere vide*, Bulletin de l'Academie des Sciences de l'URSS, Classe des Sciences Matematiques et Naturelles, vol. 6, 793 793–800, 1934.
59. W. S. McCulloch, W. H. Pitts. *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, Bulletin of Matematical Biophysics, vol. 5, 1943.
60. J. C. Simon. *Patterns and Operators: the fondations of data representation*, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1986.
61. B. Widrow, S. D. Stearns. *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, 1985.
62. R. Bamler, P. Hartl. *Synthetic aperture radar interferometry*, Inverse Problems, vol. 14, R1–R54, 1998.
63. A. Pepe, F. Calo. *A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Task Aproaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements*, Applied Science, 2017.
64. A. K. Gabriel, R. M. Goldstein. *Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B*, Int. J. Remote Sensing, vol. 9, 1988.
65. L. C. Graham. *Synthetic interferometer radar for topographic mapping*, Proc. IEEE, vol. 62, 763-8, 1974.
66. D. Richman. *Three Dimensional Azimuth-correcting Mapping Radar*, USA, United Technologies Corporation, 1971.
67. M. Wei, D. T. Sandwell. *Decorrelation of L-Band and C-Band Interferometry over Vegetated areas in California*, IEEE Trasactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010.
68. C. Elachi, J. J. Van-Zyl. *Introduction to the physics and techniques of Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 2006.
69. E. J. Fielding. *Principles and Theory of Radar Interferometry*, UNAVCO Short Course, JPL, California Institute of Technology, 2016.
70. R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. *Pattern Clasification*, John Wiley & Sons, 2001.
71. B. Widrow, S. D. Stearns. *Adaptive Signal Processing*, 1st. edition, Prentice Hall, Inc. 1985.
72. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Wiliams. *Learning representations by back-propagating errors*, Nature, vol. 323, 1986.
73. F. Rosenblatt. *The Perceptron – a perceiving and recognizing automaton*, Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory, 1958.
74. A. G. Ivakhnenko, V. G. Lapa. *Cybernetics and forecasting techniques*, American Elsevier Pub. Co., 1967.
75. D. H. Hubel, T. N. Wiesel. *Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex*, The Journal of Physiology, 195(1), 1968.

76. J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell. *Fully convolutional networks for semantic segmentation*, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015.
77. P. A. Townsend. *Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR*, Rem. Sens. vol. 23(3), 2002.
78. T. R. Mengko. *Image Enhancement and Edge Detection*, 2020 (publikācija internetā).
79. Meža likums, pieņemts 24.02.2000., stājies spēkā 17.03.2000., publicēts: "Latvijas Vēstnesis", 98/99 (2009/2010), 16.03.2000., "Ziņotājs", 8, 20.04.2000.
80. J. Bennie, T. W. Davies, J. P. Duffy, R. Inger, and K. J. Gaston. *Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights*. Scientific reports, 4:3789, 2014.
81. G. Blasch, D. Spengler, C. Hohmann, C. Neumann, S. Itzerott, and H. Kaufmann. *Multitemporal soil pattern analysis with multispectral remote sensing data at the field-scale*. Computers and Electronics in Agriculture, 113:1–13, 2015.
82. T. Brandtberg, T. A. Warner, R. E. Landenberger, and J. B. McGraw. *Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America*. Remote sensing of Environment, 85(3):290–303, 2003.
83. J. Breidenbach, E. Næsset, V. Lien, T. Gobakken, and S. Solberg. *Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data*. Remote Sensing of Environment, 114(4):911–924, 2010.
84. D. Buckey. *Vector and raster – advantages and disadvantages*. Publikācija internetā: http://planet.botany.uwc.ac.za/nisl/GIS/GIS_primer/index.htm.
85. A. Buono, R. Paes, F. Nunziata, and M. Migliaccio. *Synthetic Aperture Radar for oil spill monitoring: a brief review*, Anais XVII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Joao Pessoa – PB, Brasil, INPE, 25.–29.04.2015.
86. M. Castelluccio, G. Poggi, C. Sansone, and L. Verdoliva. *Land use classification in remote sensing images by convolutional neural networks*. arXiv preprint arXiv:1508.00092, 2015.
87. D. Chabot, C. M. Francis. *Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review*. Journal of Field Ornithology, 87(4):343–359, 2016.
88. N. Chehata, C. Orny, S. Boukir, D. Guyon, and J. P. Wigneron. *Object-based change detection in wind storm-damaged forest using high-resolution multispectral images*. International Journal of Remote Sensing, 35(13):4758–4777, 2014.
89. S. Cloude. *Polarisation: applications in remote sensing*. Oxford University Press, 2010.
90. M. Dalponte, H. O. Ørka, L. T. Ene, T. Gobakken, and E. Næsset. *Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data*. Remote sensing of environment, 140:306–317, 2014.
91. B. E. Davis. *GIS: A visual approach*. Cengage Learning, 2001.
92. R. Dinuls, G. Erins, A. Lorencs, I. Mednieks, and J. Sinica-Sinavskis. *Tree species identification in mixed Baltic forest using lidar and multispectral data*. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 5(2):594–603, 2012.
93. ESRI. *Esri shapefile technical description*, 1998.
94. J. Fan, M. Han, J. Wang. *Single point iterative weighted fuzzy c-means clustering algorithm for remote sensing image segmentation*. Pattern Recognition, 42(11):2527–2540, 2009.
95. G. M. Foody. *Status of land cover classification accuracy assessment*. Remote sensing of environment, 80(1):185–201, 2002.
96. H. Franco-Lopez, A. R. Ek, M. E. Bauer. *Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method*. Remote sensing of environment,

- 77(3):251–274, 2001.
97. I.P. T. Fretwell, I. J. Staniland, J. Forcada. *Whales from space: counting southern right whales by satellite*. PLoS One, 9(2):e88655, 2014.
 98. A. Grīnvalds. *Meža statistiskās inventarizācijas dati meža apsaimniekošanas plānošanā*, 2013.
 99. L. Gulbe, V. Caune, G. Korats. *Urban area thermal monitoring: Liepāja case study using satellite and aerial thermal data*. International journal of applied earth observation and geoinformation, 63:45–54, 2017.
 100. M. C. Hansen, T. R. Loveland. *A review of large area monitoring of land cover change using landsat data*. Remote sensing of Environment, 122:66–74, 2012.
 101. U. Heiden, K. Segl, S. Roessner, and H. Kaufmann. *Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data*. Remote Sensing of Environment, 111(4):537–552, 2007.
 102. T. Hengl. *Finding the right pixel size*. Computers & Geosciences, 32(9):1283–1298, 2006.
 103. F. Hu, G. Xia, J. Hu, and L. Zhang. *Transferring deep convolutional neural networks for the scene classification of high-resolution remote sensing imagery*. Remote Sensing, 7(11):14680–14707, 2015.
 104. IndexMundi, *European union – urban population*. Tiešsaistē: <https://www.indexmundi.com/facts/european-union/urban-population>.
 105. D. Jakovels, A. Brauns, J. Filipovs, J. Taskovs, D. Fedorovicha, B. Paavel, M. Ligi, and T. Kutsar. *Assessment of chlorophyll – a concentration in the gulf of Riga using hyperspectral airborne and simulated Sentinel-3 OLCI data*. Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016), volume 9688, page 96881G. International Society for Optics and Photonics, 2016.
 106. J. Jansons. *Meža statistiskā inventarizācija latvijā: metode, provizorisks rezultāti*. Pieejams: https://www.lob.lv/wp-content/uploads/2019/11/Meza_statist_inventarizacija_LV_provizor_rezult_JansonsJ_2009_01_16.pdf.
 107. K. Kalvišķis. *Ko nozīmē „lks-92”?* Tiešsaistē: <http://priede.bf.lu.lv/GIS/Apraksti/LKS-92.shtml>.
 108. T. Kavzoglu, P. M. Mather. *The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification*. International Journal of Remote Sensing, 24(23):4907–4938, 2003.
 109. Y. Ke, L. J. Quackenbush, J. Im. *Synergistic use of Quickbird multispectral imagery and lidar data for object-based forest species classification*. Remote Sensing of Environment, 114(6):1141–1154, 2010.
 110. S. Khanal, J. Fulton, S. Shearer. *An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 139:22–32, 2017.
 111. R. Khatami, G. Mountrakis, S. V. Stehman. *A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes : General guidelines for practitioners and future research*. Remote Sensing of Environment, 177:89–100, 2016.
 112. I. Korpela, B. Dahlin, E. Bruun, F. Haapaniemi, J. Honkasalo, S. Ilvesniemi, V. Kuutti, M. Linkosalmi, J. Mustonen, M. Salo, O. Suomi, and H. Virtanen. *Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation*. Proceedings of ISPRS workshop on laser scanning, 2002.
 113. V. Kouyoumjian. *GIS in the Cloud. The New Age of Cloud Computing and Geographic Information Systems*. ESRI, 2011.
 114. Biedriņa “Baltijas krasti”. *Krasta erozija*, 2016. Tiešsaistē: <http://baltijaskrasti.lv/blog/petnieciba/krasta-erozija/>.

115. BBC News. *Crop marks reveal ancient sites in Wales due to heatwave*. Tiešsaistē: <https://www.bbc.com/news/uk-wales-44806069>.
116. I.M. Långkvist, A. Kiselev, M. Alirezaie, and A. Loutfi. *Classification and segmentation of satellite orthoimagery using convolutional neural networks*. *Remote Sensing*, 8(4):329, 2016.
117. R. Lasaponara, N. Masini. *Detection of archaeological crop marks by using satellite Quickbird multispectral imagery*. *Journal of archaeological science*, 34(2):214–221, 2007.
118. H. Latifi, A. Nothdurft, B. Koch. *Non-parametric prediction and mapping of standing timber volume and biomass in a temperate forest: application of multiple optical/lidar-derived predictors*. *Forest Ecology and Management*, 233(3–4):395–407, 2010.
119. D. Leckie. *Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis*. *Remote Sensing of Environment*, 85(3):355–369, May 2003.
120. M. Ligi, T. Kutser, K. Kallio, J. Attila, S. Koponen, B. Paavel, T. Soomets, and A. Reinart. *Testing the performance of empirical remote sensing algorithms in the Baltic sea waters with modeled and in situ reflectance data*. *Oceanologia*, 59(1):57–68, 2017.
121. Wei-Yin Loh. *Classification and regression trees*. Institute for Mathematical Sciences, 10:19, 2014.
122. T. Ma, Y. Zhou, C. Zhou, S. Haynie, T. Pei, and T. Xu. *Night-time light derived estimation of spatio-temporal characteristics of urbanization dynamics using dmsp/ols satellite data*. *Remote Sensing of Environment*, 158:453–464, 2015.
123. M. Mahdianpari, B. Salehi, M. Rezaee, F. Mohammadimanesh, and Y. Zhang. *Very deep convolutional neural networks for complex land cover mapping using multispectral remote sensing imagery*. *Remote Sensing*, 10(7):1119, 2018.
124. P. Mather, M. Koch. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley and Sons, 2010.
125. T. Mator, N. Levin, H. P. Possingham, Y. Levy, D. Rocchini, A. J. Richardson, and S. Kark. *Can satellite-based night lights be used for conservation? the case of nesting sea turtles in the mediterranean*. *Biological Conservation*, 159:63–72, 2013.
126. M. Migliaccio, A. Gambardella, M. Tranfaglia. *SAR polarimetry to Observe oil spills*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(2):506–511, 2007.
127. G. Mountrakis, J. Im, C. Ogole. *Support vector machines in remote sensing: A review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3):247–259, 2011.
128. International Association of Oil and Gas Producers. *EPSG geodetic parameter dataset*.
129. Y. Oishi, H. Oguma, A. Tamura, R. Nakamura, and T. Matsunaga. *Animal detection using thermal images and its required observation conditions*. *Remote Sensing*, 10(7):1050, 2018.
130. J. E. Pardo-Pascual, J. Almonacid-Caballer, L. A. Ruiz, and J. Palomar-Vázquez. *Automatic extraction of shorelines from landsat TM and RTM+ multi-temporal images with subpixel precision*. *Remote Sensing of Environment*, 123:1–11, 2012.
131. J. Peña, J. Torres-Sánchez, A. Serrano-Pérez, A. de Castro, and F. López-Granados. *Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution*. *Sensors*, 15(3):5609–5626, 2015.
132. Å. Persson, J. Holmgren, U. Söderman, and H. Olsson. *Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(8):204–207, 2004.
133. L. E. Peterson. *K-nearest neighbor*. *Scholarpedia*, 4(2):1883, 2009.
134. J. Pitarch, G. Volpe, S. Colella, H. Krasemann, and R. Santoleri. *Remote sensing of chlorophyll*

- in the Baltic sea at basin scale from 1997 to 2012 using merged multi-sensor data. *Ocean Science*, 12(2):379–389, 2016.
135. R. Pollock. *Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model*. *Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Victoria, BC: Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, pages 25–34, 1998.
 136. S. C. Popescu, R. H. Wynne, J. A. Scrivani. *Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA*. *Forest Science*, 50(4):551–565, 2004.
 137. F. Rembold, C. Atzberger, I. Savin, and O. Rojas. *Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection*. *Remote Sensing*, 5(4):1704–1733, 2013.
 138. N. Ritter, M. Ruth et al. *Geotiff format specification, geotiff revision 1.0*, 2000. SPOT Image Corp, 1.
 139. V. F. Rodriguez-Galiano, B. Ghimire, J. Rogan, M. Chica-Olmo, and J. P. Rigol-Sanchez. *An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67:93–104, 2012.
 140. M. Rußwurm, M. Korner. *Temporal vegetation modelling using long short-term memory networks for crop identification from medium-resolution multi-spectral satellite images*. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pages 11–19, 2017.
 141. J. Schou, H. Skriver, A. Aasbjerg Nielsen, and K. Conradsen. *CFAR Edge Detector for Polarimetric SAR images*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(1):20–32, 2003.
 142. G. J. Scott, M. R. England, W. A. Starns, R. A. Marcum, and C. H. Davis. *Training deep convolutional neural networks for land-cover classification of high-resolution imagery*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(4):549–553, 2017.
 143. S. K. Seelan, S. Laguet, G. M. Casady, and G. A. Seielstad. *Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach*. *Remote Sensing of Environment*, 88(1-2):157–169, 2003.
 144. P. K. Srivastava, D. Han, M. A. Rico-Ramirez, M. Bray, and T. Islam. *Selection of classification techniques for land use / land cover change investigation*. *Advances in Space Research*, 50(9):1250–1265, 2012.
 145. J. C. Suárez, C. Ontiveros, S. Smith, and S. Snape. *Use of airborne lidar and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry*. *Computers & Geosciences*, 31(2):253–262, 2005.
 146. AS “Latvijas valsts meži”, 2005. *gada 8.–9. janvāra vētras sekas un to likvidēšanas gaita*, 2006.
 147. Z. Zhu, S. Wang, and E. Curtis. Woodcock. *Improvement and expansion of the fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7,8, and Sentinel-2 images*. *Remote Sensing of Environment*, 159:269–277, 2015.
 148. K. Voormansik, T. Jagdhuber, K. Zalite, M. Noorma, and I. Hajnsek. *Observations of cutting practices in agricultural grasslands using polarimetric SAR*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4):1382–1396, 2015.
 149. Q. Weng. *Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends*. *Remote Sensing of Environment*, 117:34–49, 2012.
 150. G. G. Wilkinson. *Results and implications of a study of fifteen years of satellite image classification experiments*. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 43(3):433–440, 2005.

151. M. A. Wulder, J. C. White, K. O. Niemann, and T. Nelson. *Comparison of airborne and satellite high spatial resolution data for the identification of individual trees with local maxima filtering*. International Journal of Remote Sensing, 25(11):2225–2232, June 2004.
152. M. Zaman-Allah, O. Vergara, J. L. Araus, A. Tarekegne, C. Magorokosho, P. J. Zarco-Tejada, A. Hornero, A. Hernández Albà, B. Das, P. Craufurd et al. *Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize*. Plant methods, 11(1):35, 2015.

Mūsdienās notiek izvērsta Zemes novērošana no kosmosa un ir jāapstrādā ievērojamas tālzpētes datu plūsmas, kuras izmantot var tikai ziņoši speciālisti. Šajā grāmatā akcentētas tālzpētes datu ieguves un interpretēšanas metodes un tās ir korekti pasniegtas. Grāmata būs noderīga visupirms studentiem, īpaši ģeomātikā, vides zinātniekiem, kā arī valsts iestāžu darbiniekiem, kuri strādā ar satelītattēliem.

Dr. geol. Aivars Markots,
Latvijas Universitāte

Grāmatas saturs atspoguļo straujo kosmosa tehnoloģiju attīstību, kuras rezultātus sekmīgi izmantot var tikai ļoti izglītoti speciālisti. Viņu apmācībai un sagatavošanai ir nepieciešami resursi, t. sk. kvalitatīvas mācību grāmatas un tehniskie līdzekļi. Šī ir pagaidām vienīgā pārdomāta izklāsta augstas kvalitātes grāmata latviešu valodā, kas veltīta satelītattēlu interpretācijas problēmām.

Dr. sc. ing. Jānis Kaminskis,
Rīgas Tehniskā universitāte

2023
