



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Aleksejs Vasiljevs

DZELZCEĻA TRANSPORTA TELEMĀTIKAS SISTĒMU MATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI

Promocijas darbs



RTU Izdevniecība
Rīga 2023

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Transporta institūts

Aleksejs Vasiļjevs

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**DZELZCEĻA TRANSPORTA TELEMĀTIKAS
SISTĒMU MATEMĀTISKIE MODEĻI UN
ALGORITMI**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. phys.*
VALENTĪNS POPOVS

Rīga 2023

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

- 3GPP* – trešās paaudzes partnerības projekts (*3rd Generation Partnership Project*);
5G NR – 5G jaunais radio (*5G New Radio*);
AI – mākslīgais intelekts (*Artificial Intelligence*);
ARFCN – absolūtais radiofrekveču numurs (*Absolute Radio-Frequency Channel Number*);
ATP – automātiskā vilcienu aizsardzība (*Automatic Train Protection*);
AWG – Amerikas vadu izmēra sistēma (*American Wire Gauge*);
BBU – pamatjoslas bloks (*Baseband Unit*);
BSC – bāzes stacijas kontrolieris (*Base Station Controller*);
BTS – bāzes stacija (*Base Transceiver Station*);
CDMA – kooddales daudzpiekļuve (*Code Division Multiple Access*);
CEPT – Eiropas pasta un telekomunikāciju administrāciju konference (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*);
COST – Eiropas zinātnes un tehnoloģiju sadarbība (*European Cooperation in Science and Technology*);
CSV – ar komatu atdalītas vērtības (*Comma-Separated Values*);
DSP – ciparu signālu procesors (*Digital Signal Processor*);
EDGE – uzlabotais datu pārraides ātrums vispārējai attīstībai (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*);
EIRENE – Eiropas integrētais uzlabotais radio tīkls (*European Integrated Radio Enhanced Network*);
EML – elektromagnētiskais lauks;
EMV – elektromagnētiskais vilnis;
EMW – elektromagnētiskais vilnis (*Electromagnetic Wave*);
ERA – Eiropas Dzelzceļa aģentūra (*European Railway Agency*);
ERTMS – Eiropas dzelzceļa satiksmes vadības sistēma (*European Rail Traffic Management System*);
ES – Eiropas savienība;
ETCS – Eiropas vilcienu kontroles sistēma (*European Train Control System*);
ETSI – Eiropas telekomunikāciju standartu institūts (*European Telecommunications Standards Institute*);
FDD – frekvenčdales duplekss (*Frequency Division Duplex*);
FR – frekvenču diapazons (*Frequency Range*);
FRMCS – nākotnes dzelzceļa mobilo sakaru sistēma (*Future Railway Mobile Communication System*);
GLONASS – globālā orbitālā satelītnavigācijas sistēma (*Global Orbiting Navigation Satellite System*);
GNS – globālā navigācijas sistēma (*Global Navigation System*);
GPRS – vispārējs datu pakešu pārraides pakalpojums (*General Packet Radio Service*);
GPS – globālā pozicionēšanas sistēma (*Global Positioning System*);
GSM – globālā mobilo sakaru sistēma (*Global System for Mobile Communications*);

GSM-R – globālā mobilo sakaru sistēma dzelzceļam (*Global System for Mobile Communications – Railway*);
HDPE – polietilēns ar lielu blīvumu (*High-Density Polyethylene*);
HSPA – ātrdarbīgā pakešpiekļuve (*High-Speed Packet Access*);
HTML – hiperteksta iezīmēšanas valoda (*Hypertext Markup Language*);
ICPIF – pasliktināšanās/ aprēķinātais plānošanas pasliktināšanās faktors (*Impairment/ Calculated Planning Impairment Factor*);
IEEE – Elektronikas un Elektrotehnikas inženieru institūts (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*);
IP – interneta protokols (*Internet Protocol*);
ITU – starptautiskā telekomunikāciju savienība (*International Telecommunication Union*);
KKSL – koaksiālo kabeļu sakaru līnija;
KPI – izpildes pamatrādītājs (*Key Performance Indicator*);
LAC – lokālā apgabala kods (*Local Area Code*);
LAN – lokālais tīkls (*Local Area Network*);
LDPE – polietilēns ar mazu blīvumu (*Low-Density Polyethylene*);
LOS – redzamības līnija (*Line of Sight*);
LTE – ilgtermiņa evolūcija (*Long-Term Evolution*);
MCC – publiskā mobilā telefonu tīkla valsts kods (*Mobile Country Code*);
MCDATA – no uzdevuma viedokļa būtiski datu sakari (*Mission Critical Data*);
MCPTT – no uzdevuma viedokļa būtiski tiešrunas sakari (*Mission Critical Push to Talk*);
MCVIDEO – no uzdevuma viedokļa būtiski videosakari (*Mission Critical Video*);
MCX – no uzdevuma viedokļa būtiski pakalpojumi (*Mission Critical Services*);
MIMO – vairāku ieeju, vairāku izeju (*Multiple-Input, Multiple-Output*);
MLPP – daudzlīmeņu prioritāšu piešķiršana ar savienojuma pārtraukšanu (*Multi-Level Precedence and Pre-Emption Service*);
MNC – publiskā operatora publiskā mobilā telefonu tīkla kods (*Mobile Network Code*);
MOS – vidējā novērtējuma rezultāts (*Mean Opinion Score*);
MS – mobilā stacija (*Mobile Station*);
MSC – mobilais komutācijas centrs (*Mobile Switching Center*);
MST – mobilo sakaru tīkls;
MUX – multipleksors (*Multiplexer*);
NB-IoT – šaurjoslas lietu internets (*Narrow Band Internet of Things*);
NLOS – netiešā redzamība (*Non Line of Sight*);
OTDR – optiskais laika domēna reflektometrs (*Optical Time Domain Reflectometer*);
PC – personālais dators (*Personal Computer*);
PCM – impulskoda modulācija (*Pulse-Code Modulation*);
PDH – plesiohronā ciparu hierarhija (*Plesiochronous Digital Hierarchy*);
PEG – fiziski uzputots porains polietilēns (*Pentaethylene Glycol*);
PIFA – planāra invertējama mikrosloksnes antena (*Planar Inverted-F Antenna*);
PP – polipropilēns (*Polypropylene*);
PPE – ķīmiski uzputots porains polietilēns (*Polyphenylene Ether*);

PS – polistirols (*Polystyrol*);
PSTN – publiskais komutējamais telefonu tīkls (*Public Switched Telephone Network*);
PTFE – fluorplasts-4 (*Polytetrafluoroethylene*);
PVA – polivinilacetāts (*Polyvinyl Acetate*);
PVC – polivinilhlorīds (*Polyvinyl Chloride*);
RAN – radiopiekļuves tīkls (*Radio Access Network*);
RAT – radiopiekļuves tehnoloģija (*Radio Access Technology*);
RBC – radio bloķēšanas centrs (*Radio Block Center*);
REC – dzelzceļa avārijas izsaukums (*Railway Emergency Call*);
RRU – attālais radio bloks (*Remote Radio Unit*);
SAF – sevišķi augstas frekvences (*Super High Frequency*);
SCB – signalizācija, centralizācija, bloķēšana;
– sinhronā ciparu hierarhija (*Synchronous Digital Hierarchy*);
SDMA – telpiskā kanālu multipleksēšanas tehnoloģija (*Space-Division Multiple Access*);
SHF – superaugsta frekvence (*Super High Frequency*);
SIM – abonenta identifikācijas modulis (*Subscriber Identity Module*);
SIP – sesijas inicializācijas protokols (*Session Initiation Protocol*);
SKSL – simetrisko kabeļu sakaru līnija;
SLA – pakalpojumu līmeņa nolīgums (*Service Level Agreement*);
ŠOSL – šķiedru optiskā sakaru līnija;
SWR – stāvošā viļņa koeficients (*Standing Wave Ratio*);
TCP – pārraides vadības protokols (*Transmission Control Protocol*);
TDD – laukdales duplexs (*Time Division Duplex*);
TEM – elektromagnētiskais šķērsvilnis (*Transverse Electromagnetic Wave*);
TETRA – Eiropas grupveides radiosakaru sistēma (*Terrestrial Trunked Radio, Trans-European Trunked Radio*);
TOBA – vilciena telekomunikāciju arhitektūra (*Telecom On-Board Architecture*);
UDP – lietotāja datogrammu protokols (*User Datagram Protocol*);
UE – lietotāja iekārta (*User Equipment*);
UHF – sevišķi augsta frekvence (*Ultra High Frequency*);
UIC – starptautiskā dzelzceļu savienība (*International Union of Railways*);
UMTS – universālā mobilo telesakaru sistēma (*Universal Mobile Telecommunications System*);
VBS – balss apraides pakalpojums (*Voice Broadcast Service*);
VC – virtuālais konteineris (*Virtual Container*);
VGCS – grupas balss izsaukumu sistēma (*Voice Group Call System*);
VPol – vertikālā polarizācija (*Vertical Polarization*);
WCDMA – platjoslas koda dales daudzpiekļuve (*Wideband Code Division Multiple Access*);
XPol – šķērs polarizācija (*Cross-Polarization*).

ANOTĀCIJA

Mūsdienās telekomunikāciju tehnoloģijas dzelzceļa transporta telemātikas jomā strauji attīstās. Jauno standartu ieviešana, kā arī ar eksistējošās infrastruktūras uzlabošana prasa zināšanas par sakaru tīklu uzbūves un darbības principiem, to projektēšanas un optimizācijas risinājumiem. Sakarā ar kabeļu plašu pielietojumu dzelzceļa sakaru organizēšanai, pastāv nepieciešamība pēc pieejamiem un modernajiem kabeļu sakaru līniju projektēšanas instrumentiem.

Bezvadu sakaru pieejamība arī strauji pieaug, līdz ar to mobilo tīklu tehnoloģijas tiek izmantotas arvien vairāku telemātikas uzdevumu risināšanai. Šobrīd liela nozīme ir jaunākas paaudzes mobilo sakaru standartu izpētes jautājumiem un ar to saistītu projektu īstenošanai. Latvijai, kā Eiropas savienības dalībvalstij, ir jāīsteno Eiropas vilcienu kustības vadības sistēmas (*ERTMS*) ieviešanu un tās apakšsistēmas *GSM-R* vai nākotnes dzelzceļa mobilo sakaru sistēmas *FRMCS* izvēšanu Latvijas dzelzceļā.

Kabeļu sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu izmantošana inženierpraksē prasa skaidru priekšstatu par komunikācijas tehnoloģiju standartiem, parametru aprēķinu metodēm un to matemātiskās modelēšanas iespējām primārajā projektēšanas etapā.

Zinātniskais darbs ir domāts padziļinātas izpratnes iegūšanai dzelzceļa telemātikas sakaru līniju projektēšanas un uzbūves jautājumos. Tas ietver sevī kabeļu līniju un mobilo tīklu eksperimentālus pētījumus heterogēnā vidē, kuru rezultāti kopā ar teorētisko bāzi var tikt izmantoti sakaru līniju projektēšanas uzdevumos un telekomunikāciju tīklu izveidē.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 84 attēli, 39 tabulas, septiņi pielikumi, kopā 131 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 57 nosaukumi.

ABSTRACT

Modern telecommunications technologies in the field of rail telematics are developing rapidly. The introduction of new standards as well as the improvement of the existing infrastructure requires knowledge of the principles of construction and operation of communication networks, their design and optimization solutions. Due to the widespread use of cables for the organization of railway communication, there is a need for accessible and modern tools for the design of cable communication lines.

The availability of wireless communications is also increasing rapidly, so that mobile network technologies are being used to solve an increasing number of telematics tasks. Currently, research issues and related projects on next-generation mobile communication standards are of great importance. Latvia, as a Member State of the European Union, has to implement the European Rail Traffic Management System (ERTMS) and its subsystem GSM-R or the future railway mobile communication system FRMCS on Latvian railways.

The use of cable communication lines and mobile communication networks in engineering practice requires a clear understanding of communication technology standards, parameter calculation methods and their mathematical modelling capabilities at the primary design stage.

The scientific work is aimed at gaining a deeper understanding of the design and construction of railway telematic communication lines. It includes experimental studies of cable lines and mobile networks in a heterogeneous environment, the results of which, together with the theoretical basis, can be used in the tasks of designing communication lines and constructing telecommunication networks.

The Doctoral Thesis has been written in Latvian. It consists of an Introduction, 3 chapters, Conclusions, 84 figures, 39 tables, 7 appendices; the total number of pages is 131, not including appendices. The Bibliography contains 57 titles.

PATEICĪBAS

Izsaku dziļu pateicību savam zinātniskajām vadītājam, izcilam pasniedzējam un padomdevējam, profesoram Valentīnam Popovam par ieguldījumu manā garīgā izaugsmē un profesionalitātes celšanā, par uzticību un bezgalīgu atbalstu no pašās pirmās apmācības dienas un visā promocijas darba tapšanas periodā.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

SATURS

Ievads	10
1. Kabeļu sakaru līniju matemātiskie modeļi dzelzceļa transportā	15
1.1. Virzošās sistēmas	15
1.1.1. Ievads	15
1.1.2. Virzošo sistēmu aprēķināšanas metodes	15
1.1.3. Elektromagnētiskie viļņi virzošajās sistēmās	16
1.1.4. Virzošās sistēmas dzelzceļa transportā	16
1.2. Simetrisko kabeļu sakaru līnijas (SKSL)	17
1.2.1. Ievads	17
1.2.2. SKSL primārie parametri	19
1.2.3. SKSL sekundārie parametri	24
1.2.4. SKSL pārraides darba parametri	24
1.2.5. SKSL parametru aprēķināšanas secība	25
1.3. Koaksiālo kabeļu sakaru līnijas (KKSL)	27
1.3.1. Ievads	27
1.3.2. KKSL primārie parametri	28
1.3.3. KKSL sekundārie parametri	30
1.3.4. KKSL parametru aprēķināšanas secība	31
1.4. Šķiedru optiskās sakaru līnijas (ŠOSL)	32
1.4.1. Ievads	32
1.4.2. ŠOSL parametri	33
1.4.3. ŠOSL reģenerācijas iecirkņa garuma aprēķins	40
1.4.4. ŠOSL parametru aprēķināšanas secība	41
2. Mobilo sakaru tīklu (MST) matemātiskie modeļi dzelzceļa transportā	42
2.1. Ievads	42
2.2. MST dzelzceļa transportā	43
2.2.1. Ievads	43
2.2.2. <i>ERTMS</i>	44
2.2.3. <i>GSM-R</i>	45
2.2.4. <i>FRMCS</i>	50
2.3. MST projektēšanas pamatprincipi	54
2.4. MST antenu sistēmas	57
2.4.1. Mobilo staciju antenu sistēmas	57
2.4.2. Bāzes staciju antenu sistēmas	63
2.5. MST radioviļņu izplatīšanās īpatnības	68
2.5.1. Ievads	68
2.5.2. Lēnais fedings	69
2.5.3. Ātrais fedings	71
2.6. MST apkalpošanas zonas aprēķināšanas principi	72
2.6.1. Statistiskā aprēķinu metode	72

2.6.2. Determinētā aprēķinu metode	74
2.7. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi	75
2.7.1. Ievads	75
2.7.2. Matemātisko modeļu klasifikācija	75
2.7.3. Matemātiskie modeļi	76
2.7.4. Matemātisko modeļu ierobežojumi	87
3. Telemātikas sistēmu sakaru līniju inženieraprēķinu algoritmi un pētījumi	89
3.1. Ievads	89
3.2. Kabeļu sakaru līniju automatizēto inženieraprēķinu algoritms	90
3.3. SKSL parametru inženieraprēķini	93
3.3.1. Parametru aprēķināšanas algoritms	93
3.3.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana	95
3.4. KKSLS parametru inženieraprēķini	97
3.4.1. Parametru aprēķināšanas algoritms	97
3.4.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana	98
3.5. ŠOSL parametru inženieraprēķini	99
3.5.1. Parametru aprēķināšanas algoritms	99
3.5.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana	100
3.5.3. Inženieraprēķinu un eksperimentālu mērījumu salīdzināšana	101
3.6. MST inženieraprēķini	105
3.6.1. Šūnas radiopārklājuma zonas aprēķināšanas algoritms	105
3.6.2. Radioviļņu izplatīšanās modeļu salīdzinājums	106
3.6.3. MST radiopārklājuma eksperimentālie mērījumi	109
3.7. Heterogēna tīkla simulācijas modeļi	113
3.7.1. Ievads	113
3.7.2. Heterogēnā tīkla uzbūve	114
3.7.3. Heterogēnā tīkla darbības princips	116
3.7.4. Heterogēnā tīkla monitoringa un mērījumu metodes	116
3.7.5. Heterogēnā tīkla darbības scenāriju izpēte	118
3.7.6. Rezultāti	122
Secinājumi	124
Literatūras saraksts	127
Pielikumi	131

IEVADS

Informācijas un telekomunikāciju tehnoloģiju attīstība 20. gadsimta beigās sekmēja jaunas transporta sistēmu klases rašanos, kuras pamatprincipi ir:

- transporta procesu efektivitātes uzlabošana;
- transporta procesu drošības paaugstināšana;
- vides stāvokļa uzlabošana, samazinot emisiju transporta sektorā;
- informācijas sniegšana satiksmes vadības centriem un dalībniekiem par situāciju uz ceļiem.

Šādas sistēmas sauc par *inteligentajām transporta sistēmām* vai *transporta telemātikas sistēmām*. Termins *telemātika* ir veidots no vārdiem *telekomunikācija* un *informātika*. Attiecīgi termins *transporta telemātika* attiecas uz telekomunikāciju un informātikas tehnoloģiju izmantošanu transporta tehnoloģisko problēmu risināšanai.

Telemātikas transporta sistēmas ir savstarpēji saistītu automatizētu sistēmu kopums, kas pārvalda satiksmi, uzrauga un kontrolē visu transporta veidu (individuālā, sabiedriskā, kravu) darbību un informē uzņēmumus, to darbiniekus un pasažierus par transporta pakalpojumu organizāciju reģionā. Telemātikas transporta sistēmu ieviešana var ne tikai uzlabot dzelzceļa transporta efektivitāti, bet arī palielināt satiksmes drošību, uzlabot ekoloģisko situāciju un paaugstināt pārvaldājumu procesa dalībnieku informētības līmeni.

Transporta telemātika ļauj risināt šādus uzdevumus:

- sakaru organizēšana starp mobilajiem un stacionārajiem objektiem, objektu stāvokļu kontroles nodrošināšana, vadības signālu pārraide;
- kravu izsekošana, nodrošinot informāciju par transportlīdzekļu atrašanās vietu reāllaikā;
- transportlīdzekļu un transportējamo kravu ģeogrāfiskā pozicionēšana.

Atkarībā no īstenotajām funkcijām, var izdalīt šādus galvenos dzelzceļa telemātikas sistēmu veidus:

- vilcienu kustības vadības sistēmas (piemēram, Eiropas Dzelzceļa satiksmes vadības sistēma *ERTMS*);
- satiksmes drošības sistēmas (mašīnista modrības kontroles sistēmas, lokomotīves drošības ierīces, automātiskās bremzēšanas sistēmas);
- transportlīdzekļu un kravu izsekošanas sistēmas (automātiskā transporta vienību identifikācija, vagonu radiofrekvenču identifikācija, bīstamo kravu izsekošana);
- ritošā sastāva tehniskās diagnostikas sistēmas (pārkaršu bukšu noteikšana, riteņu defektu identificēšana, nobraukšanas no sliedēm detektēšana, bremžu sistēmas kontrole);
- pasažieru informācijas sistēmas (vilcienu kustības saraksti, biļešu cenas, sēdvietu pieejamība).

Visās augšminētajās dzelzceļa telemātikas sistēmās sakaru tīkli ir heterogēni – tie sevī apvieno vairākas atšķirīgas signālu pārraides vides un tehnoloģijas. Uzdevumos, kas ir saistīti ar informācijas nosūtīšanu vai nolasīšanu bezkontakta veidā, tiek izmantotas bezvadu sakaru

standarti, tomēr apstrādei šo informāciju visbiežāk pārsūta caur simetriskām vai optiskām kabeļu līnijām. Piemēram, 5G mobilo sakaru standartā pamatjoslas bloks *BBU (Baseband Unit)* ir savienots ar antenu sistēmu, kas ir integrēta attālinātā radioblokā *RRU (Remote Radio Unit)*, caur optisko šķiedru.

Pēdējo gadu laikā strauji pieaug pieprasījums pēc modernām dzelzceļa telemātikas risinājumiem, kuri paaugstinātu transporta satiksmes drošību, kā arī signalizācijas, centralizācijas, bloķēšanas iekārtu un sistēmu drošumu. Visbūtiskākais šādu risinājumu izstrādes etaps ir sakaru līniju projektēšana. Ņemot vērā telemātikas sistēmu telekomunikācijas daļas heterogēnu uzbūves raksturu, darbs ir veltīts simetrisko, koaksiālo, optisko sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu matemātisko modeļu izpētei un parametru inženieraprēķinu algoritmu izstrādei.

Tēmas aktualitāte

Telemātikas sistēmas, attīstoties tehnoloģijām, tiek izmantotas arvien vairāku dzelzceļa transporta uzdevumu risināšanā: dzelzceļa iekārtu tālsignalizācijā un tālvadībā; vilcienu kustības vadībā; transporta un kravu monitoringā; ēku automatizācijā u. c.

Modernās tendences iekārtu pārvaldībā un apkalpošanā paaugstina telemātikas sistēmu datplūsmu apjomus, piemēram, apkopojot datus pirmsatteices stāvokļu noteikšanai, lielo datu (*big data*), mašīnmācīšanās tehnoloģiju (*machine learning*), lietu interneta (*IoT*) un industriālā lietu interneta (*IIoT*) izmantošanas gadījumos.

Realizējot infrastruktūras attīstības projektus, novecojošās sistēmas tiek aizstātas ar jaunām, kuru izveide, izmantošana un apkalpošana prasa skaidru priekšstatu par esošiem un jaunizstrādātiem standartiem, sakaru līniju parametru aprēķinu metodēm, matemātiskās modelēšanas iespējām, projektēšanas, monitoringa un analīzes instrumentiem.

Darba mērķis un uzdevumi

Mērķis – kabeļu sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametru aprēķināšanas matemātisko modeļu izveide, programmas realizācija, darbības novērtēšana, salīdzinot ar eksperimentu rezultātiem, un ieteikumu sniegšana to praktiskai lietošanai dzelzceļa transporta telemātikas sistēmās.

Uzdevumi:

- 1) veikt promocijas darba tēmas publikāciju analīzi, no kuras izriet pētījuma virziens;
- 2) apkopot metodes, kas ļauj aprēķināt kabeļu un bezvadu sakaru līniju parametrus;
- 3) eksperimentāli izpētīt sakaru līniju galvenos parametrus;
- 4) izveidot kabeļu līniju un mobilo sakaru tīklu matemātiskos modeļus;
- 5) veikt sakaru līniju galveno parametru skaitliskos novērtējumus un salīdzināt tos ar eksperimentālām vērtībām, uz kuru pamata noteikt matemātisko modeļu darbību un lietojamību praksē;
- 6) izstrādāt ieteikumus iegūto rezultātu izmantošanai Latvijas dzelzceļā telemātikas sistēmu sakaru līniju projektēšanā.

Pētījumu metodika

Promocijas darba uzdevumu izpilde iedalīta trīs etapos:

- 1) teorētisko jautājumu izpētei veikta literatūras analīze par kabeļu sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu raksturojošiem parametriem un to noteikšanas matemātiskajiem modeļiem;
- 2) sakaru līniju skaitliskajai analīzei izstrādāti parametru aprēķināšanas algoritmi, kas realizēti ar *Mathcad* programmatūras palīdzību;
- 3) eksperimentālo pētījumu veikšanai izmantota aparatūra, mērinstrumenti un programmnodrošinājums:
 - kabeļu sakaru līnijām – optiskie *OTDR* reflektometri *EXFO AXS-100-023B-EI-VFL* un *EXFO FTB-1-S2-8G*, reflektometrs *IRK-PRO Gamma*, ciparu analizators *Wandel & Goltermann ANT-20E*;
 - mobilo sakaru tīkliem – mobilās stacijas *Samsung M23* un *Xiaomi Poco F4 GT*, *Android* lietojumprogrammas *Network Signal Guru*, *Tower Collector*;
 - heterogēnā tīkla modelim – optiskie multipleksori *SURPASS hiT 7020*, komutatori *ALOE Systems MVTs Softswitch* un *Digium Asterisk Softswitch*, maršrutētājs *HUAWEI B535-232*, telefonu adapteris *Cisco ATA 186*, *VoIP* programmatēlefonu *Zoiper* un *CounterPath X-Lite*, programma *TNMS-M SURPASS hiT 7020 3.2.2 LCT*, ciparu analizators *Wandel & Goltermann ANT-20E*, reflektometrs *IRK-PRO Gamma*, optiskais reflektometrs *EXFO AXS-100-023B-EI-VFL*.

Zinātniskā novitāte

Darbā izstrādāti jauni matemātiskie modeļi, kas apkopo un sistematizē kabeļu sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametrus. Balsoties apskatītajos parametru noteikšanas matemātiskajos modeļos, izstrādāti jauni algoritmi automatizētiem parametru aprēķiniem:

- simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju parametru aprēķināšanai un maksimālā kabeļa līnijas garuma noteikšanai;
- 2G–5G mobilo sakaru tīklu parametru aprēķināšanai un maksimālās radiopārklājuma zonas noteikšanai.

Praktiskā vērtība

Promocijas darbā piedāvātie matemātiskie modeļi ļauj veikt automatizētus parametru aprēķinus dzelzceļa telemātikas sistēmu kabeļu sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu primārajā projektēšanas etapā.

Skaitliskie parametru novērtējumi iegūti, izmantojot šo algoritmu realizāciju *Mathcad* datorizētās projektēšanas programmā, tie salīdzināti ar standarta parametriem un eksperimentāli iegūtām vērtībām. Salīdzinājuma rezultāti liecina, ka piedāvātie matemātiskie modeļi atveido praksē novērojamās fiziskās likumsakarības un atspoguļo sakaru līniju parametru lielumus pieņemamās robežās.

Izstrādātais heterogēnais tīkls ietver mūsdienu sakaru tehnoloģijas un standartus, ko izmanto tālkontroles un tālvadības signālu, datorsistēmu ciparu informācijas un augstas

izšķirtspējas multimediju datu pārraidei, un tas ir piemērots dzelzceļa transporta telemātikas sistēmu modelēšanai.

Publikācijas

Promocijas darba tēmu izpētes jautājumi, starpposmu un kopējie rezultāti atspoguļoti starptautiskās zinātniskās publikācijās.

1. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A. *Mathematical Models and Algorithms of Radio Wave Propagation in Cellular Networks of Mobile Communication*. Technologijos ir menas, 2016, No. 7, 102.–111. lpp. ISSN 2029-400X.
2. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A., Ševčenko, A. *Problems of Telemedicine in Latvia*. Technologijos ir menas, 2017, No. 8, 101.–107. lpp. ISSN 2029-400X.
3. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A., Ševčenko, A. *Railway Heterogeneous Communication Network Model Investigations*. No: Procedia Computer Science. Vol.149: ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018), Lietuva, Klaipeda, 2019. Amsterdam: Elsevier, 2018, 223.–230. lpp. ISSN 1877-0509. Pieejams: doi:10.1016/j.procs.2019.01.127 (SCOPUS).
4. Kargin, A., Panchenko, S., Vasiļjevs, A., Petrenko, T. *Implementation of Cognitive Perception Functions in Fuzzy Situational Control Model*. No: Procedia Computer Science. Vol. 149: ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018), Lietuva, Klaipeda, 2018. Amsterdam: Elsevier B. V., 2019, 231.–238. lpp. ISSN 1877-0509. Pieejams: doi:10.1016/j.procs.2019.01.128 (SCOPUS).
5. Mezītis, M., Vasiļjevs, A. *Feasibility of IIoT Application in Railway Signalling and Interlocking Systems*. No: Transport Means 2019: Sustainability: Research and Solutions: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Part 1, Lietuva, Palanga, 2.–4. oktobris, 2019. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019, 169.–175. lpp. ISSN 1822-296X. E-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).
6. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A. *Modern Antenna Systems of Mobile Terminals in Cellular Networks of Mobile Communication*. Visnyk Universytetu “Ukraina”. Series Informatics, Computing and Cybernetics, 2019, Vol. 1, No. 22, 38.–48. lpp.
7. Popovs, V., Skudnovs, V., Ševčenko, A., Vasiļjevs, A. *Application of Software Complexes for Monitoring of Cellular Networks of Mobile Communication KPI on Railway Transport*. No: Transport Means 2020: Proceedings of the 24th International Scientific Conference, Lietuva, Palanga, 30. septembris–2. oktobris, 2020. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2020, 748.–752. lpp. ISSN 1822-296X. E-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).
8. Popovs, V., Otersone, K., Ševčenko, A., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A. *Experimental Investigations of Radio Coverage Conditions in CNMC 2G–4G along the Railway*. No: Transport Means 2021: Proceedings of 25th International Scientific Conference, Lietuva, Kaunas, 6.–8. oktobris, 2021. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2021, 131.–135. lpp. ISSN 1822-296X. E-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).
9. Otersone, K., Vasiļjevs, A. *Experimental Investigations of Radio Coverage Conditions in 5G Cellular Mobile Communication Networks for Railway Application*. No:

Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference, Lietuva, Kaunas, 5.–8. oktobris, 2022. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022, 146.–150. lpp. ISSN 1822-296X. E-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).

10. Vasiļjevs, A., Otersone, K. *Mathematical Models of VHF/UHF Radio Wave Propagation in Cellular Mobile Communication Networks*. No: Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference, Lietuva, Kaunas, 5.–8. oktobris, 2022. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022, 260.–266. lpp. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).

Darba struktūra

Darbā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts un pielikumi.

Pirmā nodaļa veltīta:

- dzelzceļā lietojamu kabeļu sakaru līniju apskatam;
- piemēroto matemātisko modeļu apkopošanai simetriskajām (SKSL), koaksiālām (KKSL) un šķiedru optiskajām (ŠOSL) sakaru līnijām;
- kabeļu sakaru līniju parametru noteikšanas formulu sistematizēšanai un optimālās aprēķinu secības noteikšanai.

Otrajā nodaļā:

- apskatītas dzelzceļa nozarei domātās mobilo sakaru sistēmas un standarti;
- aprakstīti mobilo sakaru tīklu (MST) projektēšanas principi un etapi;
- izvērtēti radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi un to izmantošana dzelzceļa sakaru tīklu projektēšanā.

Trešajā nodaļā piedāvāti:

- izstrādātie simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametru inženieraprēķinu algoritmi;
- kabeļu sakaru līniju un mobilo tīklu parametru noteikšanas metodoloģijas aprēķinu realizācijai programmā *Mathcad*;
- aprēķināto standarta parametru salīdzinājumi ar eksperimentāli iegūtām vērtībām matemātisko modeļu lietojamības noteikšanai;
- izstrādātā heterogēnā tīkla modeļa simulācijas modeļi.

Pielikumos doti *Mathcad* datorizētās projektēšanas vidē sastādītas simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametru aprēķināšanas programmas.

1. KABEĻU SAKARU LĪNIJU MATEMĀTISKIE MODEĻI DZELZCEĻA TRANSPORTĀ

1.1. Virzošās sistēmas

1.1.1. Ievads

Ierīces, kas paredzētas elektromagnētiskās enerģijas pārraidei konkrētā virzienā, sauc par virzošām sistēmām. Vairumā gadījumu vadītāju vai dielektriķu virsma ir tā, kas veido virzošās sistēmas. Līdz ar to elektromagnētiskie viļņi pārvietojas gar šīm robežvirsmām, kas darbojas kā sava veida “sliedes”.

Telekomunikācijā un radiosakaros izmanto dažāda tipa virzošās sistēmas: divvadu līnijas (gaisvadu, kabeļu), sloksnes līnijas, koaksiālās līnijas, metāliskos vai dielektriskos viļņvadus, optiskās līnijas.

Izšķir homogēnas un heterogēnas, regulāras un neregulāras, izotropas un anizotropas virzošās sistēmas. Ja vides parametri, kurā izplatās viļnis, ir homogēni, tad virzošā sistēma arī ir homogēna; ja vides parametri ir heterogēni, tad virzošo sistēmu sauc par heterogēnu. Lineāras homogenas bezgalīgi garas virzošās sistēmas sauc par regulārām.

Reālos gadījumos virzošās sistēmas ir heterogēnas, jo parametri izplatīšanās virzienā var ievērojami svārstīties. Sakaru sistēmās virzošās ierīces var izmantot pie dažādiem nosacījumiem un dažādos frekvenču diapazonos.

Visplašāk virzošās sistēmas pielieto kā sakaru līnijas, pārraidot signālus lielos attālumos, un kā fiderus, kas ir paredzēti elektromagnētiskās enerģijas pārraidei: caur raidītājiem uz antenām un no antenām uz uztvērējiem.

1.1.2. Virzošo sistēmu aprēķināšanas metodes

Atkarībā no izmantotā frekvenču diapazona un virzošās sistēmas konstrukcijas, caur kuru izplatās elektromagnētiskie viļņi, izmanto kādu no divām aprēķinu metodēm [50]:

- izmantojot ķēžu teorijas vienādojumus (pielietojot garo līniju vienādojumus – telegrāfa vienādojumus), kur mainīgo vietā ir strāvas un spriegumi, nevis E un H vektori;
- izmantojot elektrodinamikas lauku vienādojumus (Maksvela vienādojumus), kas ļauj saņemt viļņu vienādojumus un noteikt trīs galvenos vektorus: elektriskā lauka intensitāti E , magnētiskā lauka intensitāti H un elektromagnētiskā lauka enerģijas plūsmas blīvuma vektoru (Pointinga vektoru) II .

Pirmā metode parasti tiek izmantota simetrisko, koaksiālo un sloksnes līniju parametru inženieraprēķinos. Otrā metode ir vispārīgāka un sarežģītāka. To izmanto elektromagnētisko viļņu (EMV) izplatīšanās modelēšanai koaksiālajos, viļņvada un optiskajās līnijās, turklāt tiek pieņemts, ka elektromagnētiskie viļņi jau ir ierosināti un elektromagnētisko lauku avotus (EML) nesatur.

1.1.3. Elektromagnētiskie viļņi virzošajās sistēmās

Vispārējā gadījumā virzošajās sistēmās var izplatīties elektromagnētiskie viļņi ar dažādām īpašībām. Šīs īpašības galvenokārt ir atkarīgas no elektromagnētisko viļņu tipa, kuru nosaka elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes esamība [49]:

- elektromagnētiskais šķērsvilnis (*transverse electromagnetic wave, TEM*) – vilnim nav elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes, t. i., E_z un H_z ir vienādi ar nulli un Pointinga vektors $\Pi = E \times H = \Pi_z$ ir vērsts z koordinātes virzienā, kas liecina par jaudas pārraidi caur sistēmu;
- magnētiskais šķērsvilnis (*transversal magnetic wave, TM = E*) – $H_z = 0$, $E_z \neq 0$;
- elektriskais šķērsvilnis (*transversal electric wave, TE = H*) – $E_z = 0$, $H_z \neq 0$;
- augstākā tipa viļņi – hibrīdu EH_{mn} un HE_{mn} viļņi, kurām elektromagnētiskā lauka komponentes nav vienādas ar nulli.

Jāatzīmē, ka elektromagnētiskā lauka spēka līniju sadalījums TEM tipa viļņiem ir līdzīgs EMV spēka līniju sadalījumam, taču E un H nav vienādi pēc lieluma un virziena. Elektromagnētiskais lauks līnijā ir saistīts ar vadītspējas strāvu vadītājos (kas mainās gar garenisko koordināti z), bet $E_z = 0$, $H_z = 0$. Tas attiecas uz pirmās grupas virzošām sistēmām ar TEM viļņiem (simetriskās un koaksiālās līnijas).

Otrās grupas virzošās sistēmas pārraidei izmanto $TM = E$, $TE = H$ un hibrīda viļņus EH , HE . Praksē:

simetriskajās un koaksiālajās virzošajās sistēmās galvenokārt izmanto TEM elektromagnētiskos viļņus;

- metāliskajos taisnleņķa viļņvados izmanto $TE_{10} = H_{10}$ viļņus;
- metāliskajos cilindra viļņvados izmanto TE_{11} un TE_{01} ;
- optiskajās virzošajās sistēmas par EMV galveno tipu kalpo hibrīda vilnis HE_{11} (vienmodu režīmam), taču izmanto arī E , H , EH , HE tipa viļņus.

Elektromagnētiskus viļņus sadala ne tikai klasēs, bet arī pēc tipa. Viļņa tips jeb moda tiek noteikta pēc elektromagnētiskā lauka struktūras sarežģītības virzošās sistēmas šķērsgriezumā. Visu elektromagnētisko viļņu daudzveidību var aprakstīt ar H_{mn} , HE_{mn} viļņiem, kur m ir cilindriskās virzošās sistēmas lauka pilno izmaiņu skaits pēc cilindra riņķa līnijas (perimetra), bet n – pēc diametra. Indeksi ir naturālie skaitļi: $m = \{0, 1, 2, \dots\}$, $n = \{1, 2, 3, \dots\}$.

Visas taisnleņķa un cilindriskās virzošās sistēmas raksturo t.s. kritiskā frekvence (robežfrekvence) un kritiskais viļņa garums. Šie parametri nosaka robežas, kurās ir iespējama elektromagnētisko viļņu izplatīšanās: ja darba frekvence ir mazāka par kritisko, vai viļņa garums ir lielāks par kritisko, tad elektromagnētiskie viļņi virzošajā sistēmā neizplatās un signāla pārraide nenotiek.

1.1.4. Virzošās sistēmas dzelzceļa transportā

Mūsdienu komunikāciju attīstības tendence ir telekomunikāciju tīklu pārveidošana telemātikas tīklos. Telemātikas tīkls, atšķirībā no parastā sakaru tīkla, sevī ietver arī informācijas glabāšanas, apstrādes un izguves funkcijas, un ir izstrādāts tā, lai nodrošinātu

lietotāju piekļuvi ne tikai telekomunikāciju pakalpojumiem, bet arī nepieciešamiem informācijas resursiem.

Mūsdienās dzelzceļa transporta nozarē ir ieviesta virkne daudzfunkcionālu informācijas tehnoloģiju, kas nodrošina elektronisku datu apmaiņu pārvadājumu procedūras, plaši izmantojot telekomunikāciju infrastruktūras resursus.

Visās dzelzceļa transporta struktūrvienībās tiek izmantotas daudzkanālu telekomunikāciju iekārtas, kuras nodrošina dažādas kapacitātes sakaru kanālu darbību dzelzceļa saimniecību vajadzībām: darba operatīvai vadībai, sanāksmēm, datu apkopošanai datorcentros, videonovērošanai un citiem sakaru pakalpojumiem, kuru skaits un apjoms ar katru gadu pieaug.

Vilcienu intervālu kustības regulēšanas sistēmu plaša ieviešana pagājušajā gadsimtā izraisīja būtisku kabeļu līniju skaita pieaugumu. Visās dzelzceļa stacijās, kuras aprīkoja ar elektrisko centralizāciju un citām automatikas un telemehānikas iekārtām, parādījās blīvs kabeļu tīkls. Šie kabeļi bija paredzēti signalizācijas, centralizācijas, bloķēšanas (SCB) iekārtu vadībai un kontrolei. Stacijas iekārtu attālinātai vadībai, ieviešot dispečeru centralizācijas sistēmas, būvēja maģistrālas sakaru līnijas. Visas šīs līnijas bija domātas analogu signālu pārraidei un, vēsturiski, tos būvēja no koaksiāliem un simetriskiem kabeļiem, daudzus no kuriem izmanto arī pašlaik.

Šodien sakariem lielākoties izmanto ciparu pārraides sistēmas, kuras ir kļuvušas par telekomunikāciju sistēmu neaizstājamo sastāvdaļu, un dzelzceļa transporta sakaru infrastruktūras pamatā ierindojās ciparu sakaru tīkls. Modernas dispečervadības, staciju centralizācijas, energoapgādes, sakaru un SCB iekārtu monitoringa un vadības risinājumi izmanto mikroprocesoru tehnoloģijas, kas ir telemātikas sistēmu komponentes. Modernu informācijas tehnoloģiju ieviešana visās dzelzceļa transporta ražošanas un saimnieciskās darbības jomās ir radījusi nepieciešamību radikāli pārveidot esošo analogo sakaru tīklu, un pāriet uz optisko šķiedru kabeļu izmantošanu.

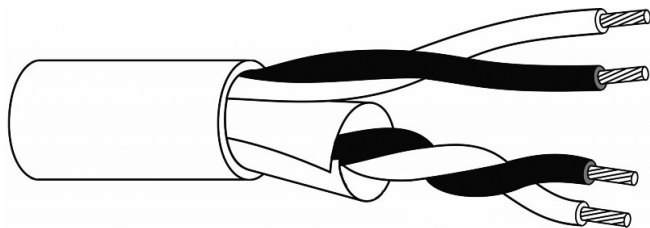
Tomēr esošās simetriskās kabeļu līnijas tiks izmantotas analogo un digitālo pārraides sistēmu darbībai vēl ilgu laiku. Tiek prognozēts, ka tie veidos dzelzceļa sakaru tīklu būtisku daļu vēl 15–20 gadus, bet lokālo tīklu līmenī – 30 un vairāk gadu. Tāpēc, lai uzlabotu digitālo pārraides tīklu trokšņu noturību, piekļuves tīklos ar kabeļu līnijām izmanto modernas signālu apstrādes un kodēšanas metodes. Līdz ar to, esošo kabeļu sakaru tīklu paplašināšanas, līniju segmentu nomaiņas, kanālu parametru kontroles jautājumi joprojām paliek aktuāli, un dzelzceļa telekomunikāciju speciālistiem ir nepieciešamas padziļinātas zināšanas par simetrisko, koaksiālo un, protams, optisko šķiedru kabeļu parametru noteikšanas un līniju projektēšanas metodēm.

1.2. Simetrisko kabeļu sakaru līnijas (SKSL)

1.2.1. Ievads

Simetriskais kabelis – sakaru kabelis, kas sastāv no diviem vai vairākiem savītiem vai paralēliem vadiem (1.1. att.). Vadi ir savstarpēji izolēti.

Simetrisko kabeļu sakaru līnija (SKSL) ir elektriska ķēde ar izkliedētiem parametriem. Šādu ķēžu īpatnība ir līnija no diviem vadītājiem ar vienādām konstruktīvām īpašībām. Pieliekot spriegumu divvadu līnijai, vados plūst noteiktas frekvences elektriskā strāva. Strāva un spriegums ierosina apkārt vadiem mainīgo elektromagnētisko lauku.

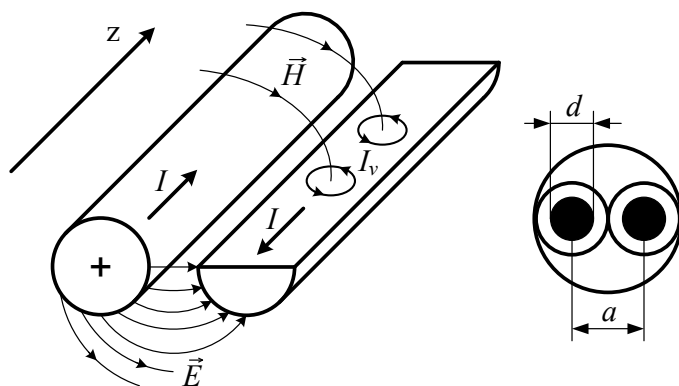


1.1. att. Simetriskais kabelis.

Vispārējā gadījumā divvadu līnijas elektromagnētiskais lauks ir daudzviļņu lauks (1.2. att.) [36], [37]. Līnijā var izplatīties TEM , E un H tipa viļņi. Galvenais ir TEM tipa šķērsvilnis. Reālos gadījumos elektromagnētiskajam vilnim (EMV) izplatoties klāt ir elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$.

Vadītājā plūstošajai strāvai palielinoties, vadītāja gareniskā šķēluma plaknē rodas virpuļstrāvas I_v , kuras vada ass tuvumā ir vērsta strāvai pretējā virzienā. Strāvas blīvums ass tuvumā samazinās, bet virsmas tuvumā palielinās, un augstfrekvences strāvas plūst tikai plānā slānītī virsmas tuvumā (skinslānī). Šo parādību sauc par skinefektu. Skinefekta dēļ augstfrekvences strāvu tehnikā blīvu vadu vietā izmanto caurules vai dielektriķu vadus, kuru virsma pārklāta ar plānu vadītāja materiāla kārtiņu.

Strāvas blīvumu vadītājā ietekmē arī kaimiņvados plūstošās strāvas. Blakusesošā vada ārējais lauks rada virpuļstrāvas, kas neļauj strāvai plūst vienmērīgi, tādējādi palielinot aktīvo pretestību. Šo parādību sauc par tuvuma efektu. Tuvuma efekts ir tieši proporcionāls frekvencei, magnētiskai caurlaidībai un ir atkarīgs no vadītāju diametra un līnijas kopējā garuma.



1.2. att. Viļņu izplatīšanās simetriskajā kabelī.

Divvadu līnijas elektromagnētiskā lauka detalizētā analīze ir pietiekami komplicēta, jo nākas saskarties ar koordinātu sistēmas izvēli un sarežģīto viļņu vienādojumu risināšanu. Parasti divvadu līnijas pētījumus veic, izmantojot tuvinātās metodes.

SKSL matemātisko modeļu izveidei tiek izmantotas tuvinātās metodes, kuras ļauj iegūt pusempīriskās izteiksmes primāro un sekundāro parametru aprakstīšanai.

Zemāk tiek apskatīti tuvinātie matemātiskie modeļi, kuri ļauj veikt SKSL pamata parametru aprēķinus.

1.2.2. SKSL primārie parametri

Simetrisko kabeļu sakaru līnijas primārie parametri ir aktīvā pretestība R , vadītspēja G , induktivitāte L un kapacitāte C . Šie parametri ir vienmērīgi izklidēti visas līnijas garumā [10], [38].

Līnijas aktīvā pretestība nosaka enerģijas zudumus vados un kabeļa metāliskajos elementos. Aktīvā garuma pretestība līdzstrāvai (1.2.) tiek izteikta no homogēna metāliska vadītāja pretestības vispārējās formulas:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \Omega \quad (1.1.)$$

kur ρ – vadītāja materiāla īpatnēja pretestība (1.3. tab.), $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

l – vadītāja garums, mm;

S – vadītāja dzīslas šķēluma laukums, mm^2 .

$$R_0 = \frac{2550 \cdot \rho \cdot \chi}{d^2}, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.2.)$$

kur d – vadītāja diametrs, mm;

χ – kabeļa savijuma koeficients, kuru aprēķina pēc formulas (1.3.).

$$\chi = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{d + d_1}{h} \right)^2}, \quad (1.3.)$$

kur d_1 – izolētas dzīslas diametrs, kuru aprēķina pēc formulas (1.4.), mm;

h – savijuma solis, mm.

$$d_1 = d + 2\delta, \text{ mm} \quad (1.4.)$$

kur δ – vada izolācijas biezums, mm.

1.1. tabula

Kabeļa parametru formulas atkarībā no vadu savijuma tipa

Savijuma tips	Attālums starp vadītājiem, mm	Grupas diametrs, mm	Labojuma koeficients
Pāra	$a = d_1$	$D_p = 1,71d_1$	$\psi_p = \frac{(D_p + d_1 - d)^2 - a^2}{(D_p + d_1 - d)^2 + a^2}$

1.1. tabulas turpinājums

Savijuma tips	Attālums starp vadītājiem, mm	Grupas diametrs, mm	Labojuma koeficients
Dubultpāra	$a = d_1$	$D_{dp} = 2,72d_1$	$\psi_{dp} = \frac{(0,65 \cdot D_{dp} + d_1 - d)^2 - a^2}{(0,65 \cdot D_{dp} + d_1 - d)^2 + a^2}$
Zvaigžņu	$a = 1,41d_1$	$D_z = 2,41d_1$	$\psi_z = \frac{(D_z + d_1 - d)^2 - a^2}{(D_z + d_1 - d)^2 + a^2}$
Dubultzvaigžņu	$a = 1,41d_1$	$D_{dz} = 3,98d_1$	$\psi_{pz} = \frac{(0,43 \cdot D_{dz} + d_1 - d)^2 - a^2}{(0,43 \cdot D_{dz} + d_1 - d)^2 + a^2}$

Līnijas kopējo garuma pretestību, ņemot vērā augstfrekvenču signālu ietekmi, aprēķina šādi:

$$R = R_0 \left[1 + F(x) + \frac{P_s \cdot G(x) \cdot (d/a)^2}{1 - H(x) \cdot (d/a)^2} \right] + \Delta R, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.5.)$$

kur x – cilindrisko funkciju arguments no 1.2. tabulas;

$F(x)$, $G(x)$, $H(x)$ – cilindrisko funkciju vērtības pēc 1.4. tabulas datiem;

P_s – koeficients, kas raksturo zudumus kaimiņvadu tuvuma efekta dēļ (1.5. tab.);

a – attālums starp vadītājiem, mm;

ΔR – papildzudumi metāla apvalkā, Ω/km .

1.2. tabula

Cilindrisko funkciju argumenta formulas

Vadītāja materiāls	Koeficients x
Varš	$0,0106 \cdot d \sqrt{f}$
Alumīnijs	$0,0085 \cdot d \sqrt{f}$
Cits	$0,0005 \cdot d \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$

kur f – signāla darba frekvence, Hz;

μ – absolūtā magnētiskā caurlaidība (1.6.), H/m;

σ – materiāla elektrovadītspēja no 1.3. tabulas, S/m.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (1.6.)$$

kur μ_0 – magnētiskā konstante, $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m;

μ_r – relatīvā magnētiskā caurlaidība, $\mu_r = 1$.

1.3. tabula

Materiālu īpatnējās pretestības un elektrovadītspējas vērtības

Materiāls	Īpatnējā pretestība ρ , ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	Elektrovadītspēja $\sigma \cdot 10^6$, S/m
Sudrabs	0,016	62,5
Varš	0,0175	58
Zelts	0,022	45,5
Alumīnijs	0,0292	37
Tērauds	0,137	7,69

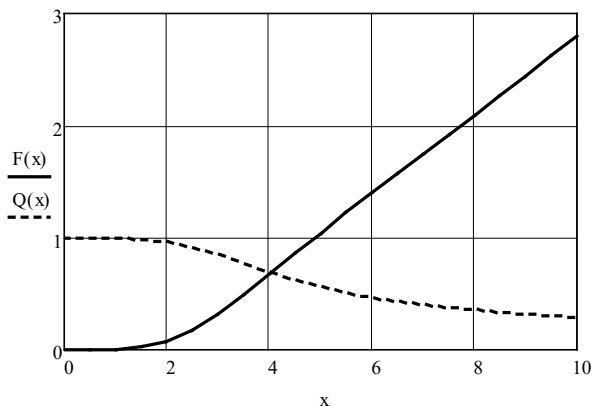
Sakaru līniju parametru aprēķinos plaši izmanto cilindriskās funkcijas, kas satur diferenciālvienādojumu risinājumus un ļauj aprēķināt pretestības palielināšanos vai samazināšanos dažādu efektu dēļ. Funkciju un argumentu vērtības dotas 1.4. tabulā.

1.4. tabula

Cilindrisko funkciju un argumentu vērtības

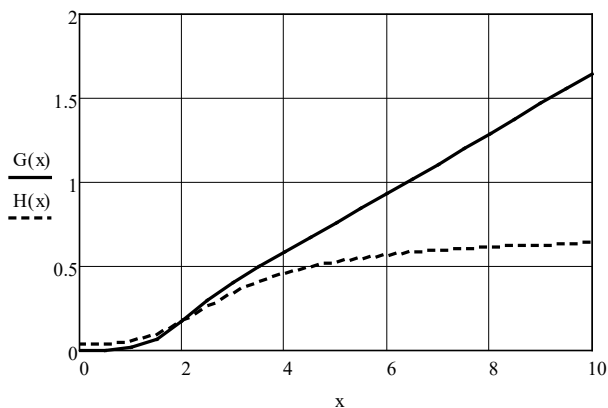
x	$F(x)$	$G(x)$	$H(x)$	$Q(x)$
0,0	0	0	0,0417	1
0,5	0,000326	0,000975	0,042	0,9998
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400
10	2,799	1,641	0,643	0,286
>10	$\frac{\sqrt{2x-3}}{4}$	$\frac{\sqrt{2x-1}}{8}$	0,750	$\frac{2\sqrt{2}}{x}$

Funkcijas visērtāk attēlot grafiski, nezināmās vērtības var noteikt ar interpolācijas palīdzību. Funkcija $F(x)$ raksturo pretestības palielināšanos, bet $Q(x)$ – pretestības pazemināšanos (1.3. att.) virsmas efekta dēļ.



1.3. att. Virsmas efekta raksturojošās funkcijas.

$G(x)$ un $H(x)$ funkcijas (1.4. att.) apraksta tuvuma efekta ietekmi.



1.4. att. Tuvuma efekta raksturojošās funkcijas.

Garuma induktivitāti var aprēķināt no izteiksmes:

$$L = \chi \cdot \left[4 \cdot \ln \left(\frac{2a-d}{d} \right) + Q(x) \cdot \mu_r \right] \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.7.)$$

kur $Q(x)$ – cilindriskās funkcijas vērtība no 1.4. tabulas.

Simetriskā kabeļa garuma kapacitāte nav atkarīga no frekvences un tiek aprēķināta pēc formulas:

$$C = \frac{\chi \cdot \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{2a-d}{d} \psi \right)}, \frac{\text{F}}{\text{km}} \quad (1.8.)$$

kur ε_r – izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība (1.6. tab.),

ψ – labojuma koeficients, kas ir atkarīgs no kabeļa savijuma tipa (1.1. tab.).

1.5. tabula

Zudumu koeficienta vērtības

Savijuma tips	Zudumu koeficients P_s
Pāra	1
Dubultpāra	2
Zvaigžņu	5
Dubultzvaigžņu	3

1.6. tabula

Izolācijas materiālu raksturlielumu vērtības

Izolācijas materiāls	Izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība ϵ_r	Izolācijas zuduma leņķa tangenss $\operatorname{tg}\delta \cdot (10^{-4})$
Polipropilēns (PP)	2,2–2,4	2–5
Polivinilhlorīds (PVC)	3,2–4,0	150–250
Polivinilacetāts (PVA)	3,1	25
Polistirols (PS)	2,4–2,8	2–9
Polietilēns ar mazu blīvumu (LDPE)	2,2–2,3	2–3
Polietilēns ar lielu blīvumu (HDPE)	2,3–2,4	2–8
Fiziski uzputots porains polietilēns (PEEG)	1,35–1,46	0,9–1,18
Ķīmiski uzputots porains polietilēns (PPE)	1,65	3–8,5
Fluorplasts-4 (PTFE)	2,02	2
Stirofleksa kords	1,2–1,3	1–6
Papīra kords	1,3–1,4	55–280
Papīra masa	1,6–1,7	25–28
Papīrs un gaiss	1,5–1,6	–
Gaiss	1,00055	–

Sakaru līnijas garuma vadītspēja atspoguļo enerģijas zudumus kabeļa izolācijā:

$$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta(f), \frac{\text{S}}{\text{km}} \quad (1.9.)$$

kur $\operatorname{tg}\delta(f)$ – izolācijas zuduma leņķa tangenss, atkarīgs no darba frekvences f (1.6. tab.).

1.2.3. SKSL sekundārie parametri

Sakaru līnijas sekundāros parametrus parasti aprēķina pēc vispārējām formulām. Simetriskās līnijas viļņu pretestību izsaka kā sakni no garuma induktivitātes un kapacitātes attiecības:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}, \Omega \quad (1.10.)$$

Taču viļņu pretestību var atrast arī neņemot vērā zudumus izolācijā:

$$Z_v = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{2a-d}{d}\right), \Omega \quad (1.11.)$$

Garuma rimšanas koeficients:

$$\alpha = 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.12.)$$

Fāzes koeficients:

$$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{\text{rad}}{\text{km}} \quad (1.13.)$$

Signāla izplatīšanās ātrums:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad (1.14.)$$

Saīsinājuma koeficients parāda, cik reizēs signāla izplatīšanās ātrums ir mazāks, salīdzinot to ar gaismas ātrumu vakuumā:

$$K_s = \frac{c}{v}, \quad (1.15.)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^5$ km/s.

Kabeļa saīsinājuma koeficients ir atkarīgs no dielektriķa īpašībām. Novecošanas procesā vadu izolācijas dielektriskā caurlaidība un zuduma leņķa tangenss palielinās, līdz ar ko samazinās signāla izplatīšanās ātrums un pieaug garuma rimšanas koeficients.

Signāla izplatīšanās laiks:

$$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, \text{ s} \quad (1.16.)$$

kur L_g – sakaru līnijas garums, km.

1.2.4. SKSL pārraides darba parametri

Simetriskās kabeļu sakaru līnijas viļņu parametri – viļņu pretestība un darba rimšanas koeficients. Tos aprēķina, ņemot vērā signāla pārraides nosacījumus līnijā. Ja līnija ir saslēgta uz saskaņoto slodzi un tajā nav atstarotu viļņu, maksimālas jaudas pārraidei līnijā ieejas pretestībai Z_{ie} jābūt vienādai ar izejas pretestību Z_{iz} :

$$Z_{ie} = Z_v \cdot \frac{1 + \eta_l \cdot e^{-2\gamma l}}{1 - \eta_l \cdot e^{-2\gamma l}}, \Omega \quad (1.17.)$$

kur γ – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās koeficients (1.18.);

l – līnijas garums;

η_l – atstarošanās koeficients līnijas beigās (1.20.).

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1.18.)$$

kur ω – cikliskā frekvence (1.19.), rad/s;

α – garuma rimšanas koeficients, Np/km;

β – fāzes koeficients, rad/km.

$$\omega = 2\pi f, \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (1.19.)$$

$$\eta_l = \frac{Z_g - Z_v}{Z_s - Z_v}, \quad (1.20.)$$

$$\eta_0 = \frac{Z_g - Z_v}{Z_g + Z_v}, \quad (1.21.)$$

kur η_0 – atstarošanas koeficients līnijas sākumā.

Z_g – ģenerators pretestība, Ω ;

Z_s – slodzes pretestība, Ω .

Līnijas darba rimšana tiek aprēķināta kā zudumu summa:

$$a_d = \alpha \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3, \text{ dB} \quad (1.22.)$$

kur α – garuma rimšanas koeficients (1.11.), dB/km;

L – līnijas garums, km;

Δa_1 – zudumi, kas rodas ģenerators un viļņu pretestības nesaskaņošanās dēļ (1.23.), dB;

Δa_2 – zudumi, kas rodas līnijas un slodzes nesaskaņošanās dēļ (1.24.), dB;

Δa_3 – atstarošanas mijiedarbības zudumi (1.25.), dB.

$$\Delta a_1 = 8.69 \cdot \ln \left| \frac{Z_g + Z_v}{2\sqrt{Z_g Z_v}} \right|, \text{ dB} \quad (1.23.)$$

$$\Delta a_2 = 8.69 \cdot \ln \left| \frac{Z_s + Z_v}{2\sqrt{Z_s Z_v}} \right|, \text{ dB} \quad (1.24.)$$

$$\Delta a_3 = 8.69 \cdot \ln |1 - e^{-2\gamma l} \eta_0 \eta_l|, \text{ dB} \quad (1.25.)$$

1.2.5. SKSL parametru aprēķināšanas secība

Simetriskās sakaru līnijas primāro un sekundāru parametru aprēķināšanas secība un attiecīgas parametru noteikšanas formulas ir apkopotas 1.7. tabulā.

SKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība

N. p. k.	Parametrs	Formula, mērvienība	Mainīgie, mērvienības
1.	Garuma pretestība	$R = R_0 \left[1 + F(x) + \frac{P_s \cdot G(x) \cdot (d/a)^2}{1 - H(x) \cdot (d/a)^2} \right], \frac{\Omega}{\text{km}}$	$R_0, \Omega/\text{km}$ d, mm a, mm
2.	Garuma induktivitāte	$L = \chi \cdot \left[4 \cdot \ln \left(\frac{2a-d}{d} \right) + Q(x) \cdot \mu_r \right] \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}}$	d, mm a, mm
3.	Garuma kapacitāte	$C = \frac{\chi \cdot \epsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left[(2a-d/d) \psi \right]}, \frac{\text{F}}{\text{km}}$	d, mm a, mm
4.	Garuma vadītspēja	$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \text{tg} \delta, \frac{\text{S}}{\text{km}}$	f, Hz $C, \text{F/km}$
5.	Viļņu pretestība	$Z_v = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \left(\frac{2a-d}{d} \right), \Omega$	d, mm a, mm
6.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{km}}$	$R, \Omega/\text{km}$ $L, \text{H/km}$ $C, \text{F/km}$ $G, \text{S/km}$
7.	Fāzes koeficients	$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{\text{rad}}{\text{km}}$	f, Hz $L, \text{H/km}$ $C, \text{F/km}$
8.	Signāla izplatīšanās ātrums	$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{\text{km}}{\text{s}}$	$L, \text{H/km}$ $C, \text{F/km}$
9.	Signāla izplatīšanās laiks	$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, \text{s}$	L_g, km $v, \text{km/s}$
10.	Sāsinājuma koeficients	$K_s = \frac{c}{v},$	$c, \text{km/s}$ $v, \text{km/s}$
11.	Līnijas darba rimšana	$a_d = \alpha \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3, \text{dB}$	$\alpha, \text{dB/km}$ $\Delta a_1, \text{dB}$ $\Delta a_2, \text{dB}$ $\Delta a_3, \text{dB}$

1.3. Koaksiālo kabeļu sakaru līnijas (KKSL)

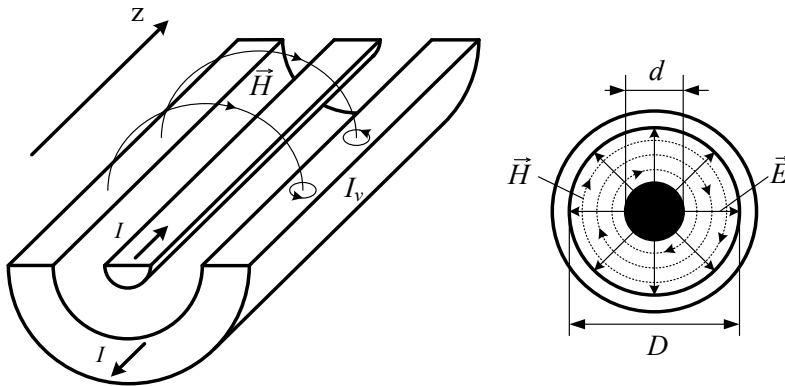
1.3.1. Ievads

Koaksiālo kabeļu sakaru līniju (KKSL) veido divi metāliski vadītāji: viens – caurules formā (ekrāns), otrs – ievietots caurulē (1.5. att.). Starp ekrānu un centrālo vadu atrodas izolējošs materiāls.



1.5. att. Koaksiāla kabeļa konstrukcija.

Koaksiālo kabeļu sakaru līnija ir noslēgtā tipa virzošā sistēma. Koaksiālus kabeļus pārsvarā izmanto frekvencēm sākot no 50 kHz. Augstfrekvenču signāls rada spēcīgu tuvuma efektu un skinefektu, kad darba strāva plūst tikai plānā slānītī iekšējā vadītāja ārējā pusē un ekrāna iekšējā pusē (1.6. att.) [36], [37].



1.6. att. Viļņu izplatīšanās koaksiālajā kabelī.

Līnijā var izplatīties elektromagnētiskie **TEM**, magnētiskie **E**, elektriskie **H** un jauktie šķērsviļņi. Elektromagnētiskais lauks ir koncentrēts koaksiāla kabeļa iekšienē un aiz ārējās izolācijas robežām ir vienāds ar nulli. Tādā veidā koaksiālo kabeļu sakaru līniju parametrus var aprakstīt, izmantojot tuvinātus matemātiskus modeļus un neņemot vērā blakusķēžu ietekmi.

1.3.2. KKSL primārie parametri

Koaksiālās līnijas galvenie raksturlielumi, tāpat kā simetrisko kabeļu sakaru līnijai, ir četri pārraides parametri: aktīvā pretestība; vadītspēja; induktivitāte; kapacitāte [38]. Tie attēlo kabeļa materiālu fizikālo īpašību ietekmi uz signāla pārraides kvalitāti.

Aktīvo pretestību R un induktivitāti L var izteikt no vadītāja pilnās iekšējās pretestības:

$$Z = R + j\omega L, \Omega \quad (1.26.)$$

kapacitāti C un vadītspēju G – no pilnās vadītspējas formulas:

$$Y = G + j\omega C, S \quad (1.27.)$$

kur ω – cikliskā frekvence (1.19.), rad/s.

Aktīvā pretestība nosaka elektriskas enerģijas zudumus līnijā. Koaksiāla kabeļa kopējā pretestība ir iekšējā R_a un ārējā R_b vadītāja summa:

$$R = R_a + R_b, \Omega \quad (1.28.)$$

Iekšējā vadītāja pretestību, ņemot vērā kabeļa konstrukciju, aprēķina kā dzīslas pretestību. Iekšējā vadītāja pretestību vispārējā gadījumā izsaka, izmantojot cilindriskās funkcijas:

$$R_a = R_0 \cdot [1 + F(x)], \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.29.)$$

kur R_0 – aktīvā garuma pretestība līdzstrāvai (1.2.), Ω/km ;

$F(x)$ – cilindriskā funkcija, kas raksturo pretestības palielināšanos virsmas efekta dēļ;

x – cilindriskās funkcijas arguments (1.4. tab.).

Praksē koaksiālā kabeļa izmantošana ir efektīvāka augstfrekvenču signālu pārraidei. Tādā gadījumā garuma pretestības aprēķināšanai lieto vienkāršoto formulu:

$$R_a = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi \cdot \sigma_a}} \cdot \frac{1}{d} \cdot 10^6, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.30.)$$

kur f – signāla darba frekvence, Hz;

d – iekšējā vadītāja diametrs, mm;

μ – absolūtā magnētiskā caurlaidība (1.6.), H/m;

σ_a – materiāla, no kura izgatavots iekšējais vadītājs, elektriskā vadītspēja, S/m.

Ārējā vadītāja pretestību augstās frekvencēs aprēķina pēc analogiskas formulas:

$$R_b = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi \cdot \sigma_b}} \cdot \frac{1}{D} \cdot 10^6, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.31.)$$

kur D – kabeļa ekrāna iekšējais diametrs, mm;

σ_b – materiāla, no kura izgatavots ekrāns, elektriskā vadītspēja, S/m.

Saskaitot kopā abu vadītāju pretestības (1.30.) un (1.31.), tiek iegūta koaksiālā kabeļa pilnās garuma pretestības formula:

$$R = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_a \cdot d} + \frac{1}{\sigma_b \cdot D} \right) \cdot 10^6, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.32.)$$

Pieņemot relatīvās magnētiskās caurlaidības lielumu $\mu_r = 1$, pretestības noteikšanai var izmantot vienkāršotu izteiksmi. Koaksiālā kabeļa garuma pretestība, ja vadītāji ir izgatavoti no vara:

$$R = 4,18 \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) \cdot 10^{-2}, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.33.)$$

Ja abi koaksiālā kabeļa vadītāji ir no alumīnija, tad:

$$R = 5,2 \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) \cdot 10^{-2}, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1.34.)$$

Koaksiālā kabeļa garuma induktivitāte sevī iekļauj ne tikai vadītāju iekšējās induktivitātes parametrus L_a un L_b , bet arī starpvadu induktivitāti L_c :

$$L = L_a + L_b + L_c, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.35.)$$

Iekšējās dzīslas induktivitāti, neatkarīgi no signāla veida līnijā, var atrast ar cilindrisko funkciju palīdzību:

$$L_a = \frac{\mu}{2} \cdot Q(x) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.36.)$$

kur $Q(x)$ – cilindriskā funkcija, kas apraksta pretestības pazemināšanos virsmas efekta dēļ.

Iekšējās induktivitātes formula centrālajai dzīslai, līnijā pārraidot augstfrekvenču signālus, izskatās šādi:

$$L_a = \frac{\sqrt{\mu}}{2d \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot f \cdot \sigma_a}} \cdot 10^6, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.37.)$$

un kabeļa ekrānam:

$$L_b = \frac{\sqrt{\mu}}{2D \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot f \cdot \sigma_b}} \cdot 10^6, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.38.)$$

Starpvadu induktivitātes lielumu nosaka starpvadu magnētiskā plūsma. Induktivitāti aprēķina pēc formulas:

$$L_c = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^3, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.39.)$$

Kopējā līnijas garuma induktivitāte tiek atrasta no izteiksmes (1.35.):

$$L = \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_a \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_b \cdot D}} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.40.)$$

Savukārt, koaksiālajam kabelim no vara induktivitāti aprēķina pēc precizētas formulas:

$$L = \left[\frac{66,6}{\sqrt{f}} \cdot \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right] \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.41.)$$

un kabelim ar alumīnija vadītājiem attiecīgi:

$$L = \left[\frac{82,7}{\sqrt{f}} \cdot \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) + 2 \ln \left(\frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (1.42.)$$

Garuma kapacitāte, atšķirībā no garuma pretestības un induktivitātes, nav atkarīga no pārraidāmā signāla frekvences un to aprēķina pēc cilindriska kondensatora kapacitātes formulas:

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{D}{d} \right)}, \frac{\text{F}}{\text{km}} \quad (1.43.)$$

kur ε_r – izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība.

Mainīgā elektromagnētiskā lauka iedarbībā kabeļa izolācijā rodas pārorientācijas un dipolu polarizācijas procesi, kas izraisa enerģijas zudumus kapacitīvas strāvas dēļ.

Vadīspēja atspoguļo šo parādību ietekmi un to aprēķina kā zudumu komponenti kondensatora dielektriķī:

$$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \text{tg} \delta(f), \frac{\text{S}}{\text{km}} \quad (1.44.)$$

kur C – garuma kapacitāte, F/km;

$\text{tg} \delta(f)$ – izolācijas zuduma leņķa tangenss uzdotajā frekvencē f (1.6. tab.).

1.3.3. KKSL sekundārie parametri

Sakaru līnijas sekundāros parametrus aprēķina, izmantojot primāro parametru vērtības. Viļņu pretestību var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \Omega \quad (1.45.)$$

tomēr frekvenču spektrā no 60 kHz vai augstāk $R \ll \omega L$ un $G \ll \omega C$, kas nozīmē, ka pretestību un vadīspēju var neņemt vērā:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}, \Omega \quad (1.46.)$$

Koaksiālās līnijas viļņa pretestības vērtību pieņemts aprēķināt, neņemot vērā signāla frekvenci:

$$Z_v = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right), \Omega \quad (1.47.)$$

Garuma rimšanas koeficienta lielumu nosaka enerģijas zudumi kabeļa metāla vadītājos un dielektriķī. To var izteikt no elektromagnētisko viļņu izplatīšanās koeficienta (1.18.) vai aprēķināt pēc formulas:

$$\alpha = 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.48.)$$

Fāzes koeficientu aprēķina no izteiksmes:

$$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{\text{rad}}{\text{km}} \quad (1.49.)$$

Signāla izplatīšanās ātrums ir apgriezti proporcionāls fāzes koeficientam:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot f}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad (1.50.)$$

kur β – fāzes koeficients, rad/km.

Saīsinājuma koeficients:

$$K_s = \frac{c}{v}, \quad (1.51.)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^5$ km/s.

Signāla izplatīšanās laiks:

$$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, \text{ s} \quad (1.52.)$$

kur L_g – sakaru līnijas garums, km.

1.3.4. KKSL parametru aprēķināšanas secība

Koaksiālas sakaru līnijas primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība un attiecīgas parametru noteikšanas formulas ir apkopotas 1.8. tabulā.

1.8. tabula

KKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība

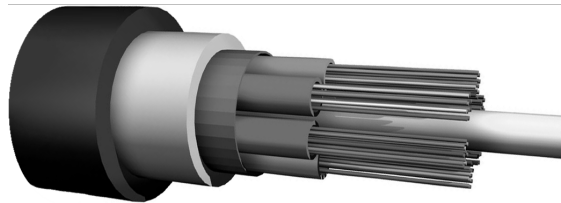
N. p. k.	Parametrs	Formula, mērvienība	Mainīgie, mērvienības
1.	Garuma pretestība	$R = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_a \cdot d} + \frac{1}{\sigma_b \cdot D} \right) \cdot 10^6, \frac{\Omega}{\text{km}}$	$R_0, \Omega/\text{km}$ d, mm a, mm
2.	Garuma induktivitāte	$L = \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_a \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_b \cdot D}} \right) + 2 \ln \left(\frac{D}{d} \right) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}}$	d, mm a, mm
3.	Garuma kapacitāte	$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{D}{d} \right)}, \frac{\text{F}}{\text{km}}$	d, mm a, mm
4.	Garuma vadītspēja	$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \text{tg} \delta, \frac{\text{S}}{\text{km}}$	f, Hz $C, \text{F/km}$
5.	Viļņu pretestība	$Z_v = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right), \Omega$	d, mm a, mm

N. p. k.	Parametrs	Formula, mērvienība	Mainīgie, mērvienības
6.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{km}}$	$R, \Omega/\text{km}$ $L, \text{H}/\text{km}$ $C, \text{F}/\text{km}$ $G, \text{S}/\text{km}$
7.	Fāzes koeficients	$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{\text{rad}}{\text{km}}$	f, Hz $L, \text{H}/\text{km}$ $C, \text{F}/\text{km}$
8.	Signāla izplatīšanās ātrums	$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{\text{km}}{\text{s}}$	$L, \text{H}/\text{km}$ $C, \text{F}/\text{km}$
9.	Saīsinājuma koeficients	$K_s = \frac{c}{v},$	$c, \text{km}/\text{s}$ $v, \text{km}/\text{s}$
10.	Signāla izplatīšanās laiks	$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, \text{s}$	L_g, km $v, \text{km}/\text{s}$

1.4. Šķiedru optiskās sakaru līnijas (ŠOSL)

1.4.1. Ievads

Optiskā šķiedra – šķiedru optiskās sakaru līnijas (ŠOSL) elements, kas pārnes signālu. Konstruktīvi to var izskatīt kā apaļu dielektrisku viļņvadu ar serdeni un apvalku (1.7. att.), kas darbojas optiskajā frekvenču diapazonā.



1.7. att. Optiskās šķiedras kabelis.

Optiskās šķiedras serdenis ir ražots no caurspīdīga stikla un paredzēts optiskās enerģijas pārraidei, savukārt apvalks izgatavots no stikla ar mazāku caurspīdīgumu, kas neļauj enerģijai šķērsot serdeņa robežas un nodrošina pilnas iekšējās atstarošanās nosacījumu [36], [37]. Turklāt apvalks piešķir šķiedrai mehānisku stiprumu un aizsargā gaismas izplatījuma apgabalu no ārējiem traucējumiem.

Visplašāk ir izplatīti šādi optisko šķiedru tipi (1.8. att.):

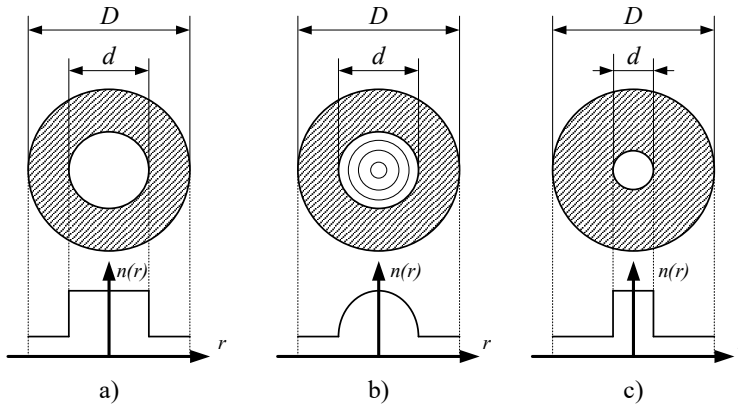
- a) daudzmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu;
- b) daudzmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta gradienta profilu;
- c) vienmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu.

1.9. tabulā ir doti optisko šķiedru standartizmēri:

1.9. tabula

Optiskās šķiedras standartizmēri

Optiskās šķiedras tips	Iekšējais diametrs $d, \mu\text{m}$	Ārējais diametrs $D, \mu\text{m}$
Daudzmodu, pakāpeniskais profils	100–200	140–240
Daudzmodu, gradienta profils	50–62,5	125
Vienmodu šķiedra	8–9	125



1.8. att. Optiskās šķiedras tipi: a) daudzmodu ar pakāpenisko profilu; b) daudzmodu ar gradienta profilu; c) vienmodu.

1.4.2. ŠOSL parametri

Gaismas plūsma izplatās optiskajā šķiedrā saskaņā ar staru modeļa likumsakarībām. Lai signāls varētu izplatīties šķiedrā, kad gaismas stars atstarojas no serdeņa un apvalka robežas, serdeņa laušanas rādītājam jābūt lielākam par apvalka laušanas rādītāju ($n_1 > n_2$). Laušanas rādītāju relatīvā starpība ir viens no svarīgākajiem optiskās šķiedras raksturlielumiem:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (1.53.)$$

kur n_1 – serdeņa materiāla laušanas koeficients;

n_2 – apvalka materiāla laušanas koeficients;

Ja gaismas stars, kas izplatās vidē ar laušanas rādītāju n_1 , ienāk sadales robežā ar vidi, kurai ir mazāks laušanas koeficients, tad, krītot uz robežu zem leņķa φ_1 , viņš pārlūzīs un turpinās

savu ceļu zem leņķa φ_2 . Saite starp krituma un laušanas leņķiem tiek noteikta ar Snelliusa likumu:

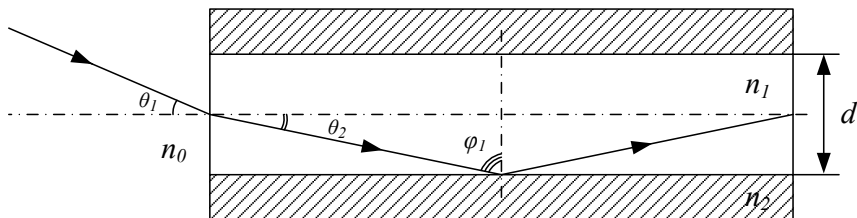
$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.54.)$$

Saskaņā ar Snelliusa likumu, krituma leņķis φ_1 , pie kura $\varphi_2 = 90^\circ$, tiek saukts par robežleņķi:

$$\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1.55.)$$

Ja krituma leņķis φ_1 ir lielāks par robežleņķi φ_c , tad stars neiet vidē ar mazāku laušanas koeficientu un atstarojas no robežas. Gaismas stari, kas krīt uz robežu zem mazāka leņķa ($\varphi_1 < \varphi_c$) iekļūst apvalkā un rimst tajā.

Viens no svarīgākajiem optisko šķiedru ģeometriskajiem parametriem ir skaitliskā apertūra NA , kura raksturo gaismas stara ievadīšanu šķiedrā. Tā ir saistīta ar maksimālo apertūras leņķi θ_{\max} , kad ievadītais signāls vēl atstarojas un izplatās optiskajā šķiedrā (1.9. att.) [39].



1.9. att. Gaismas stara ievadīšana šķiedrā.

Skaitlisko apertūru aprēķina pēc formulas:

$$NA = n_c \cdot \sin(\theta_{\max}), \quad (1.56.)$$

kur n_c – laušanas koeficients videi, caur kuru gaismas stars tiek ievadīts šķiedrā;

θ_{\max} – maksimālais apertūras leņķis, $^\circ$.

Tā kā gaismas stars tiek ievadīts šķiedrā caur gaisa spraugu, un gaisa laušanas koeficients ir aptuveni vienāds $n_0 = 1$, skaitlisko apertūru var izteikt caur laušanas rādītājiem šādā veidā:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1.57.)$$

Gaismas izplatīšanu šķiedrā raksturo arī normētā frekvence V , kura tiek noteikta pēc formulas:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda}, \quad (1.58.)$$

kur d – šķiedras serdeņa diametrs, μm ;

NA – skaitliskā apertūra;

λ – darba viļņa garums, μm .

Maksvela viļņu vienādojumos gaismas stari tiek pielīdzināti viļņiem, un dažādi viļņu veidi (vienādojumu risinājumi) tiek saukti par modām. Optiskajā šķiedrā var eksistēt bezgalīgi liels modu skaits. Turklāt optiskajā viļņvadā izplatās tikai divi viļņu pamattipi: simetriskie (E_{0m} , H_{0m}), kuriem tikai viena gareniskā sastāvdaļa, un nesimetriskie jeb jauktie viļņi (EH_{nm} , HE_{nm}).

Optiskajā šķiedrā var izplāties gan viena (vienmodu režīms), gan arī vairākas modas (daudzmodu režīms). Maksvela vienādojumu risinājums vienmodu režīmam ļauj atrast vienas modas izplatīšanas kritēriju: $V < 2,405$ [38]. Normētajai frekvencei pieaugot, modu daudzums sāk strauji palielināties, un pie augstām vērtībām modu daudzumu šķiedrai ar pakāpenisko profilu var novērtēt pēc formulas:

$$N_M \approx \frac{1}{2} V^2, \quad (1.59.)$$

kur V – normētā frekvence;

Modu daudzums šķiedrai ar parabolisku laušanas rādītāja profilu:

$$N_M \approx \frac{1}{4} V^2, \quad (1.60.)$$

Modu skaits optiskajā šķiedrā ir atkarīgs no normētās frekvences, serdeņa diametra, apertūras un viļņa garuma. Modu skaitu var samazināt, palielinot darba viļņa garumu, samazinot apertūru vai serdeņa diametru.

Katrai modai ir kritiskais viļņa garums un kritiskā frekvence f_{kr} ; elektromagnētiskie viļņi ar frekvenci mazāku par kritisko optiskajā šķiedrā neizplatās. Ja signāla frekvence ir lielāka par kritisko frekvenci ($f > f_{kr}$), elektromagnētiskā lauka enerģija koncentrējas serdeņa iekšienē, bet ja tā ir mazāka – visa enerģija tiek izkliedēta apkārtējā vidē.

Viļņa garumu, pie kura optiskajā viļņvadā izplatās tikai pamata moda, sauc par kritisko. Kritisko viļņa garumu var aprēķināt no izteiksmes:

$$\lambda_{kr} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2,405}, \mu\text{m} \quad (1.61.)$$

Ja darba viļņa garums ir mazāks par kritisko, tad gaisma šķiedrā izplatās daudzmodu režīmā. Kritiskā frekvence tiek noteikta kā gaismas ātruma un kritiskā viļņa garuma attiecība:

$$f_{kr} = \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3, \text{MHz} \quad (1.62.)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^5$ km/s.

Elektromagnētisko viļņu fāzu ātrums v_ϕ optiskajā šķiedrā ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu atrodas robežās [38]:

$$\frac{c}{n_1} \cdot 10^3 < v_\phi \leq \frac{c}{n_2} \cdot 10^3, \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.63.)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^5$ km/s;

n_1 – serdeņa laušanas rādītājs;

n_2 – apvalka laušanas rādītājs.

Tā kā gaismas vadi nav ideāli, tajos rodas optiskā signāla jaudas zudumi. Zudumu lielums tiek novērtēts ar garuma rimšanas koeficientu, kas ir atkarīgs no zudumiem optiskajā viļņvadā un kabelī (1.64.). Signāla rimšana ietekmē reģenerācijas iecirkņa garumu.

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_k, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.64.)$$

kur α_v – zudumi optiskajā viļņvadā, dB/km;

α_k – optiskā kabeļa zudumi, dB/km.

Kabeļa zudumi ir saistīti ar kabeļa deformāciju, makro un mikro izliekumiem, kas rodas arī ražošanas laikā. Tāpēc ražotājfirmas mēra šķiedras rimšanu uzdotajā viļņa garumā un iegūto lielumu iekļauj kabeļa pases datos.

Kopējie pašzudumi (garuma rimšanas koeficients) optiskajai šķiedrai no kvarca stikla tiek izteikti ar formulu:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_R + \alpha_p, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.65.)$$

kur α_a – enerģijas absorbcijas zudumi, dB/km;

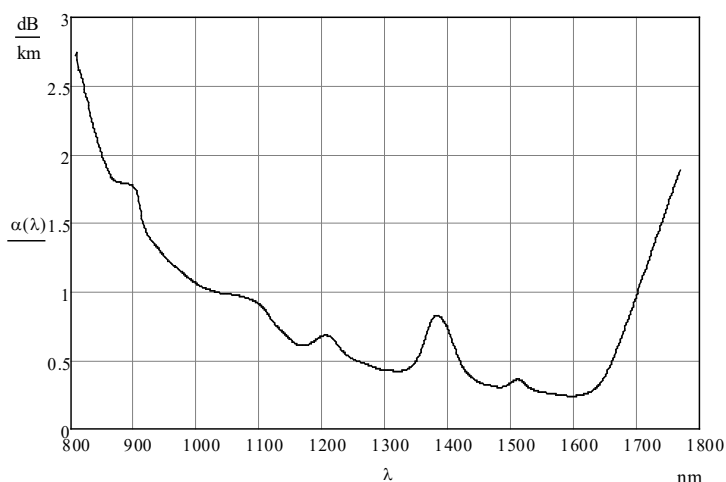
α_R – Releja izkliedes zudumi, dB/km;

α_p – zudumi, kas rodas materiāla piejaukumu dēļ, dB/km.

Enerģijas absorbcijas zudumi optiskajā šķiedrā ir saistīti ar kvarca pašabsorbcijas efektu ultravioletā un infrasarkanajā spektrā. Viļņa garumam λ palielinoties (1.10. att.), zudumi kvarcā pieaug [39], un infrasarkanajā diapazonā ($\lambda > 1,6 \mu\text{m}$) kvarca stikls zaudē caurspīdīgumu. Absorbcijas zudumus optiskajai šķiedrai aprēķina pēc formulas:

$$\alpha_a = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot \text{tg}\delta}{\lambda} \cdot 8,69 \cdot 10^8, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.66.)$$

kur $\text{tg}\delta$ – viļņvada materiāla zuduma leņķa tangenss, kvarcam – $10 \cdot 10^{-12}$;



1.10. att. Pašzudumu atkarība no viļņa garuma.

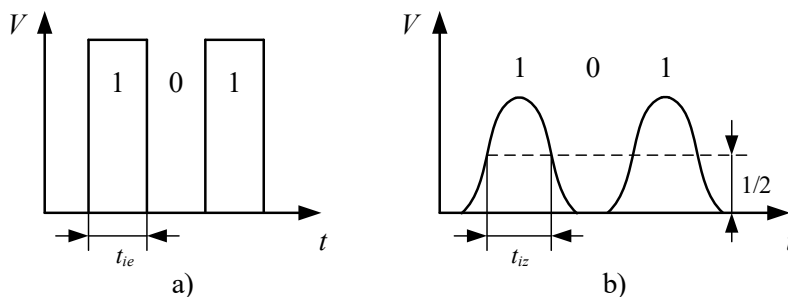
Kā ir redzams, kvarca stiklam pastāv viļņu garumu diapazoni, kuros rimšanas koeficients ir samazināts. Šie diapazoni tiek saukti par caurspīdīguma logiem. Pirmais caurspīdīguma logs – 850 nm, otrs – 1310 nm, trešais – 1550 nm. Šos viļņu garumus un blakus diapazonus izmanto šķiedru optikas sakaru līnijās.

Izkliedes zudumus nosaka optiskā viļņvada materiāla neviendabīgums. Izkliedes procesā molekulas un daļiņas ģenerē sekundāros viļņus, kad gaismas kvanti krīt uz tām. Ja daļiņas izmēri ir mazāki par viļņa garumu, tad tiek novērota Releja izkliede. Zudumus, kas rodas Releja izkliedes rezultātā aprēķina pēc formulas:

$$\alpha_R = \frac{K_R}{\lambda^4}, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (1.67.)$$

kur K_R – Releja izkliedes koeficients, kvarcam $0,8-1,5 \mu\text{m}^4 \cdot \text{dB}/\text{km}$ [38].

Pārraidot signālu šķiedru optikas sakaru līnijā, signālu impulsa forma ievērojami mainās. Jo garāka ir līnija, jo lielāki ir signāla kropļojumi un platāki impulsi līnijas izejā (1.11. att.). Šāds impulsu paplašinājums tiek saukts par dispersiju.



1.11. att. Signāla impulsi optiskās šķiedras sakaru līnijas: a) ieejā; b) izejā.

Noteikta garuma L šķiedru optikas kabeļa dispersija tiek aprēķināta kā izejas un ieejas (Gausa formas) impulsu ilgumu kvadrātiskā starpība:

$$\tau(L) = \sqrt{t_{iz}^2 - t_{ie}^2}, \text{ s} \quad (1.68.)$$

kur t_{iz} – izejas signāla impulsa laiks, s;

t_{ie} – ieejas signāla impulsa laiks, s.

Dispersiju raksturo trīs pamatfaktori:

- 1) modu izplatīšanās ātrumu atšķirība (starpmodu dispersija);
- 2) viļņvada struktūras īpašības (viļņvada dispersija);
- 3) optiskās šķiedras materiāla īpašības (materiālā dispersija).

Rezultatīva dispersija tiek izskaitļota pēc formulas:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{hr}^2} = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_v)^2}, \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (1.69.)$$

kur τ_{mod} – starpmodu dispersija, ps/km;

τ_{hr} – hromatiskā dispersija, ps/km.

Starpmodu dispersija eksistē tikai daudzmodu šķiedrās, turklāt tā dominē citu dispersijas veidu starpā. Katrs stars daudzmodu šķiedrā atstarojas no serdeņa robežas zem dažāda leņķa, laika aizture un izplatīšanās ātrums visiem stariem ir atšķirīgs. Starpmodu dispersijas lielumu optiskajai šķiedrai ar pakāpenisko profilu aprēķina pēc formulas:

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot 10^{12}, \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (1.70.)$$

gradienta tipa šķiedrai ar parabolisku laušanas koeficienta profilu:

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{n_1 \cdot \Delta^2}{2c} \cdot 10^{12}, \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (1.71.)$$

kur c – gaismas ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^5$ km/s.

Serdeņa materiāla laušanas rādītāja atkarību no viļņa garuma nosaka materiālās dispersijas lielumu:

$$\tau_{\text{mat}} = \Delta\lambda \cdot M(\lambda), \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (1.72.)$$

kur $\Delta\lambda$ – starojuma avota spektra platums (3.2. tabula), nm;

$M(\lambda)$ – īpatnējās materiālās dispersijas vērtība no 3.6. grafika, ps/(nm · km).

1.10. tabula

Optisko raidītāju starojuma spektra platuma vērtības

Optiskais raidītājs	Starojuma avota spektra platums $\Delta\lambda$, nm
Pusvadītāju lāzers	0,1–4
Gaismas diode	15–50

Viļņvadu dispersiju raksturo ar modas izplatīšanās koeficienta atkarību no viļņa garuma un tā tiek aprēķināta pēc formulas:

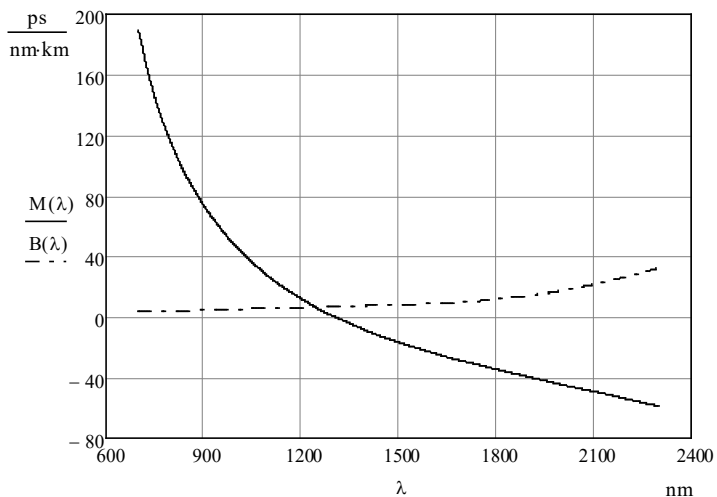
$$\tau_v = \Delta\lambda \cdot B(\lambda), \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (1.73.)$$

kur $B(\lambda)$ – īpatnējā viļņvada dispersija (1.74.), ps/(nm · km).

$$B(\lambda) = \frac{2n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9, \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \quad (1.74.)$$

Īpatnējās materiālās $M(\lambda)$ un viļņvada $B(\lambda)$ dispersijas atkarība no viļņa garuma kvarca stiklam ir parādīta 1.12. grafikā [39].

Ir redzams, ka viļņa garumam pieaugot, īpatnējā materiālā dispersija samazinās, un tās raksturliktne šķērso nulles punktu, bet viļņvada dispersija vienmēr ir pozitīva.



1.12. att. Īpatnējā materiālā $M(\lambda)$ un viļņvada $B(\lambda)$ dispersija.

Vienmodu šķiedrā, kur nav starpmodu dispersijas, pie viļņa garuma 1,3 μm rezultatīvā dispersija tiecās uz nulli, un notiek materiālās un viļņvada dispersiju savstarpēja kompensācija. Šī likumsakarība nosaka vienmodu šķiedru lielu caurlaides joslu.

1.11. tabula

Īpatnējās materiālās un viļņvada dispersijas vērtības kvarca stiklam

Viļņa garums λ , nm	Īpatnējā materiālā dispersija $M(\lambda)$, ps/(nm · km)	Īpatnējā viļņvada dispersija $B(\lambda)$, ps/(nm · km)
700	189,58	3,457
800	114,875	3,967
900	73,985	4,579
1000	46,584	5,182
1100	26,743	5,744
1200	12,175	6,315
1300	0,456	7,006
1400	-8,999	7,501
1500	-16,651	8,205
1600	-23,375	8,777
1700	-29,251	9,790
1800	-34,574	11,618
1900	-39,54	14,154
2000	-44,67	17,431
2100	-49,137	21,561
2200	-54,069	26,547
2300	-58,847	32,387

Dispersija ietekmē caurlaides joslas platumu. Optiskās šķiedras caurlaides josla ir frekvenču diapazons, uz kura robežām signāla jauda samazinās par 3 dB. Tāpat kā rimšanas koeficients, caurlaides josla raksturo optiskās sakaru līnijas garumu. Jo mazāka ir caurlaides josla, jo lielāki ir zudumi, pārraidot augstas frekvences signālus.

Caurlaides joslas platumu, normētu uz vienu kilometru, aprēķina pēc formulas:

$$\Delta F = \frac{k_f}{\tau} \cdot 10^{12}, \text{ Hz} \quad (1.75.)$$

kur k_f – signāla impulsu formas koeficients, 0,187–1;

τ – rezultatīvā dispersija, ps.

1.4.3. ŠOSL reģenerācijas iecirkņa garuma aprēķins

Ir zināms, ka optiskās šķiedras pārraides sistēmas reģenerācijas posma garumu nosaka divi parametri: garuma rimšanas koeficients un summārā dispersija. Vienmodu optiskajām šķiedrām ir raksturīgas labas dispersijas raksturlīknes, un reģenerācijas iecirkņa garums tiek noteikts, ņemot vērā tikai rimšanas zudumus [38].

Papildzudumi pārraides sistēmā rodas nesadalāmos savienotājos, sazarotajos, kā arī pašā raidītājā. Nesadalāmo savienotāju skaitu var aptuveni noteikt, izmantojot izteiksmi:

$$n = \frac{L}{l} - 1, \quad (1.76.)$$

kur L – līnijas garums, km;

l – kabeļa būvgarums, km.

Zudumu analīzei sakaru līnijā izmanto enerģijas bilances (drošuma rezerves) jēdzienu, kas nosaka pārraides jaudas un uztvērēja jutības līmeņu starpību. Kopējā enerģētiskā bilance nosaka pieļaujamos zudumus līnijā no gala aparatūras līdz, piemēram, pirmajam reģeneratoram. Vispārējā gadījumā avota jaudas lieluma izvēle ir atkarīga no sakaru līnijas garuma, bet uztvērēja jutībai jebkurā gadījumā jābūt vislabākajai.

Reģenerācijas posma garumu aprēķina pēc formulas:

$$L_m = \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha + (a_{ns}/L_b)}, \text{ km} \quad (1.77.)$$

kur P_r – raidītāja jaudas līmenis, dBm;

P_u – uztvērēja jaudas līmenis, dBm;

δ – enerģijas rezerve, 3–6 dB;

α_r – zudumi raidītājā, dB;

α_s – zudumi savienotājā, dB;

n_s – savienotāju skaits;

α_{ns} – zudumi nesadalāmā savienotājā (metinājumos), dB;

n – nesadalāmo savienotāju skaits (1.76.);

α_{saz} – zudumi sazarotājā, dB;

n_{saz} – sazarotāju skaits;

α – kabeļa garuma rimšanas koeficients (1.65.), dB/km;

L_b – kabeļa būvgarums, km.

1.4.4. ŠOSL parametru aprēķināšanas secība

Šķiedru optiskās sakaru līnijas parametru aprēķināšanas secība un attiecīgas parametru noteikšanas formulas ir apkopotas 1.12. tabulā.

1.12. tabula

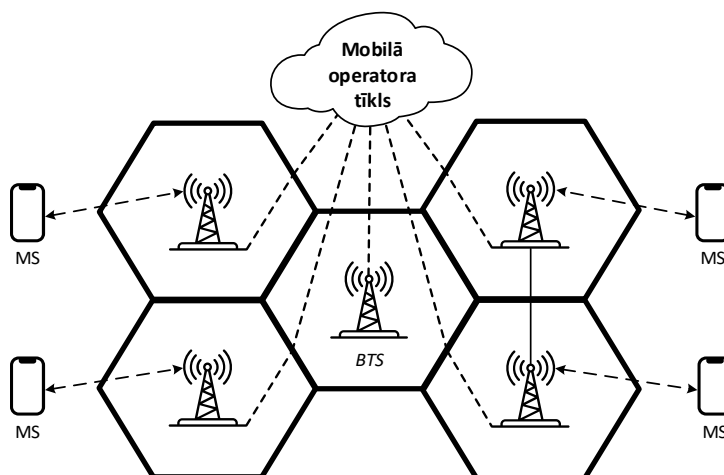
ŠOSL parametru aprēķināšanas secība

N. p. k.	Parametrs	Formula, mērvienība	Mainīgie, mērvienības
1.	Apvalka laušanas koeficients	$n_2 = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta}$	–
2.	Skaitliskā apertūra	$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$	–
3.	Raksturojošā frekvence	$V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda}$	$d, \mu\text{m}$ $\lambda, \mu\text{m}$
4.	Kritiskā viļņa garums	$\lambda_{kr} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2,405}, \mu\text{m}$	$d, \mu\text{m}$
5.	Kritiskā frekvence	$f_{kr} = \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3, \text{MHz}$	$\lambda_{kr}, \mu\text{m}$
6.	Fāžu ātrums	$v_\varphi \leq \frac{c}{n_1} \cdot 10^3,$	$c, \text{km/s}$
7.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot \text{tg} \delta}{\lambda} \cdot 8,69 \cdot 10^8 + \frac{K_R}{\lambda^4}, \frac{\text{dB}}{\text{km}}$	$\lambda, \mu\text{m}$ $K_R, \mu\text{m}^4 \cdot \text{dB/km}$
8.	Kopējā dispersija	$\tau = \Delta \lambda \cdot \left(M(\lambda) + \frac{2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9 \right), \frac{\text{ps}}{\text{km}}$	$\Delta \lambda, \text{nm}$ $M(\lambda), \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ $c, \text{km/s}$ $\lambda, \mu\text{m}$
9.	Kanāla caurlaides josla	$\Delta F = \frac{k_f}{\tau} \cdot 10^{12}, \text{Hz}$	τ, ps
10.	Reģenerācijas iecirkņa garums	$L_m = \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha + (a_{ns}/L_b)}, \text{dB}$	P_r, P_u, dBm $\alpha_r, \alpha_s, \alpha_{ns}, \alpha_{saz}, \text{dB}$ $a, \text{dB/km}$

2. MOBILO SAKARU TĪKLU (MST) MATEMĀTISKIE MODEĻI DZELZCEĻA TRANSPORTĀ

2.1. Ievads

Mobilais jeb šūnu tīkls ir bezvadu sakaru tīkls, kura pamatā ir pārklājuma zonas sadalīšana apgabalos – šūnās. Katrā šūnā ir viena vai vairākas stacionāri izvietotas bāzes stacijas (*Base Transceiver Station, BTS*), kas nodrošina sakarus starp abonentu mobilām ierīcēm (*Mobile Station, MS*). Mobilā tīkla vienkāršotā arhitektūra ir parādīta 2.1. attēlā.



2.1. att. Vienkāršotā mobilā sakaru tīkla arhitektūra.

Modernus mobilo sakaru protokolus izstrādā 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, 3. paaudzes partnerības projekts) konsorcijs, kurš sevī apvieno vairākas Eiropas, ASV, Ķīnas, Indijas, Korejas un Japānas standartu organizācijas.

Visas mobilo sakaru tehnoloģijas tiek iedalītas paaudzēs, kuras apzīmē ar kārtas skaitļa vārdiem. Pirmās šūnu sakaru sistēmas (0G) kā koncepcija parādījās vēl Otrā pasaules kara laikā, bet pirmā komerciālā sakaru sistēma ar šūnu topoloģiju bija izstrādātā un palaista ASV 1946. gadā. Pie pirmās paaudzes (1G) tehnoloģijām attiecinā visus analogās balss sakaru standartus, jo otrās paaudzes un vēlākie standarti (2G–5G) balstās uz ciparu sakariem. Mobilo sakaru standarti ar sadalījumu pa paaudzēm ir parādīti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Mobilo sakaru paaudzes

Paaudze	Pirmo tīklu palaišanas gads	Standarti
0G	1946	<i>MTS, IMTS, Altai, OLT, MTD, AMTS, Autotel, ARP, B-Netz, AMR</i>
1G	1978	<i>AMPS, TACS, NMT, C450, Hicap, Mobitex, DataTAC</i>

2.1. tabulas turpinājums

Paaudze	Pirmo tīklu palaišanas gads	Standarti
2G	1991	<i>GSM, CSD, cdmaOne, D-AMPS, CDPD, iDEN, PDC, PHS</i>
2,5G	1999	<i>GPRS, HSCSD, CDMA2000 1X</i>
2,75G	2003	<i>EDGE, CDMA2000 1X Advanced</i>
3G	2001	<i>UMTS, EV-DO</i>
3,5G	2005	<i>HSPA, EV-DO, Mobile WiMAX, Flash-OFDM, iBurst, HiperMAN</i>
3,75G	2008	<i>HSPA+</i>
3,9G	2009	<i>LTE</i>
4G	2013	<i>LTE-A, WiMAX Rel. 2</i>
4,5G / 4,9G	2015	<i>LTE-A Pro, LTE-M (eMTC), NB-IoT</i>
5G	2018	<i>5G NR SA, 5G NR NSA</i>

2.2. MST dzelzceļa transportā

2.2.1. Ievads

GSM dzelzceļam jeb *GSM-R* (*GSM-Railway*) ir starptautiskais otrās paaudzes (2G) bezvadu komunikāciju standarts dzelzceļa balss sakariem, signalizācijai un centralizācijai. *GSM-R* ir Eiropas dzelzceļa satiksmes vadības sistēmas (*ERTMS*) apakšsistēma.

GSM-R izstrāde tika veikta, balstoties uz publisko mobilo sakaru standartu – *GSM*, un bija pabeigta 2000. gadā. Kopš tā laika bezvadu sakaru tehnoloģijas strauji attīstījās, un dzelzceļa satiksmē, kā arī visās transporta jomās, pieauga pieprasījums pēc ātrgaitas, zema latentuma sakariem ar lielu joslas platumu. Mūsdienās *GSM-R* sistēmas tiek uzskatītas par morāli novecojošām: funkcionāli tās vairs neatbilst dzelzceļa operatoru pieprasījumam, aparatūras ražotāji pārtrauc jaunu *GSM-R* iekārtu un rezerves daļu ražošanu, kas negatīvi ietekmē sistēmas apkalpošanu un palielina izmaksas.

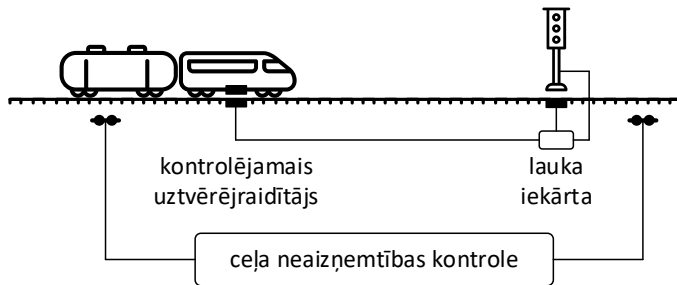
FRMCS (*Future Railway Mobile Communication System*, nākotnes dzelzceļa mobilo sakaru sistēma) projekts, ko 2012. gadā sāka Starptautiskā dzelzceļu savienība (*UIC*), ir vērsts uz jauna dzelzceļa sakaru standarta izveidi ar mērķi nākotnē pilnībā aizstāt *GSM-R*. *FRMCS* radiosakaru apakšsistēma ir pielāgojama vairāku modernu mobilo sakaru standartu izmantošanai (*LTE*, *LTE-A*, *5G NR* u. c.), taču Eiropas Dzelzceļa aģentūras (*European Railway Agency, ERA*) un *UIC* pēdējo gadu lēmumi, kā arī Eiropas Savienības stratēģija *5G* izvēršanai Eiropā liecina par to, ka jaunais standarts tiks balstīts *5G* sakaros.

2.2.2. ERTMS

ERTMS (European Rail Traffic Management System) ir divi galvenie elementi: pirmais ir Eiropas vilcienu kontroles sistēma (*ETCS*), kas aizstāj līdzšinējās vilcienu aizsardzības sistēmas (*ATP*, automātiskā vilcienu aizsardzība) un ir izstrādāta, lai aizstātu daudzas nesaderīgas drošības sistēmas, ko pašlaik izmanto Eiropas dzelzceļos. Tā ietver no vilciena aprīkojumu un lauka iekārtu elementus, kas veido sistēmu, kas uzrauga vilciena satiksmi. *ETCS* nodrošina reāllaika informāciju gan mašīnistiem, gan dispečeriem, tādējādi uzlabojot vilcieni vadības pielāgojamību. *ETCS* var īstenot dažādos līmeņos, kuri nosaka, vai tiek izmantoti sliežu ceļa signāli un kā notiek datu pārraide starp vilcieni un dzelzceļa infrastruktūru. Otrs *ERTMS* elements ir *GSM-R*, kas ir dzelzceļam optimizēts mobilo sakaru tīkls. Šī tīkla ietvaros tiek nodrošināti dzelzceļam specifiski balss un datu pārraides pakalpojumi.

Pamatojoties uz dažādām sakaru tehnoloģijām, lauka iekārtām ir noteikti vairāki *ETCS* līmeņi. Izmantojot šos līmeņus, dzelzceļu operatori var pielāgot *ETCS* dažādām ekspluatācijas vajadzībām. Visos šajos līmeņos izmanto vienas un tās pašas vilcieni iekārtas. *GSM-R* nodrošina bezvadu sakarus otrā un trešā *ETCS* līmenī.

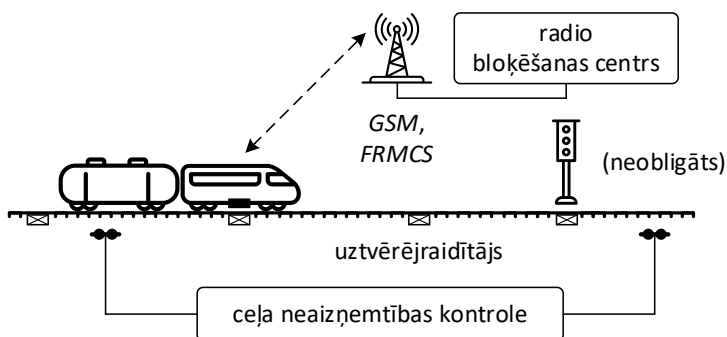
ETCS 1. līmenī darbojas kā uzlabota periodiskā *ATP* sistēma (2.2. att.). Vilcieni vadības datus pārraida kontrolējamie uztvērējraidītāji, kas informāciju saņem no tradicionālās signalizācijas sistēmas caur lauka iekārtām. Mobilo sakaru tehnoloģijas šajā līmenī netiek izmantotas.



2.2. att. 1. līmeņa *ETCS* darbības shēma.

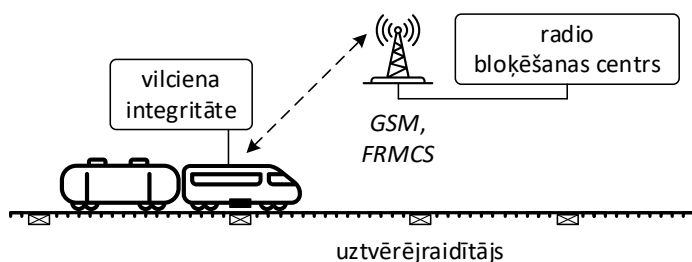
ETCS 2. līmenī darbojas kā nepārtraukta *ATP* sistēma, kurā vilcieni vadības datus pārraidīti caur ciparu radiokanālu (2.3. att.). Nekontrolējamus uztvērējraidītājus izmanto kā atskaites punktus vilciena atrašanās vietas noteikšanai.

Noteiktos intervālos vilcieni automātiski pārraida informāciju par savu atrašanās vietu uz radio bloķēšanas centru (*Radio Block Center, RBC*), kas izsniedz vilcieniem kustības atļaujas. Tomēr vilcieni atdalīšanu posmos joprojām kontrolē stacionārās bloku sekcijas, kas aprīkotas ar tradicionālo ceļu brīvības noteikšanas tehnoloģiju (sliežu ķēdes vai asu skaitītāji). Sliežu ceļa signāli nav nepieciešami, bet tos var izmantot.



2.3. att. 2. līmeņa ETCS darbības shēma.

ETCS 3. līmenis papildina sistēmu ar vilciena integritātes (veseluma) pārbaudi. Tas novērš vajadzību pēc fiksētiem bloku posmiem, lai noteiktu, vai sliežu ceļš ir brīvs (2.4. att.).



2.4. att. 3. līmeņa ETCS darbības shēma.

Atšķirībā no 1. un 2. līmeņa, ETCS 3. līmenī ir ne tikai ATP un kabīnes signalizācijas sistēma, bet arī iespēja veikt uz radio bāzētu vilcieniem atdalīšanu ceļa posmos, aizstājot tradicionālo bloku sistēmu. Atkarībā no ekspluatācijas vajadzībām, vilcieniem atdalīšanu var veikt, izmantojot virtuālo statisku vai dinamisku bloku. Tā kā šajā līmenī netiek izmantotas tradicionālās ceļa brīvības noteikšanas tehnoloģijas, vairs nav iespējams izmantot lauka signālus ekspluatācijai pazeminātajā režīmā.

2.2.3. GSM-R

ERTMS koncepcijas izstrādes stadijā tika nolemts, ka dzelzceļa bezvadu sakaru tehnoloģiju izmantošanai ETCS nav lietderīgi izstrādāt pašiem, bet tā vietā jābalstās uz jau pieejamu, labi zināmu mobilo sakaru standartu. Pēc sākotnējās izpētes tika piedāvāti divi pretendenti: GSM un TETRA. TETRA tolaik bija vēl standartizācijas posmā, bet GSM jau bija standartizētā un pārbaudītā komerciālā tehnoloģija, kura arī tika izvēlēta.

Jaunās dzelzceļa tehnoloģijas izveide, pamatojoties uz populāru komerciālu standartu, sniedz daudz priekšrocību ekonomijas un pieredzes ziņā. GSM-R izstrādes izmaksas bija ievērojami zemākas, jo vajadzēja tikai papildināt esošā standarta funkcionālās prasības un nebija nepieciešams projektēt visu sistēmu no nulles. Turklāt darbinieku tirgū jau bija vairākas

GSM speciālistu grupas, kuru dalībnieki ieguva praktisku pieredzi, ieviešot un ekspluatējot 2G MST tehnoloģiju komerciālajos tīklos.

Tomēr standarta *GSM* tehnoloģija nespēja realizēt visas dzelzceļa nozares prasības. *GSM* ir publisko sakaru pakalpojumu standarts, kura funkcionalitāte ir ierobežota ar mazu pārraides ātrumu un zemu uzticamību [27], [52].

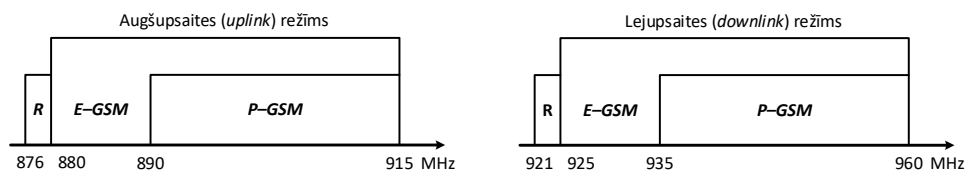
Galvenās atšķirības starp *GSM-R* un publiskajiem *GSM* bezvadu tīkliem ir šādas [9], [27]:

- dažādi frekvenču resursu ierobežojumi;
- atšķirīga tīkla arhitektūra un vienmērīgā radiopārklājuma nodrošināšanas metodes;
- papildus pakalpojumi dzelzceļa infrastruktūras darbībai;
- augstākas drošuma un drošības prasības.

GSM-R sistēmai ir nepieciešama ātrdarbīga un uzticama MST infrastruktūra dzelzceļa sakaru nodrošināšanai. Tāpēc bija nepieciešams papildu darbs, lai to pielāgotu jaunajam nolūkam un papildus funkcionalitātes ieviešanai.

***GSM-R* frekvenču kanāli**

GSM-R frekvenču joslas platums ir tikai 4 MHz, kas ir daudz mazāk nekā publiskajam sakaru standartam *GSM* (2.5. att.), tāpēc frekvenču plānošanā ir vairāk ierobežojumu. Plānojot un optimizējot *GSM-R* tīklu, jāizvairās no traucējumiem, kas var rasties blakusesošu koplietojamu frekvenču dēļ.



2.5. att. Frekvenču sadalījums *GSM* standartu grupā: R – *GSM-R*, P–*GSM* – publisko tīklu diapazons, E–*GSM* – paplašinātais *GSM* diapazons.

GSM-R izmanto 876–880 MHz frekvenču diapazonu augšupsaitei un 921–925 MHz lejupsaitei. Šīs frekvences ir rezervētas dzelzceļiem visā Eiropas Savienībā.

GSM-R sistēmā ir pieejami 69 frekvenču kanāli, kuriem piešķirti *ARFCN* (absolūtie radiofrekvenču numuri) no 955 līdz 1023 (2.2. tab.).

2.2. tabula

GSM-R frekvenču kanāli

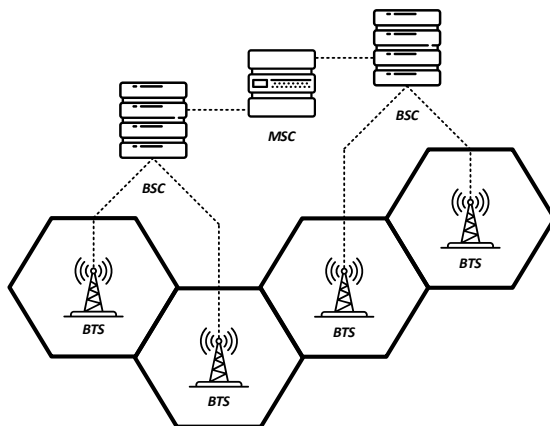
<i>ARFCN</i>	Frekvence, MHz		<i>ARFCN</i>	Frekvence, MHz		<i>ARFCN</i>	Frekvence, MHz	
	Lejupsaite	Augšupsaite		Lejupsaite	Augšupsaite		Lejupsaite	Augšupsaite
955	921,2	876,2	978	925,8	880,8	1001	930,4	885,4
956	921,4	876,4	979	926	881	1002	930,6	885,6
957	921,6	876,6	980	926,2	881,2	1003	930,8	885,8
958	921,8	876,8	981	926,4	881,4	1004	931	886

2.2. tabulas turpinājums

ARFCN	Frekvence, MHz		ARFCN	Frekvence, MHz		ARFCN	Frekvence, MHz	
	Lejupsaite	Augšupsaite		Lejupsaite	Augšupsaite		Lejupsaite	Augšupsaite
959	922	877	982	926,6	881,6	1005	931,2	886,2
960	922,2	877,2	983	926,8	881,8	1006	931,4	886,4
961	922,4	877,4	984	927	882	1007	931,6	886,6
962	922,6	877,6	985	927,2	882,2	1008	931,8	886,8
963	922,8	877,8	986	927,4	882,4	1009	932	887
964	923	878	987	927,6	882,6	1010	932,2	887,2
965	923,2	878,2	988	927,8	882,8	1011	932,4	887,4
966	923,4	878,4	989	928	883	1012	932,6	887,6
967	923,6	878,6	990	928,2	883,2	1013	932,8	887,8
968	923,8	878,8	991	928,4	883,4	1014	933	888
969	924	879	992	928,6	883,6	1015	933,2	888,2
970	924,2	879,2	993	928,8	883,8	1016	933,4	888,4
971	924,4	879,4	994	929	884	1017	933,6	888,6
972	924,6	879,6	995	929,2	884,2	1018	933,8	888,8
973	924,8	879,8	996	929,4	884,4	1019	934	889
974	925	880	997	929,6	884,6	1020	934,2	889,2
975	925,2	880,2	998	929,8	884,8	1021	934,4	889,4
976	925,4	880,4	999	930	885	1022	934,6	889,6
977	925,6	880,6	1000	930,2	885,2	1023	934,8	889,8

GSM-R tīkla arhitektūra

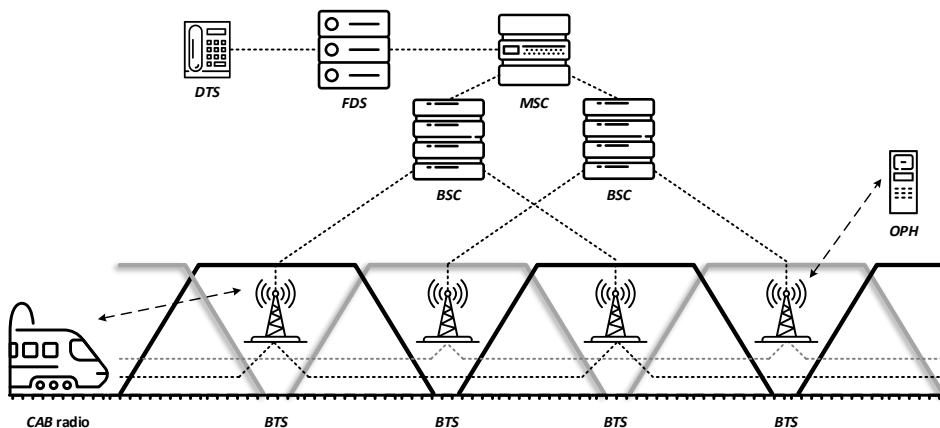
Publiskā GSM tīkla pamatā ir plakana struktūra, kas ir raksturota ar apkalpošanas zonas vienmērīgu radiopārklājumu, realizējot šūnu topoloģiju (2.6. att.).



2.6. att. Publiskā GSM tīkla arhitektūra.

Atsevišķas šūnas, kurās nosaka bāzes staciju *BTS* apkalpošanas zonas, ir apvienotas klasteros un savienotas ar komutācijas centru *MSC* caur *BSC* kontrolleriem.

GSM-R tīklam ir lineāra struktūra: bāzes stacijas un to antenas ir izvietotas tādā veidā, lai nodrošinātu radiopārklājumu gar ceļu ar dubultu pārklāšanos (2.7. att.). Tas ir saistīts ar sakaru drošuma un bojājumpieciecības prasībām, kā arī ar nepieciešamību nodrošināt stabilus sakarus ātrgaitas vilcieniem.



2.7. att. *GSM-R* tīkla arhitektūra.

***GSM-R* standarta papildpakalpojumi**

Eiropas telekomunikāciju standartu institūts (*ETSI*), kas ir par *GSM* atbildīgā standartizācijas iestāde, izstrādāja pirmo papildus pakalpojumu grupu:

- grupas balss izsaukumu pakalpojums (*Voice Group Call System, VGCS*);
- balss apraides pakalpojums (*Voice Broadcast Service, VBS*);
- uzlabota daudzlīmeņu prioritāšu piešķiršana ar savienojuma pārtraukšanu (*Enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service, eMLPP*).

Papildus tam Eiropas integrētā uzlabotā radio tīkla (*European Integrated Radio Enhanced Network, EIRENE*) projekta ietvaros tika precizētas dzelzceļa ekspluatācijas funkcijas [6], un standarts tika papildināts ar:

- funkcionālo adresāciju;
- adresāciju atkarībā no atrašanās vietas;
- piekļuves matricu.

Visas šīs funkcijas ir *ERTMS* dzelzceļa pakalpojumu pamatā un ir realizētas *GSM-R* standartā (piemēram, dzelzceļa ārkārtas izsaukums vai grupas balss izsaukums).

***GSM-R* drošuma prasības**

GSM-R ir kritiski svarīga dzelzceļa infrastruktūras sastāvdaļa, tās drošums, drošība un operāciju efektivitāte ir vissvarīgākie parametri. Tāpēc *GSM-R* bezvadu tīkla visas sistēmas un

atsevišķas aparatūras uzticamībai jābūt daudzreiz augstākai nekā publiskajos *GSM* tīklos. Šis jautājums ir sevišķi svarīgs ātrgaitas dzelzceļiem, platsliežu dzelzceļiem un smagu krāvu vilcienu pārvadājumiem.

Lai uzlabotu *GSM-R* bezvadu tīkla drošību un drošumu ātrgaitas dzelzceļa posmos, kur ātrums pārsniedz 300 km/st., izmanto dubulto *BTS* apkalpošanas zonas radiopārkļājuma vai dubulto bāzes staciju arhitektūru. Neskatoties uz dzelzceļa specializāciju konkrētajā reģionā, visiem *GSM-R* pamattīkliem ir jānodrošina 24 stundu nepārtraukta darbība 7 dienas nedēļā, jo jebkāda dīkstāve radīs daudz traucējumu vilcienu kustības un ekspluatācijas procesu organizēšanā.

***GSM-R* priekšrocības**

GSM-R nodrošina vienotu dzelzceļu sakaru sistēmu. Balss sakaru ziņā tā atbilst visām dzelzceļa prasībām, ne tikai aizstājot mašīnista–vadītāja radiosakarus, bet arī citas sistēmas, piemēram, manevru radiosakarus un apkalpojošā personāla radiosakarus. Viena no šādas vienotas sistēmas priekšrocībām ir dzelzceļa avārijas izsaukums (*REC*), ko var saņemt viss dzelzceļa personāls (izmantojot *GSM-R* ir mobilās stacijas) noteiktā teritorijā neatkarīgi no tā, kādu funkciju tie veic. Attiecībā uz datu pārraidi *GSM-R* galvenokārt tiek izmantots *ETCS* signalizācijas pārraidei.

Pateicoties tam, ka *GSM-R* pamatā ir *GSM* publisko mobilo sakaru standarts, kas ietver precīzi definētu viesabonēšanas funkciju, pastāv ļoti maz sadarbības problēmu, un *GSM-R* labi darbojas pāri valstu un dzelzceļu operatoru zonu robežām. Tomēr tas neattiecas uz *ETCS* sistēmu kopumā, jo tajā pastāv liela pavēlu interpretācijas brīvība, un pie starptautiskās savietojamības nodrošināšanas vēl ir jāturpina strādāt.

***GSM-R* trūkumi**

GSM-R ir sekmīga tehnoloģija, kas ir veiksmīgi īstenojusi tai sākotnēji izvirzītos mērķus, bet, neskatoties uz to, vairāku gadu ekspluatācijas laikā atklājās vairāki būtiski trūkumi [42].

Galvenās *GSM-R* sistēmas nepilnības, kuras ir aktuālas šodien:

- **novecojuši tehnoloģija:** no telekomunikāciju nozares viedokļa tā atpaliek no šodienas MST par 3 paaudzēm;
- **zems drošības līmenis:** pārraidāmas informācijas šifrēšanas neatbilst mūsdienu standartiem;
- **interferences problēmas:** publiskie mobilie operatori, kuri izmanto blakusjoslas dzelzceļa līniju tuvumā, izraisa traucējumus;
- **ierobežota ietilpība:** *GSM-R* pietrūkst kapacitātes normālai *ETCS* darbībai 2. un augstākajos līmeņos, jo katram vilcienam ir nepieciešams patstāvīgs savienojums ar RBC, bet tas aizņem veselu laika slotu;
- **zems datu pārraides ātrums un augsts latentums:** datu pārraide ir kļuvusi svarīgāka par balss saziņu, bet *GSM-R* nespēj nodrošināt datu pārraidi lielos apjomos ar zemu latentumu;

- **aparātūras trūkums:** *GSM-R* ir specializēta tehnoloģija, to izmanto vienā nozarē, kurā ir zema konkurence, un specializētās aparātūras ražotāji nav ieinteresēti savu risinājumu attīstībā un ilgstošā atbalstā;
- **ierobežotā funkcionalitāte:** *GSM-R* standarta ierobežojumi ir šķērslis jaunu pakalpojumu ieviešanai.

2.2.4. *FRMCS*

Līdz ar informācijas tehnoloģiju attīstību, dzelzceļa operatori sagaida no ražotājiem jaunās viedas, efektīvas, drošas un uzticamas telemātikas sistēmas [20]. Tomēr šo prasību realizēšanai ir nepieciešamas modernas sakaru sistēmas ar lielāku joslas platumu un mazāku latentumu, nekā to var nodrošināt *GSM-R*.

2012. gadā *UIC* izveidoja *FRMCS* projekta grupu un uzsāka pētījumu par nākamās paaudzes dzelzceļa mobilo sakaru sistēmu. Tā kā *FRMCS* plāno izmantot *3GPP* tehnoloģijas, paredzams, ka *FRMCS* pamatprasības tiks iekļautas *3GPP* standartos.

2016. gadā *ETSI* un *3GPP* sāka analizēt atšķirības starp dzelzceļa pakalpojumu prasībām un *LTE* standarta specifikācijām. Kopš *3GPP* sakaru standarta 15. versijas (*Release 15*) uz *LTE* balstītie kritiski svarīgie pakalpojumi ir papildināti un uzlaboti, pamatojoties uz dzelzceļa infrastruktūras prasībām.

Šobrīd *3GPP* konsorcijs dalībnieki kopā ar *UIC* un *ETSI* strādā pie 5G standarta pielāgošanas *FRMCS* vajadzībām.

***FRMCS* frekvenču kanāli**

Eiropas Savienības Komisijas 2021. gada 28. septembra Īstenošanas lēmumā (ES) 2021/1730 noteikts, ka Eiropā *FRMCS* sistēmai tiks izmantotas šādās radiofrekvences:

- 874,4–880,0 MHz frekvenčdales duplekta režīma (*FDD*) augšpusaites pārraidei (no *MS* uz *BTS*),
- 919,4–925,0 MHz frekvenčdales duplekta režīmā (*FDD*) lejpusaites pārraidei (no *BTS* uz *MS*)
- 1900–1910 MHz laikdales duplekta režīmā (*TDD*).

Divas 5,6 MHz joslas 900 MHz frekvenču diapazonā ir standarta dzelzceļa spektrs, bet tas pašlaik nav iekļauts mūsdienu *3GPP* standartos. Turpretī 1900–1910 MHz diapazons jau ir ietverts *3GPP* 4G–5G paaudžu *LTE* un *5G NR* standartu frekvenču joslās *B39/N39* (1880–1920 MHz).

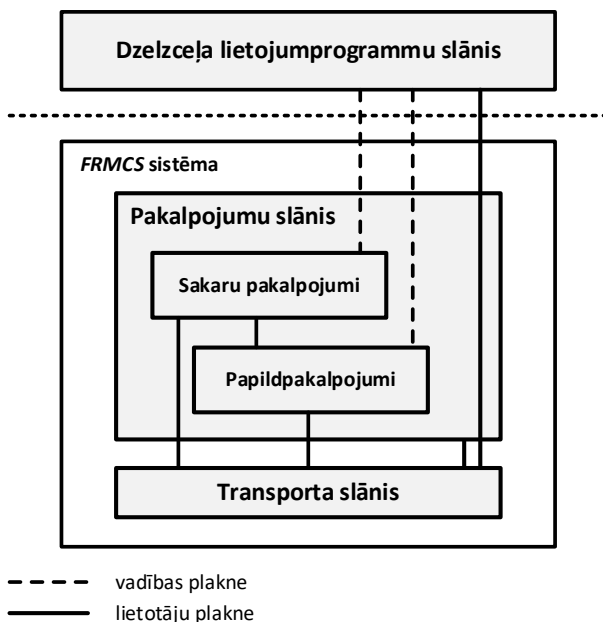
***FRMCS* augstā līmeņa arhitektūra**

FRMCS izmanto trīs līmeņu arhitektūru (2.8. att.), kas sastāv no lietojumprogrammu slāņa, pakalpojumu slāņa un transporta slāņa.

Dzelzceļa lietojumprogrammu slānis nodrošina dzelzceļam specifiskas funkcijas, izmantojot pakalpojumu slāņa piedāvātus resursus. Pakalpojumu slānis ietver tādas funkcijas, kā identitātes un lomu pārvaldība, drošības funkcijas, pakalpojumu sesiju pārvaldība un grupu

saziņas pakalpojumi, savukārt transporta slānis nodrošina savienojamību, pamatojoties uz nepieciešamo pakalpojumu kvalitātes līmeni (*QoS*).

Šī arhitektūra sekmē dzelzceļa lietojumprogrammu klāsta paplašināšanu un ļauj nodrošināt pārvaldības vizualizēšanu, paredzošu uzturēšanu, precīzu pozicionēšanu, utt.



2.8. att. *FRMCS* augstā līmeņa arhitektūra.

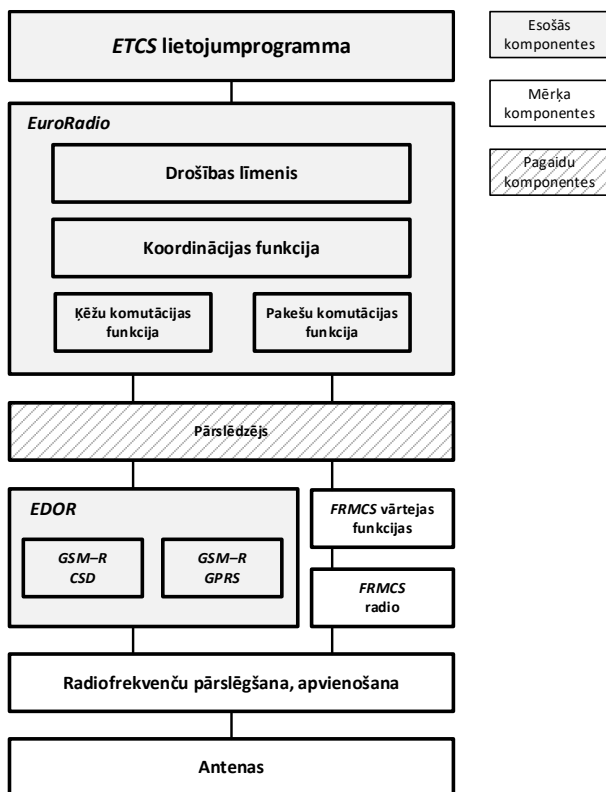
Katrs slānis ir atdalīts viens no otrā. Atdalīšana garantē, ka divas sistēmas var modernizēt lielā mērā neatkarīgi vienu no otras, un tas ir īpaši svarīgi sfērās, kas ir saistītas ar drošību. Tas arī ļauj rentabli uzstādīt gan vilciena, gan infrastruktūras *FRMCS* iekārtas, jo ir paredzēts izmantot standarta komponentes, kas tiek izmantotas arī publiskajiem mobilajiem platjoslas sakariem vai kritiski svarīgiem sakariem citās rūpniecības nozarēs.

Turklāt slāņu atdalīšana ļauj dzelzceļa operatoriem izvēlēties 4G, 5G vai jebkuras citas radio piekļuves tehnoloģijas (*RAT*) transporta slānī, pamatojoties uz savām prasībām un ekonomiskiem apsvērumiem.

***FRMCS* vilcienu aparatūras arhitektūra**

TOBA Option 3 arhitektūras scenārijs, kuru izstrādāja *UIC FRMCS TOBA* grupa, ir pamats nākotnes *ERTMS* vilcienu aparatūras arhitektūrai.

TOBA scenārijs apraksta vienotu saziņas sistēmu vilcienu aparatūras un kustības vadības elementu savstarpējai komunikācijas, ko sauc par *TOBA Box*. Piedāvātās sistēmas arhitektūra pārejas periodam (no esošiem risinājumiem uz *FRMCS*) ir parādīta 2.9. attēlā.



2.9. att. Lokomotīvē uzstādītas GSM-R/FRMCS aparātūras sasaistes arhitektūra.

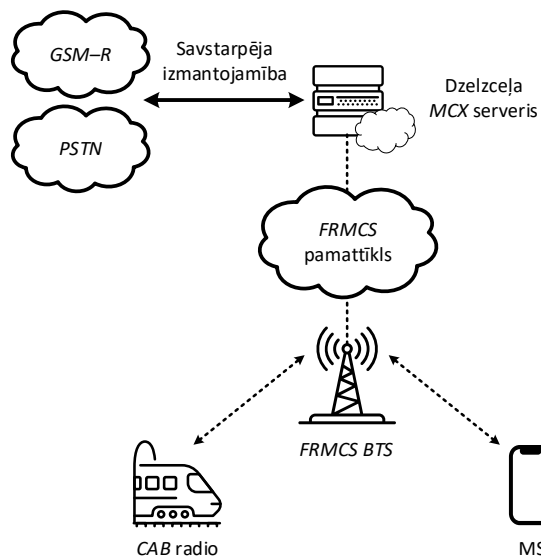
TOBA Box ir ciparu dzelzceļa mezgls vilcienā, kas atbild par visiem sakariem un nodrošina pietiekamu datu pārraides un pakalpojumu sniegšanas kvalitāti visām vilciena funkcijām.

Pašlaik lokomotīvē vienlaicīgi nepieciešams uzstādīt vairākas fiziskās sakaru iekārtas ar dažādām saskarnēm, piemēram, balss sakariem GSM-R tīklā un ETCS signalizācijai. Tā kā *TOBA* arhitektūra sakaru saskarne ir standartizēta un paliks nemainīga visā sistēmas dzīves cikla garumā, tas atvieglos vilciena aparātūras uzturēšanu un padarīs tās modernizāciju pieejamāku.

FRMCS sakaru tīkla arhitektūra

Modernu 4G un 5G tīklu arhitektūra, salīdzinot ar 2G, ievērojami pārveidojās. Tīkla elementu skaits samazinās, un tā topoloģija tiek vienkāršota, piemēram, LTE standartā tika likvidēts bāzes stacijas kontrolieris, kurš GSM un UMTS tīklos bija obligāts.

No vispārējās arhitektūras viedokļa, FRMCS tīkls sastāv no piecām komponentēm: pamattīkla, radiopiekluves tīkla (RAN), mobilās stacijas, operētājsistēmas un dzelzceļa MCX servera (2.10. att.).



2.10. att. *FRMCS* pamattīkla arhitektūra.

FRMCS pamattīkls var būt jebkurš *3GPP* standartu prasībām atbilstošs tīkls, kurš pilda šādas funkcijas:

- piekļuves kontrole;
- reģistrācijas un savienojumu pārvaldība;
- reģistrācijas zonas pārvaldība;
- politiku kontrole;
- datu pārraides pamatpakalpojumu nodrošināšana.

Dzelzceļa *MCX* serveris ir galvenais arhitektūras komponents, kurš sevī ietver:

- *SIP* (sesijas inicializācijas protokola) kodolu;
- saskarnes vārteju;
- kritiskās lietojumprogrammas.

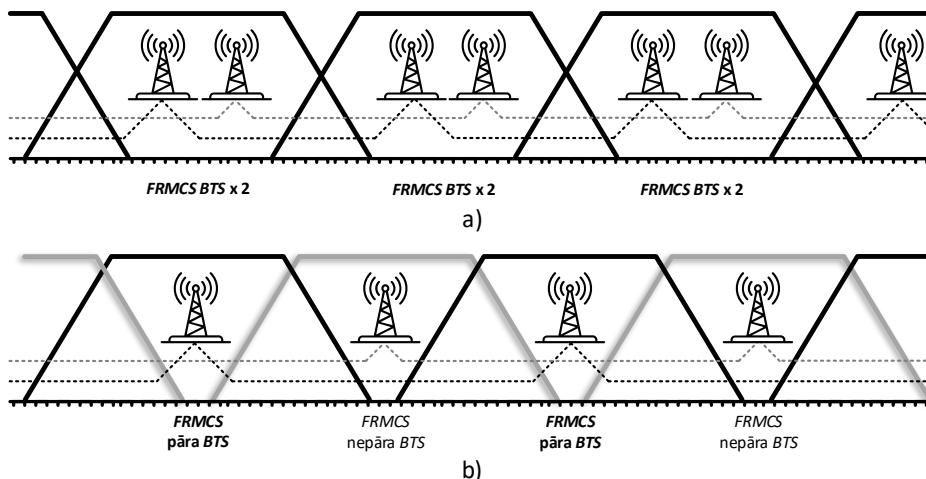
SIP kodols nodrošina tādas funkcijas kā reģistrācija, pakalpojumu izvēle un maršrutēšana signalizācijas vadības plaknē. Saskarnes vārtejas nodrošina savienojumu ar esošo dzelzceļa sakaru sistēmu. Kritiskās lietojumprogrammas nodrošina šādus dzelzceļa pakalpojumus:

- platjoslas maģistrālus balss sakarus (tai skaitā no uzdevuma viedokļa būtiskus tiešrunas sakarus, *MCPTT*);
- platjoslas maģistrālus video sakarus (*MCVideo*);
- platjoslas maģistrālus datu sakarus (*MCDData*).

***FRMCS BTS* izvietojums**

Augsta uzticamība ir būtiska prasība *ETCS* transporta tīklam – sakaru aparatūras kļūmēm un bojājumiem nevajadzētu ietekmēt visas sistēmas darbderīgumu, kā arī atsevišķu pakalpojumu pieejamību.

Pamatojoties uz *GSM-R* pieredzi, *FRMCS* tīkla konstrukcijā tika ieviests dublēšanas mehānisms. Standartā bāzes stacijām ir aprakstīti divi dublēšanas principi: kopizvietojuma tīkls un mijkartots tīkls (2.11. att.).



2.11. att. *FRMCS* duālā radiotīkla veidi:
a) kopizvietojuma tīkls ; b) mijkartots tīkls.

Kopizvietojuma tīkls strādā dubultā pārklājuma režīmā, kad vienā šūnā izvieto divas neatkarīgas bāzes stacijas, kuras ir savienotas ar dažādiem pamattīkliem un veido divlīmeņu tīklu. Bāzes stacijas var izmantot kopējās vai atsevišķas antenas.

Mijkartotajā tīklā divu blakusesošu bāzes staciju radiopārklājumu zonas uzklājās viena uz otras. Nepāra un pāra bāzes stacijas veido divus neatkarīgus pamattīklus, katrs tīkls nodrošina sakarus sava radiopārklājuma robežās.

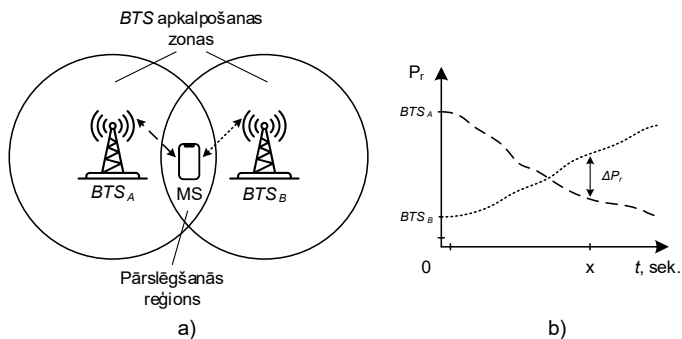
2.3. MST projektēšanas pamatprincipi

Pirmais mobilā tīkla uzbūves princips ir šūnu topoloģijas izmantošana. Viena tīkla savstarpēji saistītas šūnas var nodrošināt sakarus, ja tas ir lietderīgi un ekonomiski izdevīgi, jebkāda laukuma teritorijās.

Otrais princips – jānodrošina MST pārklājuma zonas vienmērība, t. i. mobilām stacijām (abonentiem) pārvietojoties starp bāzes staciju apkalpošanas zonām, sakariem jābūt stabiliem un bez pārtraukumiem. Visos mobilo sakaru standartos tas ir realizēts, izmantojot automatizētus signālu jaudas un pakalpojumu kvalitātes (*Quality of Service, QoS*) parametru mērījumus. Mobilā stacija noteic sakaru kvalitātes radītājus ēterā pieejamām bāzes stacijām un izvēlās to *BTS*, kura var nodrošināt vislabāko savienojumu. Ja savienojums ar to vēl nav uzstādīts, MS cenšas pieslēgties pie tas. Savienojuma nodošanas no vienas *BTS* otrai saucās par pārslēgšanos (*handover*).

Parasti pārslēgšanās notiek divu blakusesošu *BTS* pārklājuma zonu robežās. Šis process ir vienkāršoti atspoguļots 2.12. attēlā: mobilā stacija pārvietojās *BTS_B* virzienā (2.12.a. att.), līdz

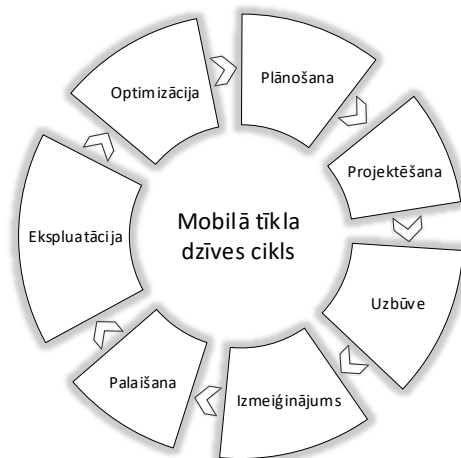
ar ko uztvertā signāla jauda no BTS_A samazinās, bet no BTS_B – palielinās. Kad uztverto signālu jaudu starpība būs lielāka par ΔP_r (2.12.b. att.), notiks savienojuma nodošana no BTS_A uz BTS_B .



2.12. att. Savienojuma nodošana no BTS_A uz BTS_B .

Trešais mobilā tīkla uzbūves princips – mobilo sakaru tīklam ir jābūt mērogojamam. Mobilā tīkla operatoram, nepieciešamības gadījumos, jābūt iespējai paplašināt MST pārklājuma zonas laukumu, mainīt tīkla infrastruktūras, ievest jaunus standartus – nodrošināt jaunāko paudžu aparatūras un tehnoloģiju atbalstu.

Mūsdienu mobilo sakaru tīklu veiksmīga ekspluatācija lielā mērā ir atkarīga ne tikai no pieejas tīkla infrastruktūras projektēšanas sākotnējos etapos, bet arī no adaptācijas pasākumiem, veicot tīkla turpmāko pielāgošanu mainīgo faktoru un nosacījumu ietekmē. Tādējādi mobilā sakaru tīklā teritoriālā radiopārklājuma izstrādes procesā jāiekļauj ne tikai kompleksā apkalpošanas zonas šūnu izmēru, klasteru struktūras un citu parametru aprēķināšana, bet arī visa tīkla, tā iekārtu testēšanas un adaptācijas periodi (2.13. att.).



2.13. att. Mobilā tīkla dzīves cikls.

Mobilo sakaru tīkla adaptācijas gaitā tiek novērota un uzskaitīta apkārtējās vides faktoru (apvidus reljefa īpatnības, ēku, būvju, koku esamība utt.) ietekme uz radioviļņu izplatīšanos. Pēc novērojumu rezultātiem tiek novērtēta korekciju ieviešanas nepieciešamība. Šāda veida korekcijas nereti veido nevienmīgu klastera struktūru mobilā tīkla apkalpošanas zonā, kad bāzes stacijas (*BTS*) tiek uzstādītas nevis šūnu centros, kā tas tika plānots projektēšanas posmā, bet ar nobīdi.

Bāzes staciju aparatūras un to uzstādīšanas vietu izvēle, kā ir augstāk minēts, ir atkarīga no apkārtējās vides faktoriem. Likumsakarīgi, ka pilsētas ietvaros *BTS* šūnu pārklājuma laukums ir daudzreiz mazāks nekā, piemēram, lauku apvidū. Radiokanālu skaitu šūnā nosaka plānotais abonentu pārraidāmā trafika lielums, taču tā apjomi pastāvīgi aug, it īpaši palielinoties abonentu skaitam. Maksimālais teorētiskais attālums no bāzes stacijas līdz makrošūnas robežām *GSM* (2G) standartā sastāda aptuveni 35 km. Pārraidot signālu lielos attālos rodas laika aiztures, kas papildus pieprasa slotu laika saskaņošanu freimā no mobilās stacijas (*MS*) puses pie datu pakešu saņemšanas un nosūtīšanas.

Tādā veidā var izdalīt vairākus faktorus, kuri ierobežo šūnu pārklājuma zonu lielumus:

- darba frekvences ietekme: frekvencei palielinoties (darba viļņa garumam samazinoties) samazinās arī šūna pārklājuma zona; piemēram, šūnu laukums *GSM* 900 tīklā ir ievērojami lielāks, nekā *GSM* 1800;
- ārējo faktoru ietekme: viļņu, līdz ar to arī radiosignālu rimšana brīvā telpā ir daudzreiz vājāka, nekā pilsētās vai mežu masīvos.

Projektējot un aprēķinot mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonas teritoriālo radiopārklājumu ir iepriekš nepieciešams:

- veikt *BTS* un *MS* antenu sistēmu apskatu, parametru analīzi, noteikt tipveida antenu parametrus;
- veikt *BTS* un *MS* raidīšanas un uztveršanas iekārtu parametru analīzi, atlasīt vispiemērotākos modeļus;
- noteikt radioviļņu izplatīšanās īpatnības mobilajos sakaru tīklos;
- apskatīt decimetru un centimetru radioviļņu izplatīšanās matemātiskos modeļus;
- sastādīt aprēķina algoritmu radiosignāla jaudas atkarības noteikšanai uztveršanas punktā pie uzdotajiem *BTS* raidītāju jaudas un *MS* uztvērēja jutības parametriem, noteikt šūnu maksimālus izmērus dotajam darba viļņu garuma diapazonam;
- izmantojot statistisko vai determinēto mobilā tīkla radiopārklājuma metodi, noteikt līdzkanālu atkārtēšanas koeficientu, klastera struktūru, aprēķināt trafiku un kopējo tīkla kapacitāti;
- īstenot mobilā sakaru tīkla teritoriālā radiopārklājuma aprēķinus, konstruēt radiopārklājuma karti ar *BTS* izvietojumu.

2.4. MST antenu sistēmas

2.4.1. Mobilo staciju antenu sistēmas

Radioviļņu sarežģītie izplatīšanās nosacījumi mobilajās sakaru tīklu sistēmās ir saistīti ar viļņu absorbciju, daudzkārtējo atstarošanos un izkliedi. Šādā gadījumā radioviļņu izplatīšanās likumsakarības, kas ir patiesas tiešredzamības gadījumos (*Line of Sight, LOS*), vairs nedarbojas un nevar būt izmantotas. MS iebūvēto antenu īpašības ir tieši atkarīgas no apkārtējās vides statistiskajiem parametriem un no tā, kā ar šo antenu aprīkotā ierīce ir novietota, piemēram, lietotāja rokās. Tādejādi, projektējot antenas 2G–5G standartu mobilajos sakaru tīklos frekvenču diapazonos no 450 līdz 6200 MHz (2.3. tab.), ir svarīgi ņemt vērā visus minētus faktorus.

2.3. tabula

Frekvenču diapazonu sadalījums 2G–5G standartos

Standarts (paaudze)	Izmantotie frekvenču diapazoni, MHz
GSM (2G)	450, 480, 710, 750, 850, 900, 1800, 1900
UMTS (3G)	800, 850, 900, 1500, 1700, 1900, 2100
LTE-A (4G)	450, 700, 800, 850, 900, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2300, 2500, 2600, 3500, 3700
5G NR FR1 (5G)	600, 700, 800, 850, 900, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2300, 2400, 2500, 2600, 3500, 3700, 4700, 5200, 5900, 6000, 6200
5G NR FR2 (5G)	28000, 26000, 41000, 39000, 28000, 47000

Pamata prasības, kas tiek izvirzītas moderno mobilo staciju antenu sistēmām [7], [8]:

- mazi gabarīti,
- plaša darba frekvenču josla;
- augsts pastiprinājuma koeficients;
- augsta radioviļņu pārraides un uztveršanas efektivitāte neatkarīgi no telpiskās orientācijas;
- augstās mehāniskās un temperatūras īpašības;
- mazs kaitīgā elektromagnētiska starojuma līmenis.

Mobilo staciju antenas [32], [55] var sadalīt divās grupās: iebūvētās un pieslēdzamās. Iebūvēto antenu starpā atšķir iekšējās, ārējās stieņa un ārējās izbīdāmās. Mobilo sakaru 3G–5G sistēmām ir lietderīgi apskatīt tikai iebūvētās iekšējās antenas.

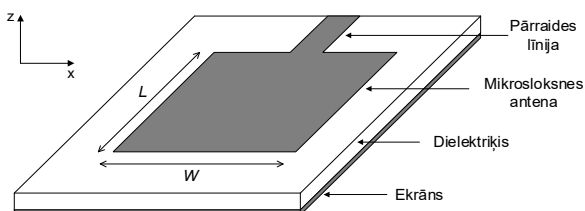
Iekšējās antenas, parasti, ir vērstās antenas [48]. Antenas starojuma vērsuma galvenā vāle ir virzīta pretējā virzienā no cilvēka galvas, kad viņš izmanto MS telefonsakariem. Aizsegt antenu ar roku telefonsarunu laikā nav rekomendēts – tas noved pie sakaru nosacījumu

pasliktināšanās, un rezultātā raidītāja jauda tiek palielināta, MS strāvas patēriņš pieaug, ierīces akumulators paātrināti izlādējās, bet cilvēks tiek pakļauts pastiprinātajam apstarojumam.

Modernas iekšējās antenas galvenokārt izgatavo plānās mikrosluksnes (*patch*) antenas vai planārās invertējamās mikrosluksnes antenas (*PIFA*) veidā [41].

Plānās mikrosluksnes antenas

Mikrosluksnes antena [8], [46] pēc savas būtības ir metāliskais vadītājs, kas novietots virs zemētās pamatnes. Mikrosluksnes antena (2.14. att.) parasti tiek veidota shēmas plates veidā ar metāliskā slāņa garumu L un platumu W , kas ir novietots uz dielektriskās pamatnes ar dielektrisko caurlaidību ϵ_r .



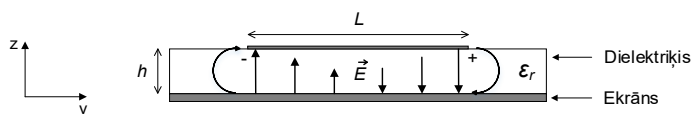
2.14. att. Mikrosluksnes (*patch*) antenas konstrukcija.

Mikrosluksnes pārraides līnija un zemējums tiek izpildīti no metāla ar augstu vadītspēju, parasti no vara. Pamatnes biezums h ir nozīmīgi mazāks par darba viļņa garumu λ :

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.1.)$$

Mikrosluksnes antenas metāla plāksnes un zemējuma biezumi nav kritiski svarīgi.

Elektriskās komponentes sadalījums starp mikrosluksnes antenu un zemējumu kādā laika momentā ir redzama 2.15. attēlā. $E(t)$ izmaiņas noved pie elektromagnētiskā lauka izstarojuma (vai uztveršanās) telpā antenas apkārtnē.



2.15. att. Elektromagnētiskais lauks mikrosluksnes antenā.

Apskatāmās mikrosluksnes antenas centrālo darba frekvenci f_0 var atrast no tuvinātās izteiksmes:

$$f_0 = \frac{c}{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.2.)$$

Variējot mikrosluksnes līnijas garuma L un pamatnes dielektriskās caurlaidības ϵ_r vērtības, rodas iespēja mainīt darba frekvenci un ietekmēt izstarojuma nosacījumus.

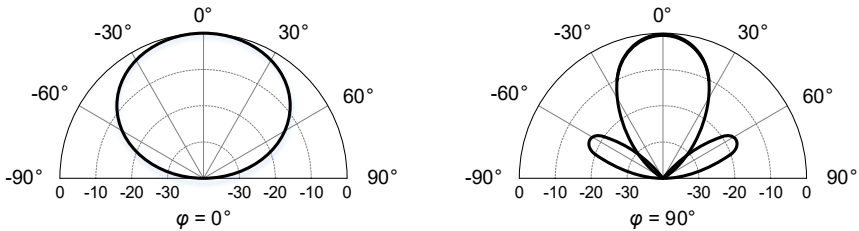
No vienādojuma (1.2) izriet, ka mikrosluksnes antenas garumam L jābūt ap pusi no elektromagnētiskā viļņa garuma, kas izplatās dielektriskās pamatnes vidē (1.3):

$$L = \frac{\lambda}{2}, \quad (2.3.)$$

Mikrosloksnes antenas platums W (1.4) nosaka tās ieejas pretestību un caurlaides spēju. Kvadrāta antenai ieejas pretestība var sastādīt ap 300Ω . Palielinot antenas platumu, ieejas pretestība var tikt samazināta, bet caurlaides spēža šajā gadījumā palielinās. Tomēr lai pazeminātu ieejas pretestību līdz 50Ω ir bieži nepieciešams veidot diezgan platu antenu, kas rezultātā aizņem pārāk daudz vērtīgas vietas.

$$W = \frac{c}{2f_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (2.4.)$$

Mikrosloksnes antenas elektromagnētiskais lauks (EML) ir lineāri polarizēts, pie tam vērsuma diagramma [21], atkarībā no leņķiskās azimutālās koordinātes φ , ir redzama attēlā 1.3. Mikrosloksnes antenas pastiprinājuma koeficients atrodas 7–10 dB robežās.



2.16. att. Taisnleņķa mikrosloksnes antenas vērsuma diagramma.

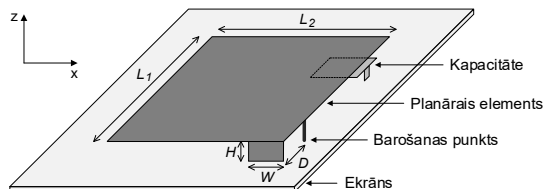
Taisnstūra plakanantenas ir šaurjoslas antenas, pie tam caurlaides josla tiem, parasti, nav lielāka par 3 %.

Planārās F–veida antenas (PIFA)

Planārās F–veida antena (PIFA) – visbiežāk sastopamā mikrosloksnes antenas variācija [8]. PIFA antenas popularitātes iemesls ir skaidrojams ar vairākām priekšrocībām [57]:

- plata darba frekvenču josla (līdz 10 % no rezonanses frekvences);
- mazi gabarīti un vairāku diapazonu vienlaicīgais atbalsts;
- relatīvi spēcīgs pastiprinājums gan vertikālajā, gan horizontālajā polarizācijas plaknē.

PIFA tipa planārās antenas konstrukcija ir parādīta 2.17. attēlā:



2.17. att. Planārās F–veida antenas konstrukcija.

PIFA antenas elektriskie raksturojumi ir atkarīgi no augšējās starojošās plaknes izmēriem, tās malu garumu L_1 un L_2 attiecības, šīs plaknes pacelšanas augstuma H virs ekrāna, vertikālās zemējuma plāksnes izmēra W , antenas barošanas punkta atrašanās vietas.

PIFA antenas salīdzinoši mazi gabarīti ir skaidrojami ar to, ka tās rezonanses frekvenci f_0 noteic starojošās plaknes horizontālā pusperimetra lielums:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda}, \quad (2.5.)$$

Rezonanses viļņa garums ir atkarīgs no antenas konstrukcijas izmēriem un to aprēķina pēc formulām no 1.2. tabulas [12], [24].

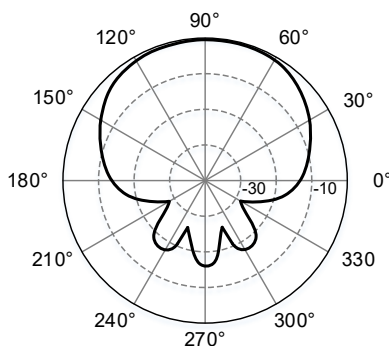
Vertikālās zemējuma plāksnes W izmēra un ar to kontaktējošā planārā elementa malas L_2 garuma sakritības gadījumā tiek nodrošināta *PIFA* antenas maksimālā caurlaides josla. Vertikālā zemējuma elementa platums papildus ietekmē antenas starojuma polarizāciju.

2.4. tabula

PIFA antenas rezonanses frekvences aprēķināšanas formulas

Nosacījums	Rezonanses viļņa garums λ
$W = 0$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + L_2 + H$
$\frac{W}{L_2} = 1$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + H$

Viendiapazonu *PIFA* antenas vērsma diagramma [21] ir parādīta 2.18. attēlā, no kuras seko, ka starojuma galvenā maksimuma virziens ir ortogonāls antenas plaknei, bet tā platums ir ap 60° .



2.18. att. *PIFA* antenas vērsma diagramma.

Adaptīvās (viedas) antenas

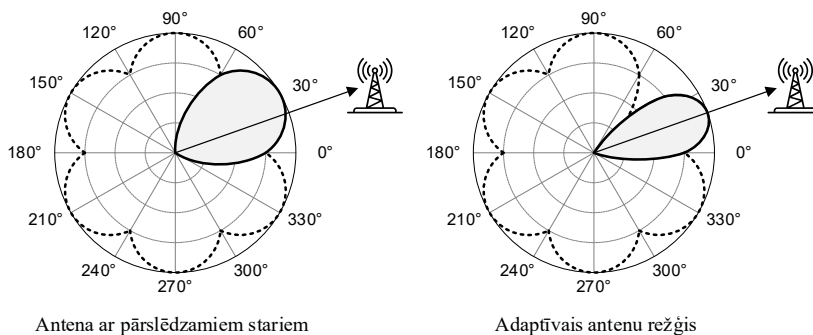
Iejas, kas tika veiksmīgi realizētas sarežģīto adaptīvo bāzes staciju antenu sistēmu izstrādes laikā, tagad pielieto arī intelektuālo antenu sistēmu [51] izveidei priekš ceturtais

paaudzes sakaru tīklu mobilajiem termināliem. Tādejādi, dotajā brīdī mūsdienu mobilo staciju aparatūrā var tikt izmantoti divi jauni antenu tipi: adaptīvās antenas un *MIMO* antenu sistēmas.

Adaptīvo vai viedo (*smart*) antenu darbības princips balstās uz iespējas mainīt antenas parametrus un raksturlielumus, rezultātā koriģējot tās vērsuma diagrammu. Adaptīvās antenas var sadalīt divās grupās:

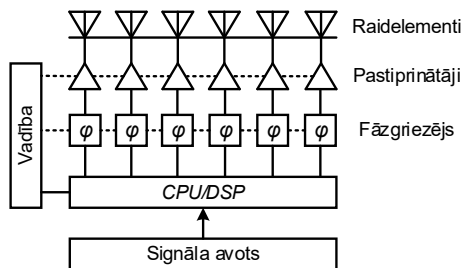
- antenas ar pārslēdzamiem stariem;
- adaptīvie antenu režģi.

Antena ar pārslēdzamiem stariem – tā ir antenu sistēma, kas ir veidota no izstarotājiem ar fiksēto vērsuma diagrammu. Vislabākā signāla līmeņa nodrošināšanai tiek izvēlēts konkrētais stars (2.19. att.), kas ļauj paaugstināt vai pazemināt pastiprinājumu pēc vajadzībām, bet tikai tajos virzienos, kur šie stari eksistē.



2.19. att. Adaptīvo antenu pielāgojamās vērsuma diagrammas.

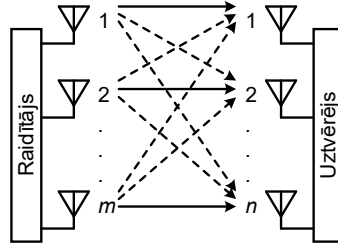
Adaptīvais antenu režģis – viedā antenu sistēma, kas ļauj dinamiski mainīt antenas raksturlielumus pateicoties tās konstrukcijai, kurā ir pielietoti vairāki fāzgriezēji, pastiprinātāji vai vājinātāji (2.20. att.). Iekšējie elementi tiek vadīti caur procesoru, kas analizē ārējus un iekšējus faktorus, tādā veidā izveidojot staru vajadzīgajā virzienā ar attiecīgu pastiprinājumu vislabākā signāla nodrošināšanai ar vismazāko trokšņu līmeni.



2.20. att. Adaptīvā antenu režģa realizācijas shēma.

MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) tehnoloģija balstās uz vairāku antenu izmantošanu signālu pārraidei un uztveršanai. Šāda pieeja ļauj palielināt ne tikai informācijas pārraides drošumu (izmantojot visas kopējā kanāla antenas (2.21. att.)), bet arī kopējo

caurlaides spēju. Uz doto brīdi *MIMO* tehnoloģija tiek plaši pielietota bezvadu modemu, maršrutētāju, mobilo un bāzes staciju antenu sistēmās.



2.21. att. *MIMO* antena ar m raidītājiem un n uztvērējiem.

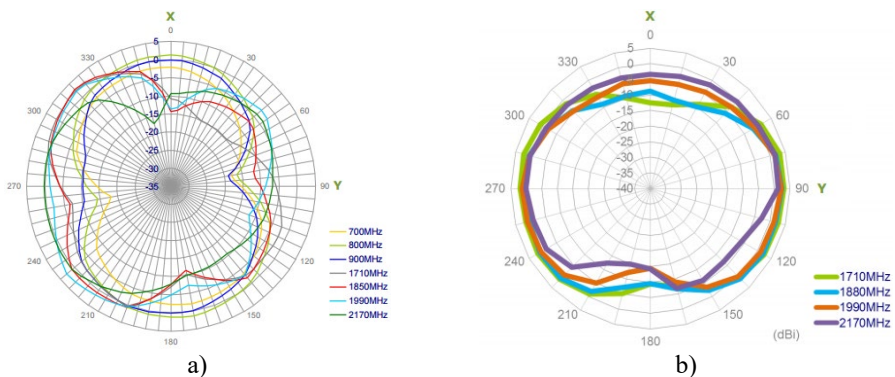
Mūsdienu tipveida mobilo staciju antenu parametri

Pēdējo gadu laikā plašu izplatību ieguva mikrosloksnes antenas, kas tiek veidotas pēc iespiesto shēmas plašu tehnoloģijas. 2.5. tabulā tiek piedāvātas tipveida mikrosloksņu antenas, kas šobrīd ir pieejamas tirgū [17], un to parametri, bet 2.22. attēlā ir redzamas šo antenu vērsu diagrammas [43].

2.5. tabula

Tipveida mikrosloksņu antenas

Antenas tips	Frekvenču diapazoni, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Pastiprinājuma koeficients, dB
Mikrosloksnes antena	698–960, 1390–1435, 1710–1990, 1755–2170, 2400–2500, 2500–2700, 3400–3600	50	–1,3
<i>PIFA</i> antena	700–800, 824–896, 880–960, 1710–1880, 1850–1990, 1710–2170	50	–1,9
<i>MIMO</i> 2 · 2 antena	703–803, 824–894, 880–960, 1565–1612, 1710–1880, 1850–1990, 1920–2170, 2400–2500, 2500–2700, 3400–3600	50	–1,84



2.22. att. Vērsu diagrammas:
a) *PIFA* antenai, b) visvirzienu mikrosloksnes antenai [43].

2.4.2. Bāzes staciju antenu sistēmas

Bāzes staciju (*Base Transceiver Station, BTS*) antenu–fideru trakts mobilajos sakaru tīklos ir visas tīkla infrastruktūras galvenais elements, no kura, galvenokārt, ir atkarīga sakaru kvalitāte, nosacījumi vienmērīgā apkalpošanas zonas teritoriālā radiopārklājuma izveidei, no mobilo staciju uztveramo signālu stabilitāte, mobilās stacijas (*Mobile Station, MS*) atrašanās vietas noteikšanas precizitāte utt. Moderno *BTS* antenu ārējā konstrukcija izskatās vienkārši, taču iekšienē tās ir diezgan sarežģītas sevišķi augsto frekvenču (*SAF*) iekārtas, kas darbojās brīvā dabā augsta mitruma un būtisku temperatūras kritumu ietekmē, pakļautas apledošanai, lielām vēja slodzēm, agresīvām pilsētas vides un citiem faktoriem [54].

Parastajos mobilajos sakaros ar *BTS* antenu sistēmu palīdzību var panākt signāla jaudas pastiprināšanu no 7 līdz 15 dB, pie tam jāizpildas šādiem nosacījumiem:

- izstarojumam šūnā (vai sektorā ar leņķi 120°, 60°) jābūt vienmērīgam, jāsamazinās pēc aptuvenā likuma $1/r^n$, kur $2 < n < [4-5]$;
- jānomāc starpkanālu traucējumi (piemēram, izmantojot vērtās antenas);
- joslas platumam jābūt lielākam par 7 % un stāvošā viļņa koeficientam (*Standing Wave Ratio*) $SWR \leq 1,5$, lai nodrošinātu vienlaicīgo uztveršanu un nosūtīšanu lielā kanālu skaitā (līdz 30–60 kanāliem);
- vērsu diagrammai (ideālā gadījumā: vertikālajā plaknē – $\text{cosec}^2\theta$, bet horizontālajā – $F(\varphi) = 1$ vai $F(\varphi) = \sin \varphi$ sektora robežās) jānodrošina vienmērīgs apkalpošanas zonas radiopārklājums pie stabilas signāla uztveršanas un minimāliem blakus vāļu līmeņiem;
- elektromagnētisko viļņu laika aizturei jābūt minimālai;

No antenu projektēšanas tehnoloģiju skatu punkta, augstāk minētajiem prasībām var atbilst šādas antenu sistēmas, kas tiek pielietotas dažādu valstu mobilajos sakaru tīklos:

- trīs izvietotās antenas ar izveidotām 120° leņķu sektoru vērsu diagrammām šūnas robežās;
- sešas sektoru antenas ar izveidotām 60° leņķu sektoru vērsu diagrammām šūnas robežās;

Pie tam tiek izmantotas trīs antenu izvietojuumu veidi:

- telpiskais izvietojuums, kad attālums starp antenām nav lielāks par $d < 10\lambda$;
- izvietojuums pēc vērsu diagrammas;
- izvietojuums pēc elektromagnētisko viļņu polarizācijas.

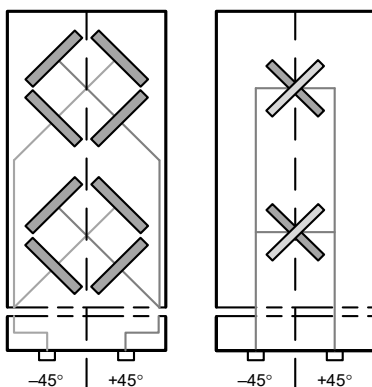
Atkarībā no risināmā teritoriālā pārklājuma aprēķina uzdevuma, tīklu projektētāji izmanto visvirzienu (*Omni*) un sektoru antenas ar viļņu vertikālo polarizāciju vai ar slīpo šķērspolarizāciju (*XPol*). Tādas antenas var būt gan viendiapazonu, gan arī divdiapazonu, trīsdiapazonu vai platjoslu.

BTS visvirzienu antenas un sektorantenas

Starp visām tirgū piedāvātajām mobilo tīklu antenām, lielāko daļu sastāda paneļa antenas ar šķērspolarizāciju (*XPol*) un ar vertikālo polarizāciju (*VPol*).

Šķērspolarizētā antena *XPol* (att. 1.10) sastāv no divām neatkarīgām izstarotāju sistēmām, kas pret atstarošanas ekrānu ir izvietoti simetriski ar $\pm 45^\circ$ nolieci. Sistēmas veido divas vērsuma diagrammas ar 65° un 90° lielu galvenās vāles platumu horizontālajā plaknē. Tādas antenas vienā korpusā var atrasties divas (*XPol*), četras (*XXPol*) vai arī sešas (*XXXPol*) neatkarīgas antenas. Šāda veida antenu konstrukcija atvieglo to uzstādīšanu (piemēram, uz ēku jumtiem vai sienām), kas ir īpaši svarīgs objekts, kur brīvas vietas aparatūrai nav daudz vai vietas noma ir dārga.

Dažām daudzdiapazonu antenām ir iebūvētie filtri, kas ļauj veikt pieslēgumu izmantojot tikai 2 savienotājus. Šādas antenas tiek lietotas radiopārklājuma nodrošināšanai ārpus telpām.



2.23. att. *XPol Multi-Band* daudzjoslu antenu konstrukcija.

Visvirzienu antenas (*Omni-Directional*) ar vertikālo polarizāciju (*VPol Omni*) ir veidotas no virknes savā starpā savienoto pusvilnu vibratoru korpusa iekšpusē, kas izskatās pēc caurules. Dažiem modeļiem elektriskā slīpuma leņķis ir no 0° līdz 6° .

Antenām, kas paredzētas izmantošanai iekštelpās (*VPol Indoor*), ir samērā nelieli gabarīti un estētiskais ārējais izskats. Tos parasti stiprina zem griestiem un izmanto mobilā tīkla organizācijas ēkas iekšējās telpās.

Plānās *BTS* paneļu antenas

Bezvadu sakaru tīklu aparatūrai ir viena kopējā pazīme – antenas trakts vairākumā gadījumu ir uzbūvēts uz paneļu tipa antenu sistēmu bāzes. Tas pārsvarā ir saistīts ar to, ka frekvenču teritoriālais sadalījums balstās uz apkalpošanas teritoriju dalīšanas sektoros apkārt bāzes stacijai. Noteiktās kanālu grupas darbojas savos sektoros un raida ar savu sektoru antenu, taču reizēm no paneļu antenām veido antenu režģus ar riņķa veida vērsuma diagrammu. Tas ir noderīgs gadījumos, kad antenas tiek novietotas uz radiocaurspīdīgiem balstiem (caurulēm, smailēm utt.), kur stieņa antenu ar riņķa diagrammu izmantošana nav iespējama.

Paneļa antenas konstrukcija – plakans kvadrāts vai četrstūris (att. 1.11), kura iekšpusē novietots viļņvads no foliēta tekstolīta vai metāla loksne.

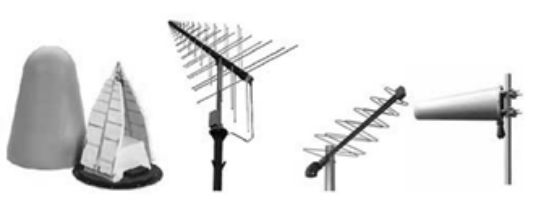


2.24. att. Iznesamās paneļa antenas ārējais izskats.

Paneļa *BTS* antenas 3G tīklos ļauj nodrošināt samērā augstu pastiprinājuma koeficientu līdz 20 dB. Maksimālā pievadītā jauda sastāda no 350 līdz 1000 W, taču projektējot mobilos sakaru tīklus tāda jauda lielākoties nav nepieciešama. Parasti *BTS* antenu pievadītā jauda nav lielāka par 50–150 W, bet iekštelpu antenām jauda nepārsniedz 10 W.

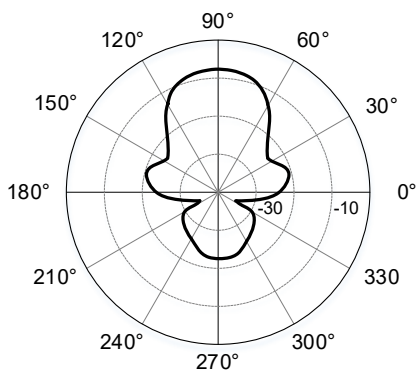
Logoperiodiskās *BTS* antenas

Mobilo sakaru tīklu sistēmās logoperiodiskās antenas (2.25. att.) tiek izmantotas kā antenas–donori atkārtotāju struktūrā, jo tās ļauj vienlaikus pieņemt signālus daudzos frekvenču diapazonos, piemēram, 900, 1800 un 2100 MHz.



2.25. att. Logoperiodisko antenu ārējais izskats.

Logoperiodiskās antenas vērsma diagramma ir kaut kas vidējais starp paneļa antenas plato un adatveidas–parabolisko diagrammām (2.26. att.).



2.26. att. Logoperiodiskās antenas vērsma diagramma.

Šī īpašība ļauj savienoties ar korekto bāzes staciju bez precīziem spraugas uzstādījumiem, kā tas ir nepieciešams radioreleju sakaru līniju antenām. Pie tam, attālums līdz apkalpošajai bāzes stacijai var sasniegt vairākus kilometrus. Logoperiodiskās vertikāli polarizētās antenas tiek raksturotas ar samērā mazu vērsuma diagrammas platumu horizontālajā plaknē (22° – 65°), pastiprinājuma koeficients tiem sastāda 11–18 dBi un tos parasti izmanto sakaru līniju organizēšanai ceļu posmos.

Adaptīvās (viedas) antenas

Par adaptīvām antenām vai viedām antenām sauc antenu sistēmas ar elektrisko vadību un iespēju izmainīt vērsuma diagrammu. Visbiežāk intelektuālās antenas pēc savas struktūras ir adaptīvie antenu režģi, kas veidoti no diskrētiem elementiem (vāji virzītajiem vibratoriem), un katrs no tiem veic elektromagnētisko viļņu uztveršanu vai raidīšanu [51]. Vērsuma diagramma veidojās šo elementu izstaroto viļņu interferences rezultātā.

Telpiskās kanālu multipleksēšanas tehnoloģijas *SDMA* (*Space-Division Multiple Access*) izmantošana un daudzstaru antena ar vadāmo vērsuma diagrammu ļauj optimizēt frekvenču un materiālo resursu sadalīšanu, uzlabojot abonentu apkalpošanas kvalitāti.

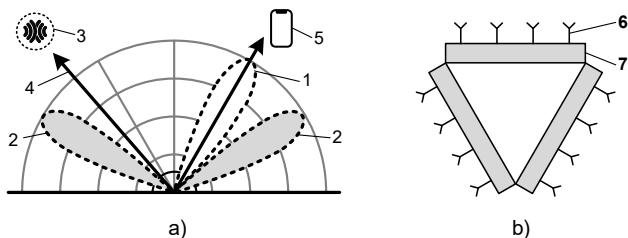
Pēdējos gados cenas uz *DSP* (*Digital Signal Processor*) ciparu signālu procesoriem, kā arī uz programmējamiem signālu procesoriem ir samazinājušās, kas ļauj plaši izmantot tos praksē moderno adaptīvo antenu izstrādē un ieviešanā.

Nepieciešams uzsvērt, ka adaptīvās antenas ir nepieciešamas tāpēc, ka mobilo tīklu abonentu skaits nepārtraukti un strauji pieaug, palielinās traucējumu biežums un trokšņu avotu skaits, un kopumā radioviļņu izplatīšanās nosacījumi kļūst sarežģītāki. Adaptīvās antenas – ir signālu procesora un antenu režģu kompleks optimālās vērsuma diagrammas veidošanai. Tas ļauj bāzes stacijas sistēmai mainīt starojuma virzienu, adaptēties signāla pārraides nosacījumiem un gala rezultātā nozīmīgi uzlabo sakaru kvalitāti. Jaunākie algoritmi, kas ir realizēti *DSP* procesoros, un to izmantošana intelektuālo antenu sistēmās ļauj izsekot mobilo staciju signālus ar minimālo interferenci un maksimālo uztveršanas kvalitāti.

Adaptīvā antena 120° sektoram parasti satur no 4 līdz 8 elementiem, ieejas un izejas ir savienotas ar fāzgriezējiem, pastiprinātājiem un vājinātājiem caur vadības shēmu.

Ja parastā divu elementu antena ar 120° lielu vērsuma diagrammu dod signāla pastiprinājumu 15 dB, tad adaptīvā antena ar 8 elementiem maksimāli dod 24 dB lielu pastiprinājumu. Tādu notaustīšanas antenu vērsuma diagramma ir redzama 2.27. a. attēlā. Pamatelementi, kas veido antenu, parādīti 2.27. b. attēlā, kur:

- 1) adaptīvi izveidotais stars;
- 2) stara malējie stāvokļi sektorā;
- 3) traucējumu avots;
- 4) skanēšanas stars;
- 5) mobilā stacija;
- 6) antenas elementi;
- 7) adaptīvā režģa panelis.



2.27. att. *BTS* viedas antenas:
 a) ar pārslēdzamiem stariem (120° sektors);
 b) adaptīvais antenu režģis no 3 paneļiem.

Antenai ir 12 izstarotāju rindas, katrā no tiem ir 8 elementi. Katra rinda, pēc būtības, ir režģis no dipoliem, 8 centrālās rindas ir ar aktīvajiem elementiem, citi četri – ar pasīvajiem. Šaurs stars ar augstu pastiprinājumu tiek veidots, sasummējot signālus no visām rindām. Antenas izmērs frekvencei 3,6 GHz sastāda 0,7 · 0,6 m.

Mūsdienu tipveida *BTS* antenu pamatparametri

2.6. tabulā ir apkopoti sakaru tīklu bāzes staciju tipveida antenas, kuras plaši pielieto mobilo sakaru tīklos visā pasaulē. Dažādu antenu analīzei un salīdzināšanai tabulā ir doti šo antenu pamatparametru lielumi.

2.6. tabula

Tipveida *BTS* antenu parametri

Antenas tips	Rezonanses frekvences, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Vērsuma diagramma	Pastiprinājuma koeficients, dBi
Visvirzienu antena (<i>VPol Single-Band Omni Outdoor</i>)	1710-2220	50	vertikālā, 360°	2
Visvirzienu antena (<i>VPol Single-Band Outdoor</i>)	1710-2180	50	vertikālā, 65°	11
Vērstā divdiapazonu antena (<i>VPol Dual-Band Omni Outdoor</i>)	806 (824)-960, 1710-2170	50	vertikālā, 60°	8
Visvirzienu daudzjoslu antena (<i>VPol Multi-Band Omni Outdoor</i>)	870-960, 1710-1880, 1920-2170	50	vertikālā, 360°	8
Visvirzienu divdiapazonu antena (<i>VPol Dual-Band Omni Outdoor</i>)	870-960, 1920-2170	50	vertikālā, 360°	8
Visvirzienu antena (<i>VPol Single-Band Indoor</i>)	1710-2500	50	vertikālā, 360°	2
Visvirzienu divdiapazonu antena (<i>VPol Dual-Band Omni Indoor</i>)	806-960, 1710-2700	50	vertikālā, 90°	7
Daudzjoslu UMTS antena (<i>XPol Multi-Band</i>)	1710-2170	50	+45°, -45°	2 · 9

2.6. tabulas turpinājums

Antenas tips	Rezonanses frekvences, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Vērsma diagramma	Pastiprinājuma koeficients, dBi
Vienjoslu antena (<i>XPol Single-Band</i>)	1710-2170	50	+45°, -45°	2 · 20
Divdiapazonu antena (<i>XPol 2-Multi-Band</i>)	824-960, 1710-2170	50	+45°, -45°	19
Dubultotā daudzjoslu antena (<i>XXPol 2-Multi-Band</i>)	1710-2170, 1710-2170	50	+45°, -45°	18
Trīsdiaapazonu antena (<i>XXXPol Triple-Band</i>)	824-960, 1710-1880, 1710-2170	50	+45°, -45°	18
Trīssektoru antena (<i>XPol Tri-Sector</i>)	1710-2170	50	+45°, -45°	18
Paneļa divdiapazonu šķērspolarizētā antena	890-960, 1710-1880	50	lineārā, vertikālā	5, 6
Logoperiodiskā antena (<i>LogPer 900</i>)	790-960	50	vertikālā, 50°	12
Logoperiodiskā antena (<i>LogPer Omni</i>)	2500-2700	50	vertikālā, 360°	11

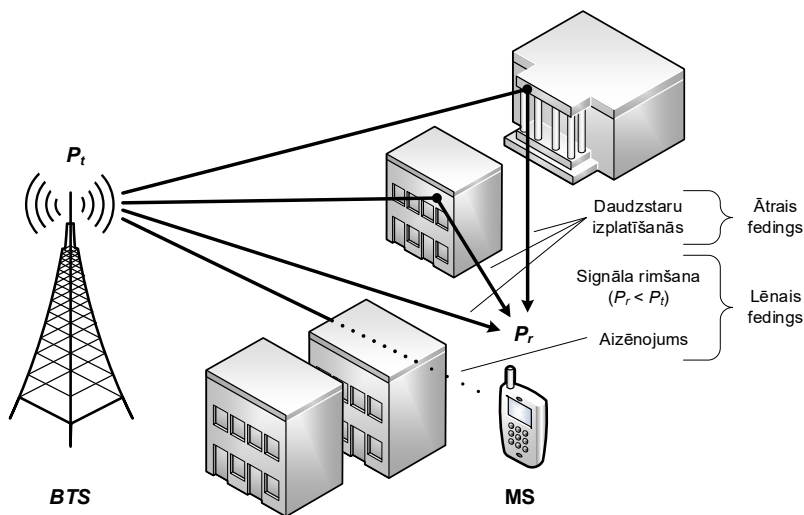
2.5. MST radioviļņu izplatīšanās īpatnības

2.5.1. Ievads

Mūsdienu mobilajos sakaru tīklos tiek izmantotas gan decimetru (*Ultra high frequency, UHF*), gan arī centimetru (*Super high frequency, SHF*) elektromagnētiskie viļņi, kas praktiski neatstarojās no atmosfēras jonizētajiem slāņiem un tajos neizkliedējās. Šo diapazonu viļņi nelielos attālumos izplatās galvenokārt Zemes viļņu veidā (tādu viļņu difrakcija ir vāji izteikta), lielākos attālumos – pateicoties troposfēras izkļiedei un troposfēras viļņvadu virzošās iedarbības ietekmē.

Atmosfēras jonizētajos slāņos decimetru un centimetru diapazona elektromagnētiskiem viļņiem gandrīz nav refrakcijas, tie brīvi iet caur šiem slāņiem un tos var izmantot kosmiskajiem radiosakariem. *UHF* un *SHF* viļņi praktiski nav pakļauti molekulārajai adsorbīcijai un uz Zemes var izplatīties galvenokārt taisnvirzienā tiešās redzamības robežās (*Line of Sight, LOS*).

Reālajā vidē uz Zemes jebkurus radiosignālus neizbēgami ietekmē fedings (*fading*) – uztveramā signāla vājināšana un līmeņu svārstības, kas notiek daudzceļu izplatīšanās, aizēnojuma vai vides un laikapstākļu dēļ [23]. Fedīngam, ir divas sastāvdaļas: ātrā un lēnā (2.28. att.).



2.28. att. Fedinga sastāvdaļas un to avoti.

2.5.2. Lēnais fedings

Lēnais fedings rodas, pārvietojot mobilo staciju lielā distancē, kas izraisa izplatīšanās vides nosacījumu un raksturlielumu izmaiņas, rezultātā tiek novērots radiosignālā vājinājums, kura lielums atkarīgs no attāluma starp *BTS* un *MS*.

Pirmajā tuvinājumā lēnais fedings pakļaujas logaritmiski–normālajam sadalījuma likumam, tā intensitāte parasti nepārsniedz 5–10 dB [26], [35].

Pie lēnā fedinga attiecinā elektromagnētiskās enerģijas zudumus traktā un aizēnojumu vai ēnu efektu.

Ēnu efektu (*shadowing*) izraisa dažādi šķēršļi (ēkas, koki, kalni utt.) starp *BTS* un *MS* tiešās redzamības nosacījumos, nevienmērīgi samazinot uztverto signāla jaudu. Eksperimenti parāda, ka aizēnojumu var modelēt kā logaritmiski normālu gadījuma lielumu.

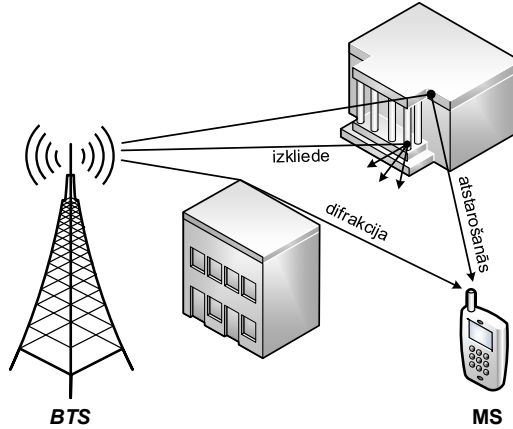
Signāla rimšana vai elektromagnētiskās enerģijas zudumi traktā (*path loss*) ir signāla jaudas samazināšanās ceļā no raidītāja līdz uztvērējam, kura pamatā ir neaizšķēršļotas telpas (*free-space*) zudumi. Radiosignālam izplatoties reālos nosacījumos, ņemot vērā apkārtējās vides faktorus, signāla vājinājumu [47] papildus ietekmē (2.29. att.):

- atstarošanās;
- izkliede;
- difrakcija.

Atstarošanās notiek, kad plakans elektromagnētiskais vilnis saskaras ar šķēršli, kas ir daudz lielāks par viļņa garumu.

Difrakcija notiek, ja šķēršļa izmērs ir vienāds viļņa garumam. Tā rodas viļņu izplatīšanās īpatnību dēļ.

Izkliede notiek, kad plakans vilnis saskaras ar šķēršli, kas ir daudz mazāks par viļņa garumu. Šis šķērslis kļūst par jaunu avotu, kas izstaro viļņus vairākos virzienos.



2.29. att. Apkārtējo faktoru ietekme uz signāla pārraides zudumiem.

Garuma rimšanas aprēķināšanai neaizšķēršlotā telpā, pārraidei izmantojot vērstās antenas ar zināmiem pastiprinājuma koeficientiem, izmanto vienkāršoto Frīsa pārraides vienādojumu (*Friis transmission equation*):

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2 = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi \cdot f \cdot r} \right)^2, \quad (2.6.)$$

kur P_r – signāla jaudas līmenis uztveršanas punktā, W;

P_t – signāla jaudas līmenis nosūtīšanas punktā, W;

G_t – raidītāja antenas pastiprinājuma koeficients;

G_r – uztvērēja antenas pastiprinājuma koeficients;

λ – viļņa garums, m;

f – darba frekvence, Hz;

c – elektromagnētisko viļņu ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^8$ m/s;

r – attālums starp BTS un MS, m.

Apskatot radiosignālu izplatīšanos izotropo *BTS* raidītāja un *MS* uztvērēja antenu izmantošanas gadījumā ($G_t = G_r = 1$), signāla jaudas līmeņu attiecību uztveršanas punktā un nosūtīšanas punktā izteic šādā veidā:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi \cdot r \cdot f} \right)^2, \quad (2.7.)$$

Elektromagnētiskās enerģijas zudumu traktā un pārraides zudumu (*transmission loss, L*) novērtēšanai var izmanto vienādojumus (2.8.) un (2.9.):

$$L_{rt} = 10 \cdot \lg \frac{P_r}{P_t} < 0, \quad (2.8.)$$

$$L_{tr} = 10 \cdot \lg \frac{P_t}{P_r} > 0, \quad (2.9.)$$

Zudumu lielumu izteikšana, no vienas puses, palīdz saprast fizikālus procesus, kas notiek radioviļņu izplatīšanās gaitā, bet no otras puses, gūt vienkāršus tuvinātus analītiskus vienādojumus elektromagnētiskās enerģijas zudumu noteikšanai.

2.5.3. Ātrais fedings

Ātrais fedings rodas pie mobilās stacijas lokālā novietojuma izmaiņām vai tad, kad radioviļņi izplatās daudzstaru režīmā (*multipath fading*). Tas izraisa signāla paplašinājumu laikā un kanāla raksturlielumu izmaiņas.

Signāla līmeņa izmaiņu diapazons pie ātrā fedinga var sasniegt 40 dB, no kuriem aptuveni 10 dB – vidējā līmeņa pārsniegšana, bet 30 dB – kritumi zem vidējā līmeņa [26], [35]. Pie nekustīgas mobilās stacijas, uztveramā signāla intensitāte gandrīz nemainās, bet atrodoties kustībā, fluktuāciju periodiskums telpā sastāda apmēram pusi no viļņa garuma.

Fluktuāciju periods ir atkarīgs no mobilās stacijas pārvietošanas ātruma. Piemēram, ja ātrums $V = 50$ km/st. vai 13,9 m/s, tad fluktuāciju periods būs vienāds $T_f = \lambda/2V \approx 12$ ms, bet pie ātruma $V = 100$ km/st. – $T_f \approx 6$ ms.

Ātrā fedinga novēršanai *GSM* standartā izmanto spektra paplašināšanas paņēmieni, bet simbolu interferences samazināšanai pielieto adaptīvus filtrus (ekvalaizerus). Lai mazinātu radiosignālu daudzstaru izplatīšanās sekas tiek izmantota aparatūra ar kanālu traucējumaizsargāto kodēšanu.

Daudzstaru signālu izplatīšanās režīmā, mobilās stacijas radiosignāla uztveršanas punktā notiek daudzu elektromagnētisko viļņu interference. Šiem viļņiem ir savas atšķirīgas trajektorijas, amplitūdas, fāzes un citi parametri. Interferences ietekmē rezultējošais signāls uztveršanas punktā mainās un var būt gan lielāks par vidējo vērtību, gan arī mazāks, pie tam signāla fedings var kļūt diezgan liels.

Rezultējošā signāla kropļojumi [47] bieži notiek tad, kad signāliem ar samērojamām amplitūdām sastāvdaļas atšķiras tik stipri, ka viena signāla simboli uzklājās cita signāla blakussimboliem. Šo parādību sauc par simbolu interferenci.

Izšķir šādus interferences nosacījumus:

- vairāki viena tipa signāli ir nobīdīti fāzē, pārklājās un rezultējošais signāls tiek vājināts;
- pamata un atstaroto signālu līmeņi ir vienādi, bet atrodas pretfāzē un rezultējošā signāla vērtība ir tuva nullei, sakari tiek pārtraukti;
- notiek impulsu signālu laika paplašināšana.

Apskatot radioviļņu izplatīšanās īpatnības var secināt, ka elektromagnētisko viļņu jaudas līmenis uztveršanas punktā atkarībā no attāluma starp raidītāju un uztvērēju tiek raksturots ar lielumu $1/r^n$ (2.6.1. nodaļa). Reālajos apstākļos apkārtējās vides faktoru ietekmē tiek novērotas signālu līmeņa svārstības, saistītas ar viļņu rimšanu, lēno un ātro fedingu. Izsakot signālu jaudas līmeņus, antenu pastiprinājumus un zudumu lielumus relatīvajās vienībās, bezvadu sistēmas vispārinātu savienojuma budžetu var izteikt šādi:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L, \quad (2.10.)$$

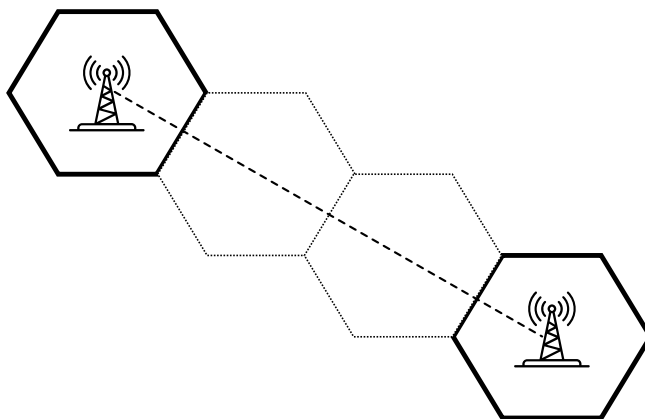
kur P_r – signāla jaudas līmenis uztveršanas punktā, dBm;
 P_t – signāla jaudas līmenis nosūtīšanas punktā, dB;
 G_t – raidītāja antenas pastiprinājums, dB;
 G_r – uztvērēja antenas pastiprinājums, dB;
 L_t – zudumi raidītājā, dB;
 L_r – zudumi uztvērējā, dB;
 L – signāla rimšana, dB.

2.6. MST apkalpošanas zonas aprēķināšanas principi

2.6.1. Statistiskā aprēķinu metode

Mobilo sakaru tīklu apkalpošanas zonu veidošana ar statistisko metodi [27], [31] ir balstīta šūnu laukuma noteikšanā un attāluma starp *BTS* aprēķināšanā, izmantojot statistiskus datus par radioviļņu izplatīšanās vidi, kanālu parametriem un izmantojamās aparatūras elektriskajiem raksturlielumiem.

Gadījumā, kad pilsētas vidē teritoriālā radiopārklājuma realizācijā mobilajam sakaru tīklam ir nelielas blakus šūnas, tiek apskatītas divas šūnas *A* un *B* (2.30. att.) ar bāzes stacijām *BTS_A* un *BTS_B*, kas ir uzstādīti šūnu centros. Apskatāmās šūnas ir riņķa līnijas ar rādiusiem R_A un R_B , kas ir vienādi ar šūnas maksimālo rādiusu R_{MAX} .



2.30. att. *BTS* izvietojums mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonā.

Šūnu centri *A* un *B* atrodas viens no otra attālumā D , pie tam starp šīm šūnām atrodas citas šūnas, kuru darba frekvences atšķirās no *A* un *B* darba frekvencēm ($F_A = F_B \neq F_C$). Bāzes stacijām, kurām visvirzienu (*omni*) antenas strādā uztveršanas un pārraides režīmā, pastiprinājuma koeficients $G = 0$ dB. Vidējā radiosignāla jauda, kurš tiek uztverts uz šūnas robežas (punktos *X* un *Y*), mainās pēc likuma $\sim 1/r^n$, kur r – attālums starp *BTS* un MS, bet pakāpes parametrs n raksturo jaudas plūsmas blīvuma izmaiņas likumu, atkarībā no attāluma un no izplatīšanās nosacījumiem:

- vienstaru modelim $n = 2$;

- daudzstaru modelim pilsētā $n \approx 4-5$;
- daudzstaru modelim piepilsētās vai meža masīvos parametrs ir $3 < n < 4$ robežās.

Ja punkts P atrodas uz līnijas, kas savieno punktus A un B , tad vidējā radiosignāla jauda, uztverot punktā X no $BTS_A - P^A_X \approx 1/r^n$, bet no $BTS_B - PBX \approx 1/(D-r)^n$.

Reālā uztvertā signāla jauda ir nejaušs process, kas ietver strauju mainīgo komponenti (sadalīto pēc Releja likuma) un lēnu mainīgo komponenti (sadalīto pēc normālā logaritmiskā likuma). Kā ir redzams 2.30. attēlā, bāzes stacijas BTS_A un BTS_B veic pārraidi vienādās frekvencēs $F_A = F_B$. Šajā gadījumā signāla vidējā līmeņa attiecība pret traucējumu līmeņi ir ierakstīta šādā veidā:

$$S/I = \left[\frac{D-r}{r} \right]^n, \quad (2.11.)$$

Ir jāņem vērā, ka signāla fedings var notikt kā pēc Releja, tā arī pēc normālā logaritmiskā likuma.

Mobilā sakaru tīkla klasteru struktūras gadījumā, kad pie statistiski neatkarīgiem uztveramiem signāliem punktā X no visām šūnām nāk vienādu frekvenču signāli $F_A = F_B = F_i$, tad attiecību signāls/traucējums var pierakstīt:

$$S/I = \left[r^n \cdot \sum_{i=1}^M \frac{1}{r_i^n} \right]^{-1}, \quad (2.12.)$$

kur M – kopējais BTS skaits apkalpošanas zonā;

R_i – attālums no uztveršanas punkta X līdz bāzes stacijai BTS_M .

Ir vērts atzīmēt, ka vienādojums (2.12.) ir patiens pie nosacījuma, ka BTS_A izstarotā signāla jauda ir pietiekamā lai nodrošinātu attiecīgu signāls/traucējums attiecību attālumā r , un ir lielāka, nekā radiosignāla jauda no bāzes stacijas BTS_B . Tādā veidā var secināt, ka mobilajā tīklā ir ierobežojumi pēc savstarpējo traucējumu kritērija, nevis pēc signāla un siltuma trokšņu līmeņa.

Tā kā apkalpošanas zonas teritoriālais radiopārklājums tiek panākts ar radiofrekvenču atkārtotās izmantošanas palīdzību (pilsētas nosacījumos pēc izmēriem nelielās šūnās), tad apļveida šūnu aproksimācijai sešstūra veidā, šūnu skaits klasterī (klasteru struktūra) tiek aprēķināts pēc vienādojuma:

$$N_{c-k} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{D}{r} \right)^2, \quad (2.13.)$$

tad frekvenču atkārtotās izmantošanas koeficients būs vienāds:

$$c = \frac{1}{N_{c-k}}, \quad (2.14.)$$

Klasteru struktūras raksturlielums N_{c-k} var pieņemt tikai diskrētus lielumus: 3, 4, 7, 9, 12, 13 utt., kurus nosaka no vienādojuma:

$$N_{c-k} = (k+1)^2 - k \cdot l, \quad (2.15.)$$

kur k un l – veseli pozitīvie skaitļi.

Attiecības $D/r = q$, līdzkanālu atkārtotības koeficienta vērtību, parasti aprēķina no pieļaujamās signāla attiecības pret traucējumiem S/I un sakaru sistēmas raksturojumiem. Apkalpošanas zonu reālus izmērus, konkrētāk lielumu D , r , q , N_{c-k} vērtības, nosaka virkne faktoru:

- piedāvātās slodzes (trafika) intensitāte;
- mobilajam sakaru tīklam piešķirto radiokanālu kopējais skaits;
- pieļaujamā atteikumu intensitāte;
- frekvenču kanālu sadalīšanas stratēģija.

Ja slodzes intensitāte visā mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonā *BTS* starpā ir vienmērīga, tad sakaru tīkla projektēšanas uzdevums nelielajam šūnu skaitam pilsētas robežās ir vienkāršs. Ja slodzes intensitāte, tuvojoties pilsētas robežai, samazinās, tad sakaru tīkla būvēšanas izdevumu minimizēšanai *BTS* šūnu izmērus pilsētas nomalēs palielina (palielinās šūnu rādiusi), un lielums $q = D/R$ būs jau mainīgs. Tomēr šajā gadījumā rodas šūnu izmēru un mainīgā trafika lieluma saskaņošanas problēmas. Tādā veidā apkalpošanas zonas teritoriālā radiopārklājuma aprēķinā, izmantojot statistisko metodi, jāizpildās nosacījumam:

$$\left(\frac{D-r}{r}\right)^n = (1-q)^n \leq S/I, \quad (2.16.)$$

kur S/I – signāla (*signal*, S) līmeņa pieļaujamā attiecība pret traucējumu (*interference*, I) līmeni.

2.6.2. Determinētā aprēķinu metode

Lietojot apkalpošanas zonas radiopārklājuma determinēto metodi [26], [27], [31], bāzes stacijas var izvietot tā, lai minimizētu radio kanāla izmantošanas intervāla vidējo lielumu (šūnu skaitu vienā klasterī (2.13.)) un vienlaikus sasniegtu apmierinošu apkalpošanas līmeni visas mobilās sakaru sistēmas apkalpošanas zonas robežās.

Lai optimāli izvietotu bāzes stacijas, nepieciešams zināt radiosignāla vidējo līmeni, kas tiek izstarots no bāzes staciju iespējamām atrašanās vietām un uztverts ar mobilām stacijām jebkurā atrašanās punktā, pat ārpus projektējamo šūnu robežām. Informāciju par signālu līmeņiem var iegūt aprēķinu, mērījumu vai prognozēšanas ceļā.

Visiem *BTS* apkalpošanas apgabaliem ir dažādas šūnu formas un izmēri. Šūnu izvietošanas un tajos uzstādīto bāzes staciju optimizācija noved pie *BTS* skaita minimizācijas, ievērojot noteiktā nepieciešamā kanālu skaita nodrošināšanu. Viena *BTS* atrašanās vietā var būt uzdotas vairākās apkalpošanas zonās, ko var panākt, izmantojot virzītās antenas. Šis paņēmieni dod papildus brīvību apkalpošanas zonu formu un izmēru izvēlē, un dažos gadījumos palīdz samazināt frekvenču atkārtotās izmantošanas intervālu.

Pirms sākt realizēt efektīvā teritoriālā radiopārklājuma konstruēšanu, izmantojot determinēto metodi, nepieciešams veikt detalizētu nepieciešamo faktoru uzskaiti. Īpašu uzmanību jāpievērš:

- *BTS* uzstādīšanas vietas izvēlei;
- frekvenču kanālu izvēlei tīkla šūnās;
- izmērītajiem vai aprēķinātajiem radiosignāla jaudas līmeņiem.

Apkalpošanas zonās ar lielu *BTS* izvietojuma blīvumu, kur frekvenču nobīde starp bāzes stacijām tiek noteikta, izmantojot starpkanālu traucējumu kritēriju S/I , nevis pieļaujamā trokšņa līmeņa ierobežojumus pēc S/N parametra, maksimālās slodzes gadījumos ir iespējams veikt apkalpošanu vienas šūnas ietvaros, bet ar blakus *BTS* radioaparātūras palīdzību.

Tādā veidā determinētā metode pirmajā tuvinājuma var dot teritoriālā radiopārklājuma novērtējumu apskatāmās teritorijas noteiktam šūnu skaitam, ņemot vērā radioviļņu izplatīšanās apstākļus un atkārtotu frekvenču pielietošanu.

Apkalpošanas zonas radiopārklājuma izpētes rezultātus, kas iegūti izmantojot dažādas metodes, jāprecizē mobilā tīkla optimizācijas etapā. Projektēšanas efektivitāti nepieciešams paaugstināt, veicot radiokanāla raksturlielumu mērījumus.

2.7. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi

2.7.1. Ievads

Radiopārklājuma plānošana ir nozīmīgais mobilo sakaru sistēmu projektēšanas etaps. Viens no galvenajiem mobilā tīkla plānošanas uzdevumiem ir panākt viendabīgu radiopārklājumu, vienlaikus saglabājot augstu sakaru pakalpojumu kvalitāti un samazinot kopējās izmaksas. Optimālās tīkla radiopārklājuma kartes izveidei, MST projektēšanas etapā jāizmanto nosacījumiem atbilstošie radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi. Lai sasniegtu augstu aprēķinu precizitāti, teorētiski modeļi var tikt uzlaboti, izmantojot eksperimentālu mērījumu un braukšanas testu (*drive tests*) rezultātus.

Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu galvenais uzdevums ir atveidot reālu signālu pārraides procesu, ņemot vērā visus faktoros, kuri to ietekmē konkrētajā vidē pie uzdotiem nosacījumiem. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskās modelēšanas mērķis – realizēt precīzus un vienkāršus, praksē pielietojamus rīkus radiosakaru sistēmu projektēšanai un analizēšanai.

Inženieraprēķinos izmantotie vienkāršotie matemātiskie modeļi ir kompromiss starp aprēķinu precizitāti un sarežģītību. Radioviļņu pārraides simulācija prasa lielus skaitļošanas resursus un aizņem daudz laika, kā arī ne vienmēr ir nepieciešama. Jāuzsver, ka nākotnes 5G sistēmās ar *MIMO* antenu izmantošanu, kad pārraide notiek centimetru un milimetru viļņos, vienkāršoto modeļu izmantošana vairs nebūs pietiekama. Šajos gadījumos signālu izplatīšanās precīzai modelēšanai var izmantot staru izsekošanas (*ray tracing*) un mākoņskaitļošana (*cloud computing*) tehnoloģijas.

2.7.2. Matemātisko modeļu klasifikācija

Atkarībā no apkārtējās vides ietekmes, radioviļņu izplatīšanās modelēšanai var tikt izmantotas gan determinētās, gan statistiskās metodes; nereti pielieto arī pusdeterminētus, pusempīriskus un empīriskus modeļus [4], [44].

Determinētie matemātiskie modeļi balstās uz radioviļņu izplatīšanās fizikas likumu izmantošanu. Aprēķinu pamatā ir vienu, divu vai daudzstaru radioviļņu izplatīšanās modeļi. Tajos tiek ņemti vērā šķēršļu ietekmes faktori radiosignālā izplatīšanās ceļā, kā arī vietējie

nosacījumi kanālā: rimšana brīvajā telpā, atstarojumi no objektiem, difrakcija, absorbcija, laušana un elektromagnētisko viļņu (EMV) šķērs polarizācija.

Statistiskajos matemātiskajos modeļos galvenokār tiek izmantoti radioviļņu pārraides eksperimentu rezultāti pie izplatīšanās statistiski nevienmabīgajā trasē un radiosignālu rimšanas vispārinātas matemātiskās formulas dažādajās apkārtējās vides tipos (pilsētā, piepilsētā, laukos, mežu masīvos utt.).

Pusempīriskie un empīriskie modeļi balstās uz signāla rimšanas attēlošanu radioviļņu izplatīšanās trasē rindas veidā, kurā ir iekļauti dažādi atlasīti (eksperimentāli iegūtie) empīriskie korekcijas koeficienti. Rezultātu pareizība, izmantojot šo aprēķinu metodes, ir tieši atkarīga no empīrisko korekcijas koeficientu precizitātes, un šie koeficienti ir patiesi tikai noteiktajā frekvenču diapazonā pie specifiskajiem apkārtējās vides nosacījumiem.

Jāuzsver, ka ņemot vērā faktiskus nosacījumus, radiosignāla zudumu aprēķinos pie elektromagnētisko viļņu izplatīšanās pa horizontālo zemes virsmu, plaši izmanto arī eksperimentālo pētījumu rezultātus. Piemēram, uz eksperimentu bāzes tika izstrādāti radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi statistiski nevienmabīgajā vidē (ar savu viļņu rimšanas likumu dažādu apvidu tipiem), kas ļauj aprēķināt jaudas vidējo vērtību, atkarībā no attāluma līdz signāla uztveršanas vietai pie konkrētajiem mobilo sakaru nosacījumiem (*ITU-R* vai *CEPT* rekomendācijas).

Kombinētās metodes sevī apvieno determinēto un statistisko radioviļņu izplatīšanās modeļu atsevišķās īpatnības. Tādā veidā radiopārklājumu zonu modeļus, izstrādātus ar šo metožu palīdzību, var pielietot radiosignālu raksturlielumu precīzam aprēķinam dažos atsevišķajos gadījumos.

2.7.3. Matemātiskie modeļi

Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi [45]:

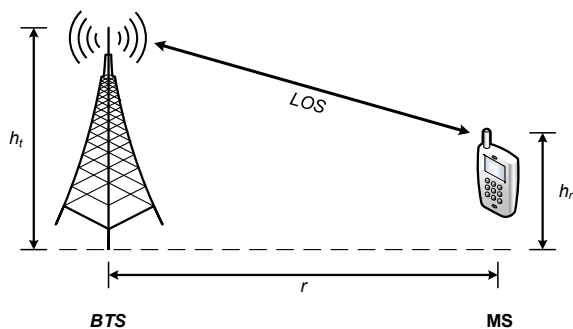
- apraksta elektromagnētisku viļņu izplatīšanās nosacījumus;
- nosaka dažādu šķēršļu, atstarošanas, izkliedes un difrakcijas avotu esamību vai tās varbūtību;
- noteic elektromagnētiskās enerģijas zudumus traktā.

Radioviļņu izplatīšanas matemātiskie modeļi ļauj aprēķināt signāla jaudu uztveršanas punktā P_r . Zinot mobilās stacijas jutības parametra $P_{r\ min}$ vērtību, var noteikt šūnas maksimālo rādīsus. Maksimālā šūnas rādīusa noteikšana ir viens no mobilo sakaru tīklu teritoriālā radiopārklājuma projektēšanas nozīmīgākajiem etapiem.

Vienstaru modelis

Vienstaru modeļa (2.31. att.) galvenais pieņēmums – radioviļņu izplatīšanās notiek neaizšķēršlotajā telpā, t. i. starp raidītāju un uztvērēju ir redzamības līnija (*line of sight, LOS*).

Signāli neaizšķēršlotajā telpā izplatās bez atstarošanas, izkliedes un difrakcijas, un garuma rimšana tajā var tikt noteikta, izmantojot Frīsa pārraides vienādojumu (2.6.).



2.31. att. Vienstaru izplatīšanās režīms.

Signāla jaudas vājināšanos vai zudumus traktā definē kā starpību starp faktisko pārraidīto un uztverto jaudu decibelos. Šajā gadījumā, signāla jauda MS uztveršanas punktā $P_{r,LOS}$ tiešredzamības nosacījumos [16]:

$$P_{r,LOS} = P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right) < 0, \text{ dBm} \quad (2.17.)$$

kur P_t – BTS antenas raidītāja jauda, dBm;

λ – darba viļņa garums, m;

G_t, G_r – BTS, MS antenu pastiprinājuma koeficienti;

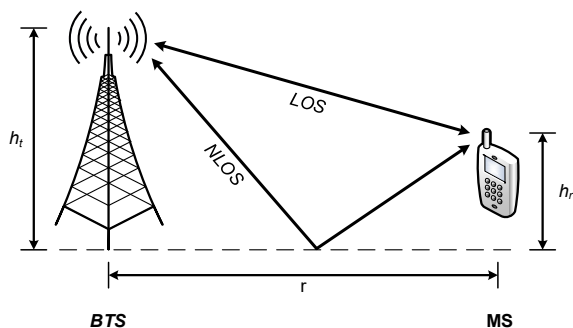
r – attālums no BTS raidītāja līdz MS uztvērējam, km;

λ_0 – normējošais viļņa garums, $\lambda_0 = 1$ m;

r_0 – normējošais attālums starp BTS un MS, $r_0 = 1$ km.

Divstaru modelis

Atšķirībā no vienstaru modeļa, kurā starp raidītāju un uztvērēju ir tikai viens tiešais ceļš, divstaru modelī [15] uztverto signālu veido divi dažādi stari: pirmais ir redzamības līnijas (LOS) stars, otrais – no zemes atstarotais (NLOS) (2.32. att.).



2.32. att. Divstaru modelī pieņemtie radioviļņu izplatīšanās ceļi.

Divstaru modelis (2.21.) neņem vērā signāla frekvenci un virsmas neviendabīgumu starp MS un *BTS*, kas būtiski ietekmē aprēķinātās jaudas precizitāti un ierobežo modeļa pielietojamību.

$$P_r = P_{r,LOS} + 10 \lg \psi, \text{ dBm} \quad (2.18.)$$

kur P_r – signāla jauda MS uztveršanas punktā, dBm;

ψ – lielums, kas tiek noteikts kā funkcija no zemes virsmas parametriem (2.19.);

$$\psi \approx 1 + R^2 + 2R \cdot \cos \left(\phi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot r \cdot 10^3} \right), \quad (2.19.)$$

kur R – atstarošanas koeficients, $R \leq 1$;

ϕ – atstarošanas leņķis, parasti $\phi = 3,142$ rad;

h_t – *BTS* antenas pacelšanas augstums, m;

h_r – MS antenas pacelšanas augstums, m.

$$0,8 r > r > 18 \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda}, \quad (2.20.)$$

$$P_r \approx P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r + 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_0} \right) - 40 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right), \text{ dBm} \quad (2.21.)$$

kur h_0 – normējošais augstums, $h_0 = 1$ m.

Daudzstaru modelis

Daudzstaru modelis ir vienstaru modeļa paplašinājums daudzstaru izplatīšanās režīmā. Pirmās kārtas tuvināšanā pārraides zudumus pie jebkura attāluma no raidītāja daudzstaru modelī var izteikt šādā veidā [14], [15]:

$$P_r = P_{r,LOS} - 10 \cdot n \cdot \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - X_g, \text{ dBm} \quad (2.22.)$$

kur n – rimšanas eksponenta (2.7. tab.);

X_g – gadījuma lielums pie Gausa normālsadalījuma, kurš norāda uz signāla vājinājumu fedinga dēļ ($X_g = 0$, ja fedinga nav).

Rimšanas eksponenta n ir vairāku vides parametru funkcija, kura ir izteikta skaitliski un parasti tiek noteikta eksperimentālo mērījumu rezultātā (2.7. tabula).

2.7. tabula

Rimšanas eksponentas lielums dažādās vidēs

Izplatīšanās vide	Rimšanas eksponenta n
Brīvā telpa (<i>LOS</i>)	2
Piepilsēta (<i>LOS/NLOS</i>)	2,7–3,5
Pilsēta (<i>NLOS</i>)	3–5

Lee modelis

Lee modeļa [18], [19] pamatā ir pieņēmums, ka attiecība starp divām dažādos attālumos uztvertajām *BTS* signāla jaudām ir proporcionāla šo attālumu un trases zudumu koeficienta attiecībai. Tādejādi, radioviļņu izplatīšanas nominālus zudumus var aprēķināt, ja ir zināma noteiktajā attālumā saņemtā jauda un ceļa zudumu koeficients dotajā vidē. Šos divus parametrus var viegli iegūt, veicot sākotnējo pamatnosacījumu mērījumus.

Pirmo modeļa versiju bezvadu punkta-punkta (*point-to-point*) savienojumiem Viljams Lī (*William C. Y. Lee*) izstrādāja sistēmām, kuras pārraida signālus līdzenā reljefā 900 MHz frekvencē, balstoties uz ASV veiktajiem eksperimentāliem mērījumiem.

Vēlāk Lī izstrādāja jaunu modeļa versiju apgabala-apgabala (*area-to-area*) savienojumiem līdzenā reljefā, par pamatu ņemot sistēmu ar šādiem parametriem:

- frekvence – 900 MHz;
- *BTS* raidītāja jauda – 10 W;
- *BTS* antenas pacelšanas augstums – 30,48 m;
- *BTS* antenas pastiprinājums – 6 dBd;
- MS antenas pacelšanas augstums – 3 m;
- MS antenas pastiprinājums – 0 dBd.

Šis modelis tika pilnveidots, lai atbalstītu darba frekvences līdz 2,4 GHz un no pamata sistēmas atšķirīgus parametrus. Signāla jaudas līmeņa aprēķināšanai uztveršanas punktā izmanto formulu, kurā mainīgi parametri ir doti attiecībā pret atsaucē parametrus:

$$P_r = P_{r0} - 10\gamma \cdot \lg\left(\frac{r}{r_{n0}}\right) - 10n \cdot \lg\left(\frac{f}{f_{n0}}\right) + 10\lg(\alpha_0), \text{ dBm} \quad (2.23.)$$

kur P_r – vidējais jaudas līmenis signāla uztveršanas punktā, dBm;

P_{r0} – nominālie zudumi nominālajā attālumā r_0 (2.8. tab.), dBm;

γ – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma (2.8. tab.);

r_{n0} – nominālais attālums starp *BTS* un MS, $r_{n0} = 1,6 \text{ km}$;

n – frekvences korekcija koeficients, atkarībā no vides, rekomendētie parametri ir doti 2.9. tabulā, $2 \leq n \leq 3$;

f – darba diapazona vidējā frekvence, MHz;

f_{n0} – nominālā darba frekvence, $f_{n0} = 900 \text{ MHz}$;

α_0 – parametru korekcijas faktors (2.24.), dBm.

$$\alpha_0 = \left(\frac{h_t}{h_{m0}}\right)^2 \cdot \left(\frac{h_r}{h_{rn0}}\right)^v \cdot \left(\frac{P_{tmw} \cdot 10^3}{P_{m0}}\right) \cdot \frac{G_t \cdot G_r}{4}, \text{ dBm} \quad (2.24.)$$

kur P_{tmw} – *BTS* raidītāja jauda, mW;

v – MS antenas augstuma korekcijas koeficients (2.25.);

P_{m0} – nominālā *BTS* raidītāja jauda, $P_{m0} = 10 \text{ W}$;

h_{m0} – nominālais *BTS* antenas pacelšanas augstums, $h_{m0} = 30,48 \text{ m}$;

h_{rn0} – nominālais MS antenas pacelšanas augstums, $h_{rn0} = 3 \text{ m}$.

$$v = \begin{cases} 2, & \text{ja } h_r > 10 \text{ m} \\ 1, & \text{ja } h_r < 3 \text{ m} \end{cases} \quad (2.25.)$$

Nominālo zudumu un zudumu korekcijas koeficienta lielumi

Izplatīšanās vide	P_{r0} , dBm	γ
Brīvā telpa	-45	2
Lauku rajons	-49	4,35
Piepilsēta	-61,7	3,84
Pilsēta	-70	3,68
Metropoles rajonā	-84	3,05

Frekvences korekcijas koeficienta lielumi

Izplatīšanās vide, frekvence f	n
Brīvā telpa, lauki, piepilsēta $f < 450$ MHz	2
Piepilsēta, metropoles rajonā $f > 450$ MHz	3

Okumura modelis

Okumura modelis ir balstīts uz Jošihisas Okumuras (*Yoshihisa Okumura*) veiktajiem lauka mērījumiem Tokijas apgabalā. Tie nosaka sākotnējo zudumu novērtēšanu $A_{mu}(f, r)$ kā funkciju (2.33. att.) no darba frekvences (no 100 MHz līdz 3 GHz) un no attāluma starp *BTS* un *MS* (no 1 līdz 100 km). Šis sākotnējais novērtējums tika iegūts eksperimentāli kvazivienmērīgam apgabalam, uzstādot *BTS* antenu 200 m un *MS* antenu 3 m augstumā.

Lai ņemtu vērā apstākļus, kas atšķiras no sākotnējiem nosacījumiem, tika ieviesti vairāki korekcijas koeficienti. Signāla jaudas līmeņa aprēķināšanas formula uztveršanas punktā izskatās šādi:

$$P_r = P_{r,LOS} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area}, \text{ dBm} \quad (2.26.)$$

kur $A_{mu}(f, r)$ – rimšanas komponente pilsētai pie uzdotas frekvences f un attāluma r starp *BTS* un *MS* (2.33. att.), dB;

$H(h_t)$ – *BTS* antenas pastiprinājuma koeficients (2.27.), dB;

h_{m0} – nominālais *BTS* antenas pacelšanas augstums, $h_{m0} = 200$ m;

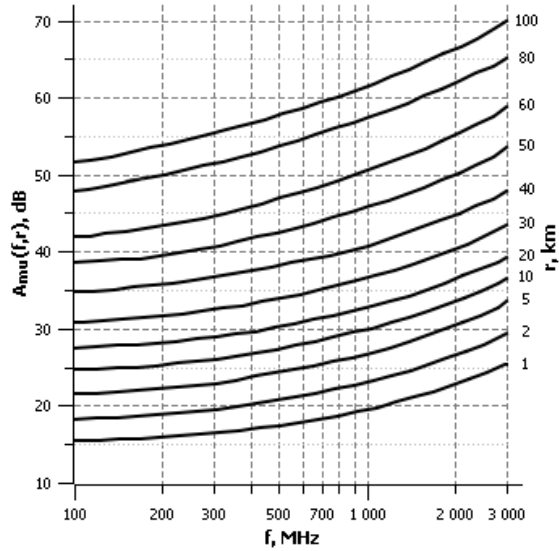
$H(h_r)$ – *MS* antenas pastiprinājuma koeficients (2.28.), dB;

h_{rn0} – nominālais *MS* antenas pacelšanas augstums, $h_{rn0} = 3$ m;

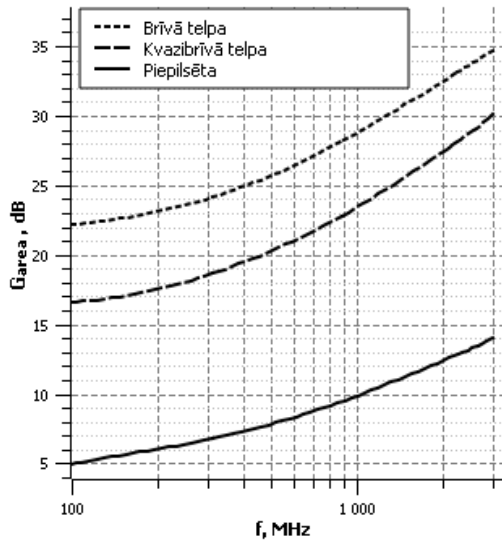
G_{area} – signāla rimšanas korekcijas faktors atkarībā no vides (2.34. att.), dB.

$$H(h_t) = 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_{m0}} \right), \text{ dB} \quad (2.27.)$$

$$H(h_r) = \begin{cases} 10 \lg \left(\frac{h_r}{h_{m0}} \right), & \text{ja } h_r \leq 3 \text{ m} \\ 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_{m0}} \right), & \text{ja } 3 < h_r < 10 \text{ m} \end{cases}, \text{ dB} \quad (2.28.)$$



2.33. att. Signāla rimšanas komponente pilsētāi.



2.34. att. Signāla rimšanas korekcijas faktors.

Okumura–Hata modelis

Balstoties uz Jošihisas Okumuras veiktajiem mērījumiem Tokijas pilsētā, Masaharu Hata izstrādāja *Okumura* modeļa paplašinājumu [11]. Modelis ieguva starptautisku atzinumu un tika nosaukts par *Okumura–Hata* modeli.

Tā kā Okumura modelī vairāki parametri ir izteikti empīrisku līkņu veidā, signālu zudumu aprēķināšana, kā arī aprēķinu procesa automatizācija, ir apgrūtināta. Hata piedāvāja šo parametru empīrisku formulējumu (2.10., 2.11. tab.), kas atbilst Okumura līknēm. Lietderīgā pielietojuma diapazonā Hata modelis sniedz prognozes, kas gandrīz neatšķiras no Okumuras sniegtajām. Signāla jaudas līmeņa aprēķināšanas formula *Okumura–Hata* modelim:

$$P_{r,Hata} = P_t - 69,55 - 26,16 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - \left(44,9 - 6,55 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right) \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 13,82 \lg\left(\frac{h_r}{h_0}\right) + a(f, h_r) + K(f), \text{ dBm} \quad (2.29.)$$

kur $a(f, h_r)$ – labojuma koeficients MS antenas pacelšanas augstumam (2.10. tab.), dB;

$K(f)$ – zudumu komponente, atkarībā no vides (2.11. tab.), dB;

f_0 – normējošā frekvence, $f_0 = 1$ MHz.

2.10. tabula

MS antenas augstuma labojuma koeficienta vērtības

Izplatīšanās vide	$a(f, h_r)$, dB	
Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta	$\left(1,1 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0,7\right) \cdot h_r - \left(1,56 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0,8\right)$	(2.30.)
Metropoles rajons, $f < 300$ MHz	$8,29 \left[\lg\left(1,54 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 1,1$	(2.31.)
Metropoles rajons, $f \geq 300$ MHz	$3,2 \left[\lg\left(11,75 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 4,97$	(2.32.)

2.11. tabula

Zudumu komponentes vērtības

Izplatīšanās vide	$K(f)$, dB	
Brīvā telpa	$4,78 \left[\lg\left(\frac{f}{f_0}\right) \right]^2 - 18,33 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 40,94$	(2.33.)
Piepilsēta	$2 \left[\lg\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 + 5,4$	(2.34.)
Pilsēta, metropoles rajons	0	

COST 231–Hata modelis

COST 231–Hata modeli ir izstrādājusī Eiropas zinātnes un tehnoloģiju sadarbības (*European Cooperation in Science and Technology, COST Association*) *COST 231* apakšgrupa, kura specializējās radioviļņu izplatīšanās modeļos.

Modelis [5] ir balstīts uz Okumuras eksperimentālām līknēm augšējā frekvenču diapazonā un Hata piedāvāto parametru empīrisku formulējumu. Faktiski, tas ir *Okumura–Hata* modeļa paplašinājums 1,5–2 GHz frekvencēm. Šis modelis ir paredzēts izmantošanai lielām un mazām šūnām.

COST 231–Hata modeli plaši izmanto, lai prognozētu mobilo sakaru sistēmu vidējus jaudas zudumus traktā. Formula jaudas aprēķināšanai MS uztveršanas punktā:

$$P_r = P_t - A - B \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 13,82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) - \left[44,9 - 6,55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right] \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - C, \text{ dBm} \quad (2.35.)$$

kur A – zudumu pastāvīgā komponente (2.12. tab.), dB;

B – frekvences korekcijas faktors (2.12. tab.);

$a(f, h_r)$ – MS antenas augstuma labojuma koeficients (2.36.), dB;

C – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no apkārtējās vides (2.13. tab.), dB.

$$\alpha(f, h_r) = \left(1,1 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0,7 \right) \cdot h_r - \left(1,56 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0,8 \right), \text{ dB} \quad (2.36.)$$

2.12. tabula

Zudumu komponentes un frekvences korekcijas faktora vērtības

Darba diapazons frekvence f , MHz	A , dB	B
$150 \leq f < 1500$	69,55	26,16
$1500 \leq f \leq 2000$	46,33	33,9

2.13. tabula

Zudumu korekcijas koeficienta vērtības

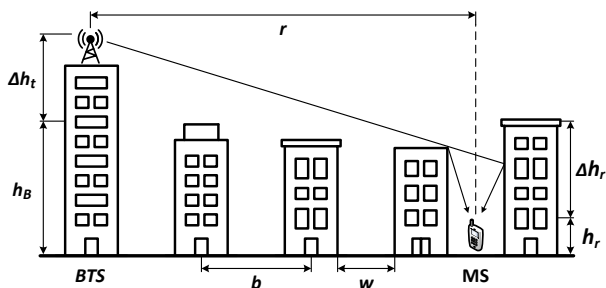
Izplatīšanās nosacījumi	C , dB
Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta	0
Metropoles rajons	3

COST 231–Walfisch–Ikegami modelis

COST 231–Walfisch–Ikegami (*COST 231–WI*) ir vēl viens modelis, kuru ir izstrādājusī Eiropas Zinātnes un tehnoloģijas sadarbības *COST 231* apakšgrupa. Modeļa [5] pamatā ir

radioviļņu ceļu prognozēšanas metode, kurā viļņu izplatīšanās kanjonielās (*stree canyon*) un aizšķērsošana ar ēkām ir aplūkotas atsevišķi.

Modelis ir balstīts uz Stokholmā veiktajiem mērījumiem tiešās redzamības nosacījumos un uz *Walfish, Bertoni, Ikegami* [13] modeļu kombināciju traucēta ceļa gadījumā. Tas ir piemērots lielām un mazām šūnām, kā arī mikrošūnām. Modeļi izmantotie pilsētas parametri ir redzami 2.35. attēlā.



2.35. att. Pilsētas parametri radioviļņu izplatīšanās aprēķiniem.

Tiešās redzamības gadījumā *BTS* signāla jauda *MS* uztveršanas punktā ir vienāda *BTS* raidītāja jaudas un trases *LOS* zudumu summai:

$$P_{r,LOS} = P_t + L_{LOS} = P_t - 42,6 - 26 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right), \text{ dBm} \quad (2.37.)$$

kur L_{LOS} – zudumi trasē tiešredzamības nosacījumos (2.40.), dB;

Netiešās redzamības nosacījumos *BTS* signāla jauda *MS* uztveršanas punktā ir vienāda *BTS* raidītāja jaudas un trases summāro zudumu summai:

$$P_{r,NLOS} = P_t + L_{rt}, \text{ dBm} \quad (2.38.)$$

kur L_{rt} – summārie zudumi trasē (2.39.), dB;

$$L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & \text{ja } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \text{ dB} \\ L_0, & \text{ja } L_{rts} + L_{msd} > 0 \text{ dB} \end{cases} < 0, \text{ dB} \quad (2.39.)$$

kur L_0 – zudumi brīvajā telpā NLOS modelim (2.41.), dB;

L_{rts} – zudumi difrakcijas un izkliedes dēļ (2.42.), dB;

L_{msd} – zudumi radioviļņu daudzstaru izplatīšanās dabas dēļ (2.43.), dB;

$$L_{LOS} = -42,6 - 26 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right), \text{ dB} \quad (2.40.)$$

$$L_0 = -32,45 - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right), \text{ dB} \quad (2.41.)$$

$$L_{rts} = 16,9 + 10 \lg \left(\frac{w}{w_0} \right) - 10 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{\Delta h_r}{h_0} \right) - L_{ori}, \text{ dB} \quad (2.42.)$$

kur w – ielu vidējais platums, parasti $w = 0,5b$ m;

w_0 – ielas platuma normējošā vērtība, $w_0 = 1$ m;

L_{ori} – zudumi orientācijas dēļ (2.14. tab.), dB;

2.14. tabula

Papildzudumi ielas orientācijas dēļ,
kur φ – ielas orientācijas leņķis attiecībā pret vilni (parasti $\varphi = 90^\circ$)

Ielas orientācijas leņķis φ , °	L_{ori} , dB
$0 \leq \varphi < 35$	$0,354\varphi - 10$
$35 \leq \varphi < 55$	$2,5 + 0,075(\varphi - 35)$
$55 \leq \varphi < 90$	$4 - 0,114(\varphi - 55)$

$$L_{msd} = -L_{bsh} - k_a - k_d \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - k_f \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 9 \lg\left(\frac{b}{b_0}\right), \text{ dB} \quad (2.43.)$$

kur L_{bsh} – jaudas pastiprinājums gadījumos, kad *BTS* antena uzstādīta virs ēku jumtiem (2.15. tab.), dB;

k_a – zudumi, atkarībā no attāluma starp *BTS* un MS un *BTS* antenas pacelšanas augstuma (2.15. tab.), dB;

k_d – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma starp *BTS* un MS (2.15. tab.);

k_f – difrakcijas zudumu koeficients atkarībā no darba frekvences vērtības (2.16. tab.);

b – attālums starp pretī stāvošajām ēkām, m;

b_0 – attāluma starp ēkām normējošā vērtība, $b_0 = 1$ m.

2.15. tabula

Parametru vērtības, atkarībā no *BTS* antenas augstuma virs ēkām

Augstums Δh_t , m; attālums r , km	L_{bsh} , dB	k_a	k_d
$\Delta h_t > 0$	$-18 \lg(1 + \Delta h_t)$	54	18
$\Delta h_t \leq 0, r \geq 0,5$	0	$54 - 0,8 \cdot \Delta h_t$	$18 - 15 \frac{\Delta h_t}{h_B}$
$\Delta h_t \leq 0, r < 0,5$		$54 - 0,8 \cdot \Delta h_t \cdot 2r$	

kur h_B – ēku vidējais augstums, m;

Δh_t – *BTS* antenas pacelšanas augstums virs ēku jumtiem, $\Delta h_t = h_t - h_B$, m;

Δh_r – attālums no MS antenas līdz ēku jumtiem, $\Delta h_r = h_B - h_r$, m.

2.16. tabula

Difrakcijas zudumu koeficienta vērtības

Izplatīšanās vide	k_r
Piepilsēta, pilsēta	$-4 + 0,7(f/925 - 1)$
Metropoles rajons	$-4 + 1,5(f/925 - 1)$

Hata–Davidson modelis

Hata–Davidson modelis ir atvasināts no Okumura–Hata modeļa, kurš, savukārt, balstās uz Okumura zuduma līknēm. Galvenie šī modeļa uzlabojumi ir signālu izplatīšanās vides izvēle (pilsēta, piepilsēta, kvazibrīva un brīva telpa), kā arī uztvērēja antenas augstuma korekcijas koeficienta ieviešana.

Modelī ir iekļautas arī frekvences un attāluma korekcijas faktori, lai paplašinātu maksimālu attāluma diapazonu (starp BTS raidītāju un MS uztvērēju) līdz 300 km un raidītāja antenas maksimālu pacelšanas augstumu līdz 2,5 km.

Jaudas aprēķināšanai MS uztveršanas punktā izmanto formulu:

$$P_r = P_{rHata} - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r), \text{ dBm} \quad (2.44.)$$

kur P_{rHata} – signāla jauda uztveršanas punktā pēc Okumura–Hata modeļa (2.29.), dBm;

$A(h_t, r)$, $S_1(r)$ – korekcijas faktori, atkarībā no attāluma starp BTS un MS (2.17., 2.18. tab.), dB;

$S_2(h_t, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no BTS antenas pacelšanas augstuma un attāluma starp BTS un MS (2.45.), dB;

$S_3(f)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona (2.46.), dB;

$S_4(f, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp BTS un MS (2.18. tab.), dB.

$$S_2(h_t, r) = \begin{cases} 0,00784 \cdot \left| \lg\left(\frac{9,98}{r}\right) \right| \cdot (h_t - 300) & \text{ja } h_t \geq 300 \text{ m} \\ 0 & \text{ja } h_t < 300 \text{ m} \end{cases}, \quad (2.45.)$$

$$S_3(f) = \frac{f}{250 \lg\left(\frac{1500}{f}\right)}, \quad (2.46.)$$

2.17. tabula

Attāluma diapazona korekcijas faktora vērtības

Attālums r, km	$A(h_t, r)$, dB
$r < 20$	0
$20 \leq r < 300$	$0,62137 \cdot (r - 20) \cdot \left[0,5 + 0,15 \lg\left(\frac{h_t}{121,92}\right) \right]$

2.18. tabula

Attāluma diapazona un frekvences korekcijas faktoru vērtības

Attālums r, km	$S_1(r)$, dB	$S_4(f, r)$, dB
$r < 64,38$	0	0
$64,38 \leq r < 300$	$0,174 \cdot (r - 64,38)$	$0,112 \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64,38)$

Radioviļņu izplatīšanās mežā

Mežs ir heterogēna (neviendabīga) vide ar nejausu veģetācijas elementu izvietojumu, kuri atšķiras pēc formas, izmēra un parametriem. Elektromagnētiskie viļņi, izplatoties neviendabīgā meža veģetācijā:

- rimst un izkļiedējās stumbros, zaros un lapās;
- atstarojās no zemsegas, stumbriem, koku pamatnēm un meža masīva;
- maina polarizāciju;
- izplatās daudzmodu režīmā.

Jāatzīmē, ka praktiski nav iespējams izveidot radioviļņu izplatīšanās matemātisku modeli meža nosacījumiem, ņemot vērā visas iepriekš minētās parādības. Tuvinātus uztvertā signāla jaudas aprēķinus var veikt, izmantojot vispārinātu formulu meža masīviem [53]:

$$P_r \approx P_{iLOS} - \alpha_{mF} \cdot r + 10 \lg[\zeta(r)], \text{ dBm} \quad (2.47.)$$

kur α_{mF} – garuma rimšanas koeficients (2.19. tab.), dB/km;

$\zeta(r)$ – korekcijas parametrs (virsmas viļņa ietekmē) (2.19. tab.).

2.19. tabula

Korekcijas parametru vērtības

Darba frekvence f , MHz	α_{mF} , dB/m	$\zeta(r)$
900	0,185	10 ^{0.1}
1800	0,36	

Radioviļņiem izplatoties brīvā telpā un atsārtojoties no meža masīva [53] izmanto šādu formulu:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{V_F} \frac{F_t(\theta)^2 \cdot \sigma(\phi)}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot V_0} dV, \text{ W} \quad (2.48.)$$

kur $F_t(\theta)$ – raidītāja antenas vērsma diagramma, $F_t(\theta) = I$ visvirzienu antenām;

V_F – meža masīva tilpums, m³;

V_0 – tilpuma normējošais parametrs, $V_0 = 1 \text{ m}^3$;

ϕ – leņķis starp radioviļņa krišanas virzienu uz meža virsmas un no tās atstarotā stara virzienu, °;

$\sigma(\phi)$ – tilpuma vienības izkļiedes īpatnējais efektīvais laukums, m²;

r_1 – attālums no *BTS* raidītāja līdz meža masīvam, km;

r_2 – attālums no meža masīva līdz *MS* uztvērējam, km.

2.7.4. Matemātisko modeļu ierobežojumi

Empīriskie un pusempīriskie modeļi ir balstīti uz eksperimentāliem datiem, tāpēc tiem ir daudz ierobežojumu attiecībā uz atbalstāmo frekvenču diapazoniem, *BTS* un mobilo staciju izvietojumu, kā arī daudziem citiem nosacījumiem. Apskatīto radioviļņu izplatīšanās modeļu

saraksts ar pieļaujamo vērtību diapazoniem attiecīgajiem ievadparametriem ir apkopots 2.20. tabulā [3], [45].

Tabulā ir izmantoti šādi apzīmējumi:

- R (*reflection*) – atstarošanās,
- EMW (*electromagnetic wave*) – elektromagnētiskais vilnis (EMV),
- LOS (*line of sight*) – radioviļņu izplatīšanās tiešredzamības zonā,
- $NLOS$ (Non Line-of-Sight) – radioviļņu izplatīšanās netiešās redzamības zonā,
- D/EMW (*diffraction of the EMW*) – EMV difrakcija,
- A/EMW (*attenuation of the EMW*) – EMV rimšana.

2.20. tabula

MST radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu salīdzinājums

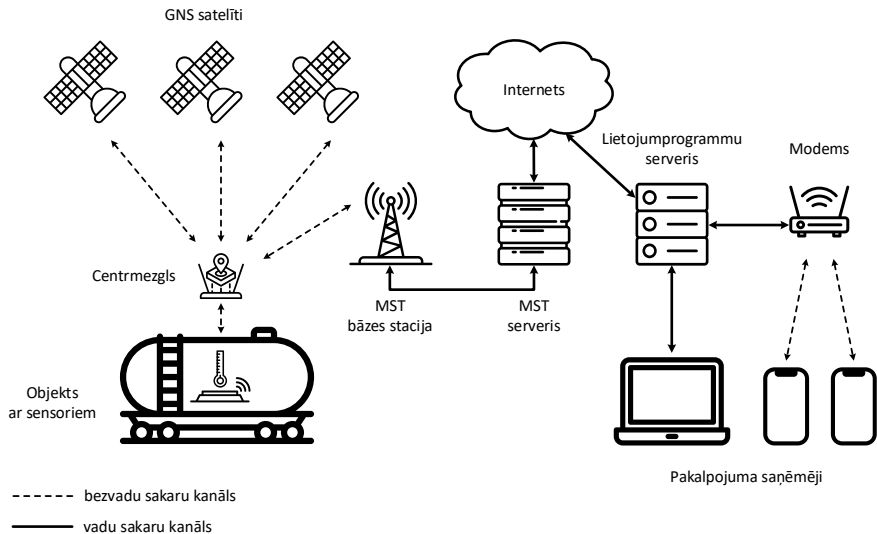
Nosaukums	Frekvenču diapazons, GHz	Attāluma diapazons, m	BTS antenas augstums, m	MS antenas augstums, m	Radioviļņu izplatīšanās režīms	Radioviļņu izplatīšanās vide	Šūnas veids
Vienstaru	-	-	-	-	LOS	iekštelpas/ārvide	makro
Divstaru	-	-	-	-	$LOS+R/EMW$	iekštelpas/ārvide	makro
Daudzstaru	-	-	-	-	$LOS+NLOS+D/EMW+\Sigma R_i/EMW_i$	iekštelpas/ārvide	makro, mikro, pico, femto
<i>Lee</i>	0,15–2,4	< 20 000	20–100	1–15	$LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$	ārvide	makro
<i>Okumura</i>	0,15–1,92	1000–100000	30–1000	1–10	$LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$	ārvide	makro, mikro
<i>Okumura–Hata</i>	0,15–1,5	1000–20000	30–200	1–10	$LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$	ārvide	makro, mikro
<i>COST231 Hata</i>	1,5–2	1000–20000	30–200	1–10	$LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$	ārvide	makro, mikro
<i>COST231 WI</i>	0,8–2	2–5000	4–50	1–3	$LOS+NLOS+\Sigma D_i/EMW_i$	ārvide	makro, mikro
<i>Hata-Davidson</i>	0,15–1,5	1000–300000	30–2500	1–10	$LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$	ārvide	makro, mikro

3. TELEMĀTIKAS SISTĒMU SAKARU LĪNIJU INŽENIERAPRĒĶINU ALGORITMI UN PĒTĪJUMI

3.1. Ievads

Dzelzceļa infrastruktūras elementu savstarpējās mijiedarbības organizācija ir viena no galvenajām telemātikas sistēmu projektēšanas problēmām. Tipiskā telemātikas sistēma iekļauj aparatūru, kas ir savstarpēji savienota ar vairākiem sakaru kanāliem. Piemēram, dzelzceļa kravu izsekošanas un integritātes kontroles sistēmās var tikt pielietotas šādas iekārtas un tehnoloģijas:

- globālas navigācijas sistēmas (*GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou*, utt.) moduļi;
- temperatūras, mitruma, triecienu devēji ar bezvadu datu pārraidi uz centrmezgļu;
- centrmezgls ar mobilo sakaru modemu;
- mobilā sakaru tīkla aparatūra (bāzes stacija, stacijas kontrolieris, utt.);
- datu apkopošanas un apstrādes serveris ar pieslēgumu internetam;
- informācijas apskatīšanas termināli (datori, mobilās ierīces).



3.1. att. Telemātikas sistēmas un tās iekārtu piemērs.

Heterogēna telekomunikācijas tīkla, ko veido telemātikas sistēmu nevienādāgi elementi un tehnoloģijas, uzbūvei ir nepieciešams nodrošināt sakarus starp dažādiem objektiem, izmantojot gan vadu, gan bezvadu standartus. Līdz ar to, mūsdienu dzelzceļa telemātikas sistēmās sakaru tīkla projektēšana nepieciešams izskatīt kabeļu sakaru līniju (galvenokārt simetrisku un optisku) un mobilo sakaru sistēmu parametru aprēķināšanas inženierisriņājumus.

3.2. Kabeļu sakaru līniju automatizēto inženieraprēķinu algoritms

Kabeļu sakaru līnijas projektēšana prasa skaidru priekšstatu par signālu pārraides parametru lielumiem plašā darba frekvenču spektrā. Šie raksturlielumi palīdz novērtēt konkrētā kabeļa piemērotību projektā noteiktajām prasībām.

Kabeļa līnijas inženieraprēķinu metodes ļauj noteikt kabeļlīnijas parametrus, ja ir zināmi kabeļa konstrukcijas izmēri un materiāli, no kuriem tas ir izgatavots. Dotās formulas palīdz noteikt zudumus sakaru kabelī, novērtēt kabeļa maksimālo garumu, pārraidot tajā dotās frekvences signālus, noteikt projektējamās sakaru līnijas reģenerācijas aparatūras izvietojumu. Vislielākā uzmanība pievērsta primāro un sekundāro parametru frekvenču dispersijai, t. i., parametru izmaiņai atkarībā no pārraidāmā signāla frekvences ar mērķi noteikt optimālu materiālu vai tehnoloģiju izvēli.

Kabeļu sakaru līniju parametru formulas, kas ir aprakstītas šī darba 1.2., 1.3. un 1.4. apakšnodaļās, sākotnēji bija paredzētas manuāliem aprēķināšanai un nav piemērotas šī procesa automatizēšanai. Darbderīgu simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas sakaru līniju matemātisko modeļu izveidei ir nepieciešams:

- 1) izteikt parametrus un mainīgus SI mērvienībās;
- 2) izmantot vienādus SI mērvienību daudzkārtņus vieniem un tiem pašiem mainīgiem visās formulās un izteiksmēs;
- 3) sakārtot parametru noteikšanas secību tā, lai pie secīgiem aprēķiniem nezināmo vērtības tika izskaitļotas pirms tie parādās formulās un izteiksmēs;
- 4) izteikt visus koeficientus, kas ir doti grafiku un tabulu veidā, kā funkcijas;
- 5) ieviest jaunus koeficientus, kas nosaka mainīgo vērtības atkarībā no sakaru līnijas fiziskiem raksturlielumiem;
- 6) izveidot parametru aprēķināšanas algoritmu.

Pirmie trīs nosacījumi tika izpildīti SKSL, KKSL, ŠOSL parametru noteikšanas metožu apskatīšanas, analīzes un apkopošanas etapos. 1. nodaļā piedāvātās formulas jau atbilst šiem kritērijiem, 1.2.5., 1.3.4., 1.4.4. apakšnodaļās ir dota SKSL, KKSL, ŠOSL parametru aprēķināšanas secība.

Grafiski šo parametru vērtības tika iegūtas grafiku ciparošanas procesā. Īpatnējās materiālās un viļņvada dispersijas (1.12. att.) gadījumā, funkcijas $M(\lambda)$ un $B(\lambda)$ ir izteiktas, izmantojot ciparoto datu masīvus (1.11. tab.) un interpolēšanas metodi (3.2. att.).

Parametri, kuru vērtības ir dotas tabulu veidā vai ir atkarīgas no sakaru līnijas konstrukcijas, arī tika izteiktas kā funkcijas, ieviešot jaunus koeficientus k_{st} . (savijuma veids), k_{vm} . (vadu materiāls), k_{im} . (izolācijas materiāls):

- a, D, ψ (1.1. tab.) – $a(k_{st}), D(k_{st}), \psi(k_{st})$;
- ρ, σ (1.3. tab.) – $\rho(k_{vm}), \sigma(k_{vm})$;
- $F(x), G(x), H(x), Q(x)$ (1.4. tab.) – $F(\sigma, d, f), G(\sigma, d, f), H(\sigma, d, f), Q(\sigma, d, f)$;
- P_S (1.5. tab.) – $P_S(k_{st})$;
- $\varepsilon_r, tg\delta$ (1.6. tab.) – $\varepsilon_r(k_{im}, f), tg\delta(k_{im}, f)$.

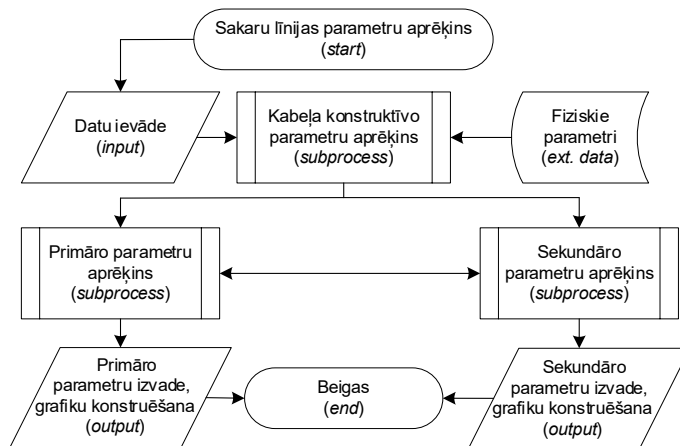
$\lambda_t :=$	0.7	μm	$M_t :=$	189.58	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$	$B_t :=$	3.457	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$
	0.8			114.875			3.967	
	0.9			73.985			4.579	
	1			46.584			5.182	
	1.1			26.743			5.744	
	1.2			12.175			6.315	
	1.3			0.456			7.006	
	1.4			-8.999			7.501	
	1.5			-16.651			8.205	
	1.6			-23.375			8.777	
	1.7			-29.251			9.790	
	1.8			-34.574			11.618	
	1.9			-39.54			14.154	
	2			-44.67			17.431	
	2.1			-49.137			21.561	
	2.2			-54.069			26.547	

$$M(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, M_t), \lambda_t, M_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

$$B(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, B_t), \lambda_t, B_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

3.2. att. Īpatnējās materiālās un viļņvada dispersijas izteikšana funkciju veidā *Mathcad* vidē.

Sakaru līnijas parametru aprēķina vispārējais algoritms ir redzams 3.3. attēlā.



3.3. att. Sakaru līnijas parametru aprēķina algoritms.

Simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas kabeļu parametru aprēķinu automatizēšanai, balstoties izstrādātajos algoritmos, tika padāvātas trīs programmas *Mathcad* inženieraprēķinu vidē.

Programmas ļauj uzreiz pēc sakaru līnijas un kabeļa konstrukcijas parametru ievadīšanas ieraudzīt primāro un sekundāro parametru lielumus, SKSL un KKSL gadījumā aplūkot to frekvenču dispersijas grafikus, redzēt lielumu atkarību no līnijas garuma. Tas atvieglo kabeļa līnijas projektēšanas uzdevumu, jo pazūd sākotnējā nepieciešamība eksperimentāli noteikt kabeļa garuma parametrus un raksturlīknes. Kabeļa materiālu raksturojošo lielumu un konstrukcijas parametru ievadīšana notiek katras programmas sākumā. Simetriskā kabeļa sākumdati, kā tie izskatās *Mathcad* programmā, ir redzami 3.4. attēlā.

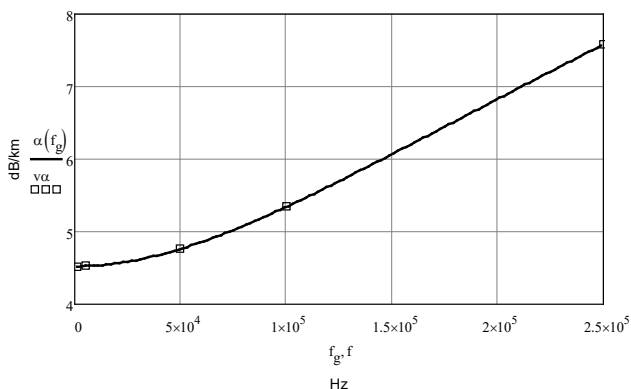
SKSL parametru automatizētais aprēķins

Dots:

$d := 0.64$	mm		vada dzīslas diametrs
$\delta := 0.265$	mm		vada izolācijas biezums
$\Delta := 0$	mm		vada joslizolācija
$h := 65$	mm		savijuma solis
$k_{st} :=$		<input type="text" value="pāra"/>	savijuma tips
$k_{vm} :=$		<input type="text" value="varš"/>	vada materiāls
$k_{im} :=$		<input type="text" value="fiziski uzputots porains polietilēns (PEEG)"/>	izolācijas materiāls
$f := (1 \ 5 \ 50 \ 100 \ 250) \cdot 10^3$		Hz	frekvenču diapazons

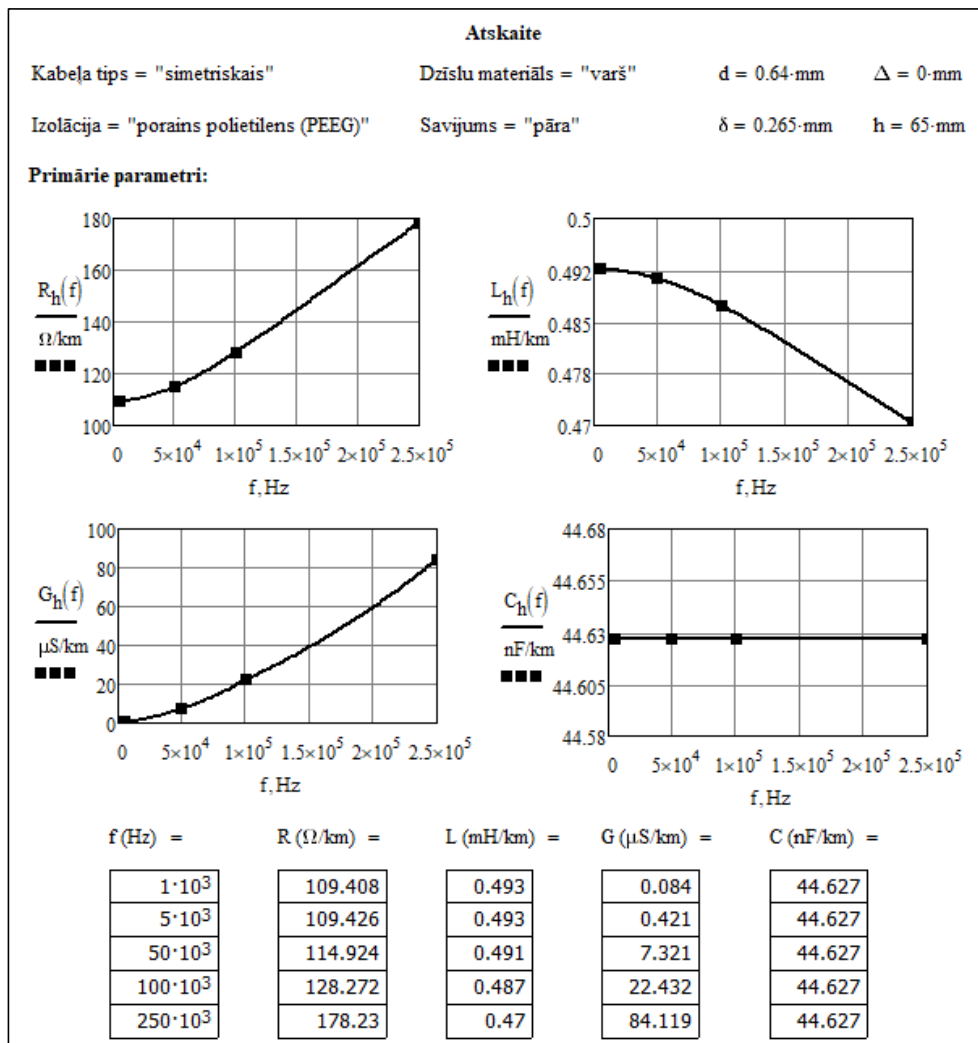
3.4. att. SKSL parametru aprēķina programmas sākumdati.

Visi līnijas parametru lielumi un grafiki *Mathcad* programmā tiek aprēķināti un konstruēti automātiski. Piemēram, garuma rimšanas koeficienta $\alpha(f)$ vērtība, atkarība no signāla darba frekvences, ir parādīta 3.5. attēlā.



3.5. att. Garuma rimšanas koeficienta izmaiņu grafika piemērs.

Kabeļu sakaru līnijas matemātiskās modelēšanas rezultāti tiek apkopoti atskaitē attiecīgās *Mathcad* programmas beigās, kur galveno parametru vērtības ir dotas sākuma nosacījumos uzdotajās frekvencēs un ir parādītas grafiku veidā, atspoguļojot to atkarību no signāla frekvences. Atskaites fragments simetriskā kabeļa sakaru līnijai ir parādīts 3.6. attēlā.

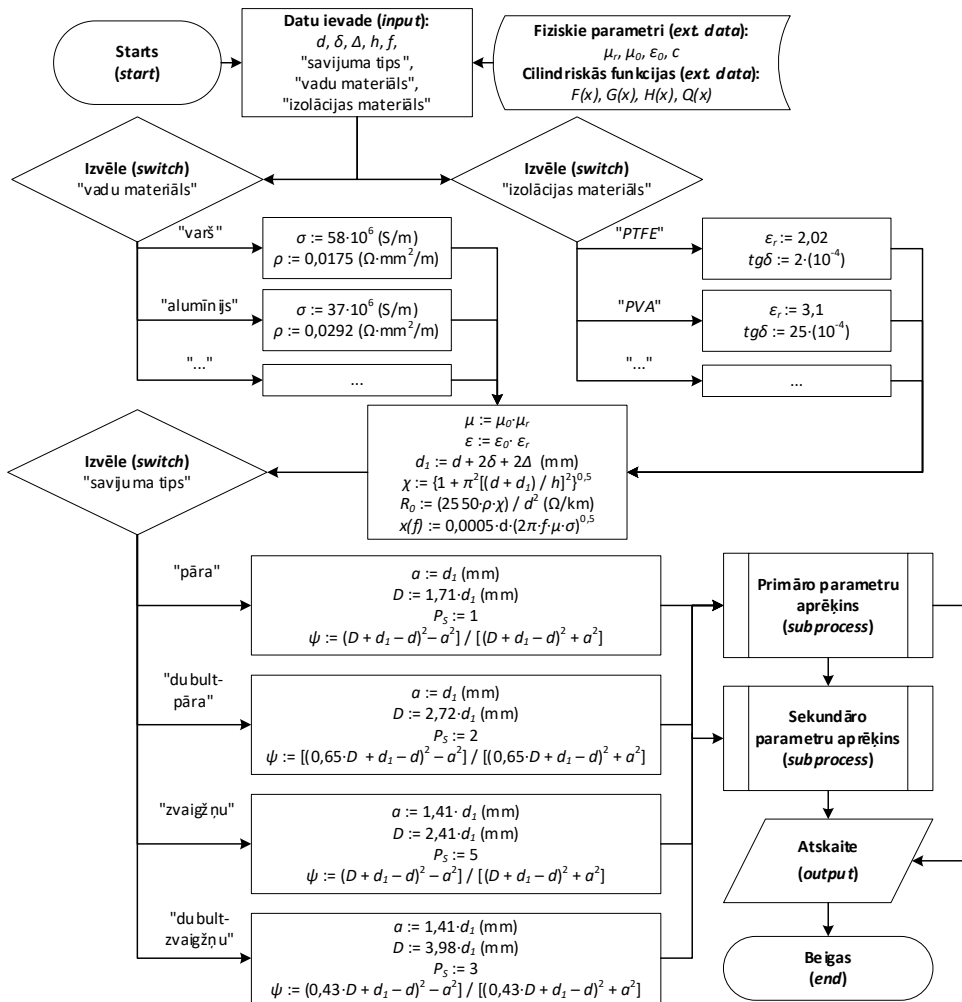


3.6. att. SKSL matemātiskās modelēšanas *Mathcad* programmas atskaites piemērs.

3.3. SKSL parametru inženieraprēķini

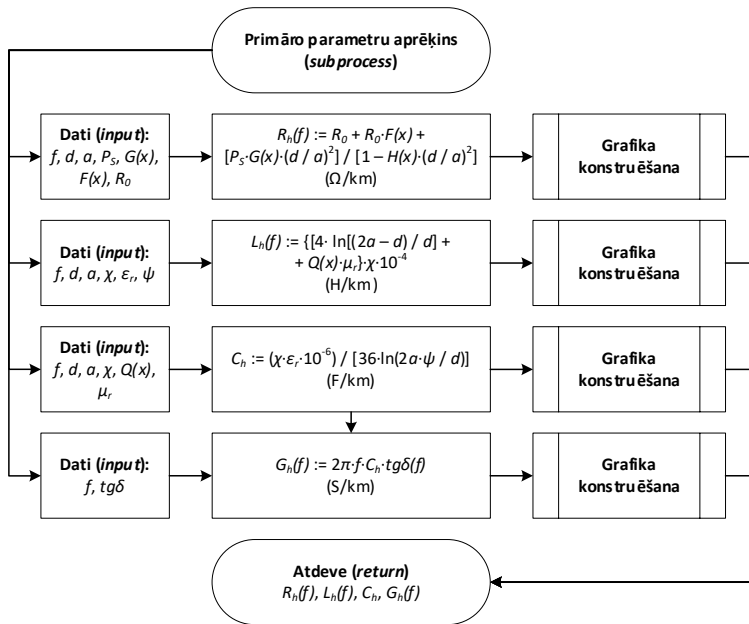
3.3.1. Parametru aprēķināšanas algoritms

Simetrisku sakaru līniju parametru aprēķināšanas programmas izstrādei *Mathcad* vidē, balstoties aprēķināšanas secībā (1.7. tab.), tika izveidots algoritms (3.7. att.).

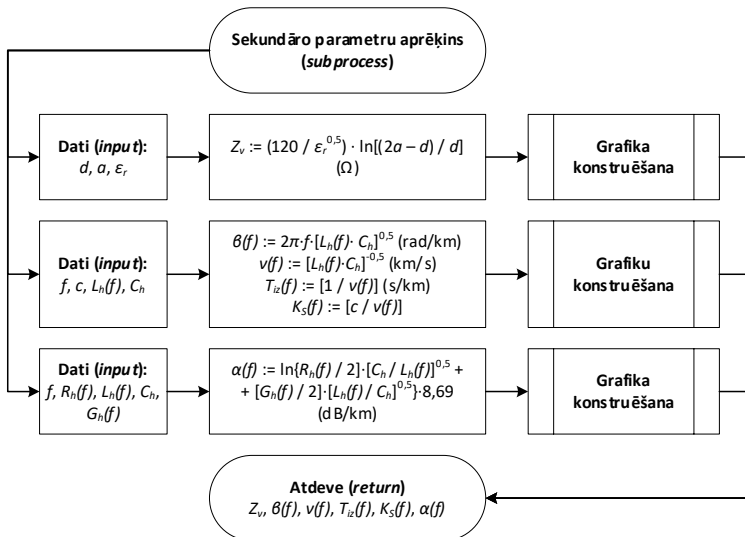


3.7. att. SKSL parametru aprēķināšanas algoritms programmā *Mathcad*.

Šajā algoritmā primāro un sekundāro SKSL parametru aprēķini ir doti apakšprogrammu veidā un ir redzami 3.8. un 3.9. attēlos.



3.8. att. SKSL primāro parametru aprēķināšanas apakšprogrammas algoritms.



3.9. SKSL primāro sekundāro aprēķināšanas apakšprogrammas algoritms.

3.3.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana

Piedāvātā SKSL matemātiskā modeļa inženieraprēķinu precizitātes noteikšanai tika apskatīts *Belden 7701 NH* simetriskais kabelis ar zināmiem primāriem un sekundāriem

parametriem. Kabelis ir veidots no divām vara dzīslām ar diametru 0,64 mm (*AWG 22*) un izolāciju no poraina polietilēna. Vadītāju izolācijas minimālais biezums – 0,23 mm. Dotā kabeļa tehniskajā aprakstā (5. pielikums), neskaitot informāciju par kabeļa konstrukciju un mehāniskajām īpašībām, ražotājs norāda kabeļa sertifikācijas procesā eksperimentāli iegūtus kabeļa elektriskos parametrus noteiktajās frekvencēs. Simetrisko kabeļu sakaru līniju galvenie parametri ir viļņu pretestība, garuma rīšanās koeficients, pretestība līdzstrāvai un maiņstrāvai, kapacitāte un saīsinājuma koeficients.

Sakaru līnijas aprēķinātie parametri (1. pielikums) un parametri no kabeļa datu lapas tiek salīdzināti 3.1. tabulā. Ir vērts pievērst uzmanību tam, kādā veidā ražotāja dokumentācijā tiek dota pretestība līdzstrāvai. Dotajā gadījumā dokumentācijā pretestība ir norādīta tikai vienam vadītājam, bet aprēķinu piemērā pretestība tiek noteikta kabeļa vadītāju pārim. Salīdzināšanas ērtībai garuma pretestība ir pārrēķināta vienam vadītājam un visu parametru mērvienības tika vienādotas.

3.1. tabula

SKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Frekvence, MHz	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Viļņu pretestība	–	99,793	100	Ω
Garuma pretestība līdzstrāvai	–	54,67	55	Ω/km
Garuma kapacitāte	–	44,627	46	pF/m
Garuma rīšanās koeficients	0,772	1,331	1,3	dB/100 m
	1	1,511	1,5	
	4	3,047	3,1	
	10	4,886	4,9	
	16	6,251	6,3	
	20	7,034	6,9	

Kā ir redzams 3.1. tabulā, viļņu pretestības, garuma pretestības, kapacitātes un rīšanās koeficienta aprēķinātās vērtības nepārsniedz šo parametru standarta lielumus. Kopumā kabeļa *Belden 7701 NH* aprēķinātie un standarta parametri savstarpēji atšķirās ne vairāk par 5 %, kas liecina par izmantoto matemātisko modeļu piemērotību izmantošanai simetrisko sakaru kabeļu līniju projektēšanas inženierpraksē.

Izmantojot *Ethernet* tehnoloģiju ciparu informācijas pārraidei simetriskā kabeļa līnijā, nepieciešams ņemt vērā maksimālo rekomendēto segmenta garuma vērtību, kas ir norādīta IEEE 802.3 apakšgrupas standartos. Piemēram, vītā pāra kabeļa segmenta garums nedrīkst pārsniegt:

- *Ethernet (10BASE-T)*, *Fast Ethernet (100BASE-TX)*, *Gigabit Ethernet (1000BASE-T)*, *2.5 Gigabit Ethernet (2.5GBASE-T)*, *5 Gigabit Ethernet (5GBASE-T)* un *10 Gigabit Ethernet (10GBASE-T)* tīklos – 100 m;

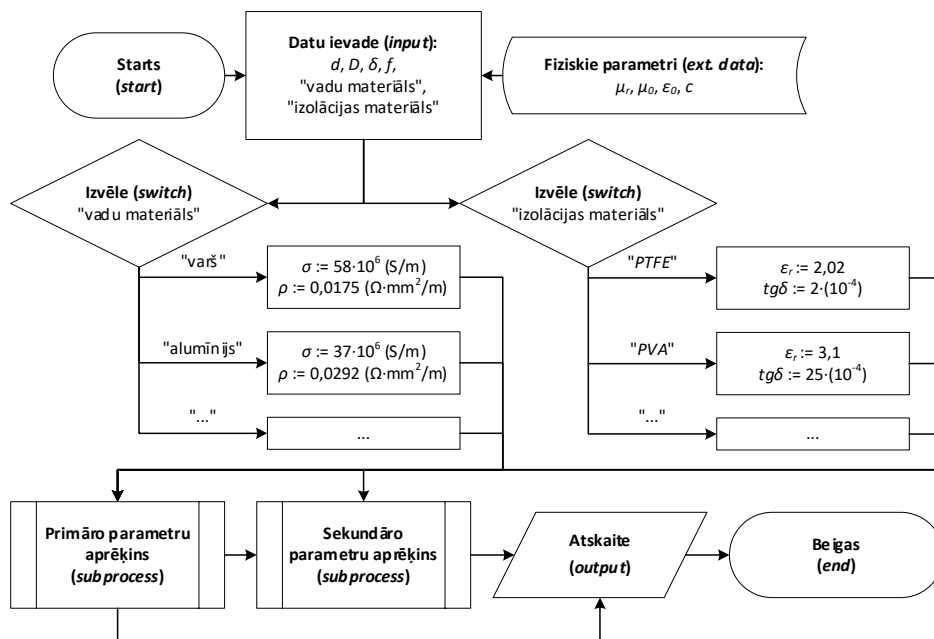
- 25 Gigabit Ethernet (25GBASE-T), 50 Gigabit Ethernet (50GBASE-T) tīklos – 30 m.

Ir svarīgi pievērst uzmanību kabeļa garuma rimšanas koeficientam, jo pie 20 dB lieliem zudumiem signāla jauda līnijas izejā jau ir simtreiz mazāka, nekā signāla jauda līnijas ieejā.

3.4. KKSL parametru inženieraprēķini

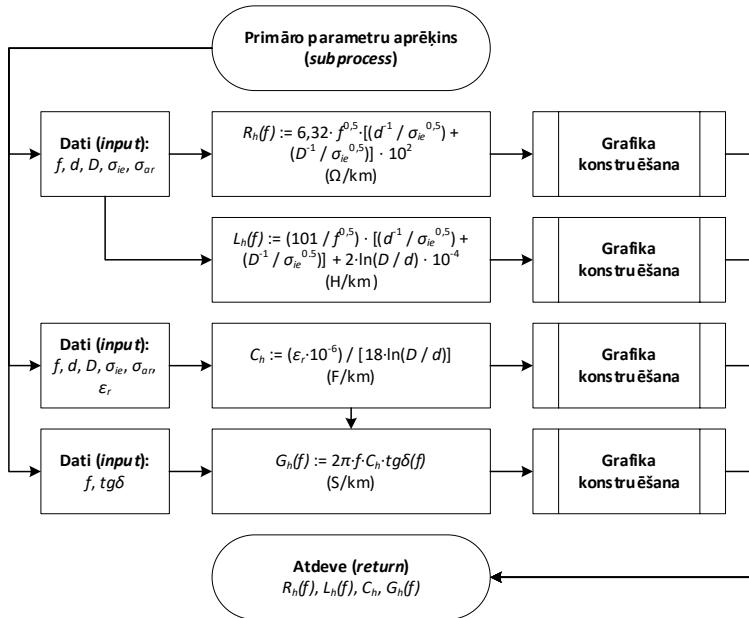
3.4.1. Parametru aprēķināšanas algoritms

Koaksiāla kabeļa sakaru līnijas parametru aprēķināšanas kārtība nebūtiski atšķiras no simetriska kabeļa līnijas inženieraprēķiniem. Attiecīgi, balstoties SKSL aprēķināšanas algoritmā (3.7. att.) un KKSL parametru noteikšanas secībā (1.8. tab.), tika realizēts KKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas algoritms *Mathcad* programmas izstrādei (2. pielikums).

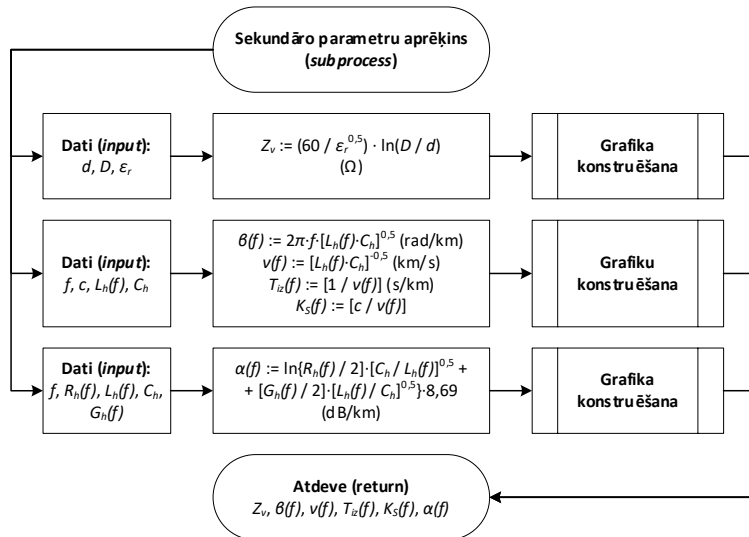


3.10. att. KKSL parametru aprēķināšanas algoritms programmā *Mathcad*.

Primāro un sekundāro SKSL parametru aprēķini kopējā algoritmā (3.10. att.) ir doti apakšprogrammu veidā un ir redzami 3.11. un 3.12. attēlos.



3.11. att. KKSĻ primāro parametru aprēķināšanas apakšprogrammas algoritms.



3.12. att. KKSĻ sekundāro parametru aprēķināšanas apakšprogrammas algoritms.

3.4.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana

KKSĻ inženieraprēķinu precizitātes noteikšanai tika izvēlēts *Belden CX3C1* koaksiālais kabelis (6. pielikums), kas paredzēts izmantošanai augstfrekvenču (līdz 2,15 GHz) signālu pārraides sistēmās. Kabeļa centrālais vadītājs ir vara dzīsla, ekrāns – vara folija. Centrālā

vadītāja diametrs ir 3,38 mm. Iekšējais dielektriķis ir izgatavots no fiziski uzputota polietilēna, iekšējās izolācijas diametrs – 14,9 mm.

Koaksiālās līnijas svarīgākie parametri ir viļņu pretestība, garuma rimšanas koeficients un saīsinājuma koeficients. Rimšanas koeficientam palielinoties, visas augstākās harmonikas koaksiālajā līnijā rimst arvien straujāk, kā rezultātā pārraidāmais ciparu signāls tiek kropļots.

Belden CX3C1 kabeļa aprēķinātie parametri apkopoti 3.2. tabulā, kur tie tiek salīdzināti ar parametriem no šī kabeļa datu lapas. Veiktais parametru aprēķins ir dots 2. pielikumā.

3.2. tabula

KKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Frekvence, MHz	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Viļņu pretestība	–	74,959	75	Ω
Garuma kapacitāte	–	52,8	54	pF/m
Garuma rimšanas koeficients	5	0,394	0,4	dB/100m
	50	1,283	1,3	
	100	1,845	1,8	
	200	2,674	2,6	
	400	3,928	3,9	
	600	4,968	4,8	
	800	5,909	5,7	
	1000	6,795	6,5	

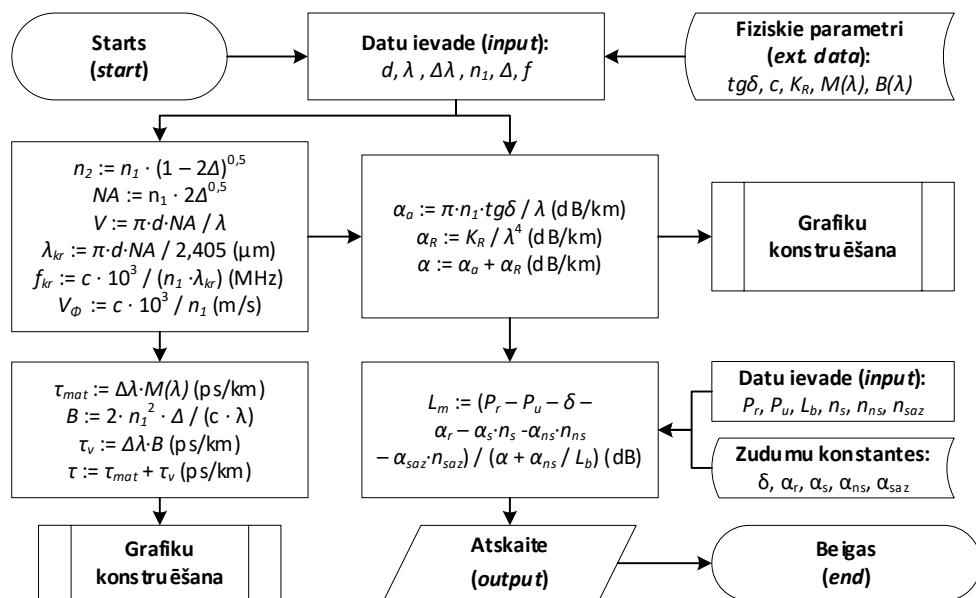
Kā ir redzams, aprēķinātie viļņu pretestības un garuma rimšanas koeficienta parametri atšķiras no *Belden CX3C1* kabeļa standarta parametru lielumiem ne vairāk par 5 %, kas ļauj izmantot aprēķinos izmantotos modeļus koaksiālo kabeļlīniju projektēšanas inženierpraksē.

Šobrīd koaksiālus kabeļus ārkārtīgi reti izmanto ciparu informācijas pārraidei. *10Base-5*, *10Base-2* un *10Broad-36* pakešu datu pārraides standarti bija izstrādāti vēl pagājušajā gadsimta 80. gados, atbalstīja datu pārraidi ar ātrumu līdz 10 Mbit/s 500 m, 185 m, 3,6 km attālumā attiecīgi. Mūsdienās šī tehnoloģija tiek uzskatīta par novecojušu.

3.5. ŠOSL parametru inženieraprēķini

3.5.1. Parametru aprēķināšanas algoritms

Saskaņā ar ŠOSL parametru aprēķināšanas secību tika izstrādāts šķiedru optiskās sakaru līnijas garuma rimšanas koeficienta, dispersijas un reģenerācijas iecirkņa garuma noteikšanas algoritms (3.13. att.).



3.13. att. ŠOSL parametru aprēķināšanas algoritms programmā *Mathcad*.

Baltoties piedāvātajā algoritmā, tika izstrādāta ŠOSL parametru automatizēto aprēķinu programma *Mathcad* vidē (3. pielikums).

3.5.2. Inženieraprēķinu un standartparametru salīdzināšana

Šķiedru optikas sakaru līnijas parametru aprēķina analīzei tika izmantots *Belden LT096FM* vienmodu optiskais kabelis (7. pielikums). Kabelim ir 96 optiskās šķiedras, katras šķiedras diametrs ir 8,6 μm. *Belden LT096FM* kabelis ir paredzēts signālu pārraidei pie 1310 nm vai 1550 nm viļņu garuma.

Kabeļa maksimāli pieļaujamās parametru vērtības, kas norādītas ražotāja datu lapā, un *Mathcad* programmā aprēķinātie parametri apkopoti 3.3. tabulā. Parametru aprēķins ir apskatāms 3. pielikumā.

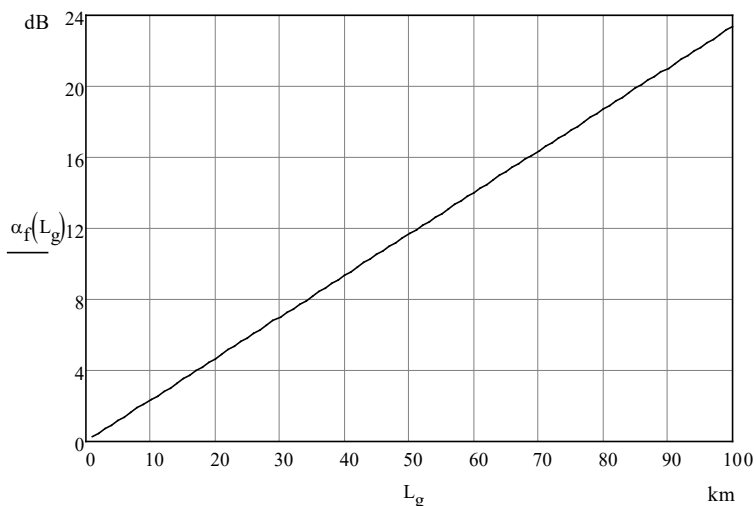
3.3. tabula

ŠOSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Kritiskā viļņa garums	1,232	1,26	μm
Garuma rīšanas koeficients, λ = 1310 nm	0,357	0,35	dB/km
Garuma rīšanas koeficients, λ = 1550 nm	0,234	0,25	dB/km
Optiskās šķiedras dispersija	15,305	18	ps/km

3.3. tabulā redzams, ka parametru aprēķinātās vērtības nepārsniedz ražotāja noteiktos lielumus vairāk par 15 %.

Grafikā 3.14. ir apskatīti dotā šķiedru optikas kabeļa ar rimšanu saistītie zudumi atkarībā no kabeļa kopējā garuma.



3.14. att. Šķiedru optikas kabeļa zudumi atkarībā no līnijas garuma.

Kā ir redzams 3.14. grafikā, kabeļa zudumi pat 100 km attālumā nepārsniedz 24 dB. Taču praksē līnijas maksimālā garuma noteikšanai jāievēro virkne nosacījumu. Ir zināms, ka papildzudumi ir gan savienotājiem, gan signāla raidītājam, turklāt jānodrošina sakaru sistēmas drošuma rezerve. Šīm nolūkam parasti aprēķina reģenerācijas iecirkņa garumu (1.4.3. nodaļa). Šķiedru optikas līnijas parametru aprēķinos (3. pielikums) tika noteikts vienkāršās sakaru sistēmas reģenerācijas iecirkņa garums – 75,48 km. Šajā attālumā zudumi kabelī ir 17,6 dB, kas atbilst signāla jaudas samazināšanai 57,5 reizēs.

Ņemot vērā visus aprēķinus, var secināt, ka aprakstītie šķiedru optikas kabeļu līniju modeļi un parametru aprēķināšanas algoritmi sniedz ticamus rezultātus un tos var lietot dzelzceļa transporta telemātikas sistēmu projektēšanā.

3.5.3. Inženieraprēķinu un eksperimentālu mērījumu salīdzināšana

Optiskās sakaru līnijas ir mūsdienu dzelzceļa telemātikas sistēmu mugurkauls. Latvijas dzelzceļā optiskā šķiedras tiek regulāri pārbaudītas ar mērķi savlaicīgi noteikt problemātiskus ŠOSL posmus, kuros ir novērojamas parametru svārstības vai zudumu pieaugums, novērst nepilnības un garantēt stabilus sakarus.

Optiskās šķiedras zudumu mērījumi, izmantojot laika domēna optisko reflektometru (*Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR*) ir viena no svarīgākajām ŠOSL pārbaudēm. *OTDR* ir optoelektriskais mērījumu instruments, kas paredzēts optiskās šķiedras parametru

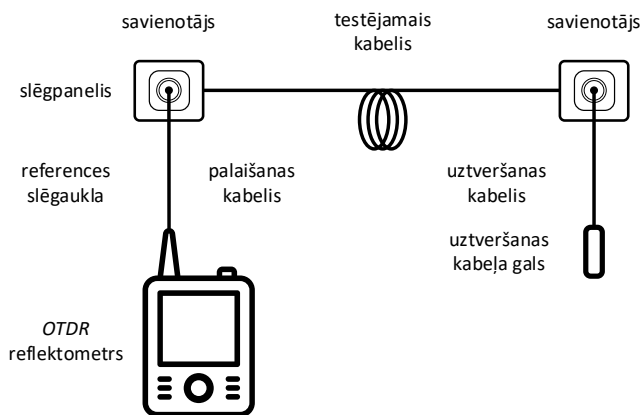
raksturošanai. Reflektometrs no līnijas viena gala ievada šķiedrā optisku impulsu virkni un uztver to līnijas otrajā galā. Signāls šķiedras izejā var būt slāpēts, izkliedēts vai vairākkārt atstarots kabeļa materiāla nevienādīgumu dēļ, un šo parādību analīze ļauj iegūt detalizētu informāciju par optiskā kabeļa stāvokli un līnijas parametriem kopumā.

Lai pārbaudītu 3.5.1. apakšnodaļā piedāvātu ŠOSL garuma rimšanas koeficienta un kopējo zudumu aprēķināšanas precizitāti, tika veiktas maģistrālā optiskā kabeļa šķiedru mērījumi iecirknī Rīga–Salaspils. Šajā posmā ir ielikts optiskais kabelis *OKSTM-10-01-0,22-96*, kam ir 96 atsevišķas optiskās dzīslas. Mērījumu veikšanai tika izmantoti portatīvie *EXFO* firmas *OTDR* reflektometri: *AXS-100-023B-EI-VFL* un *EXFO FTB-1-S2-8G* (3.14. att.).



3.15. att. *EXFO* AXS-100 (pa kreisi) un FTB-1 (pa labi) mēraparātu ārējais izskats.

Zudumu mērījumi optiskajā kabelī tika veikti VAS “Latvijas dzelzceļš” Elektrotehniskās pārvaldes atbildīgo darbinieku uzraudzībā, neietekmējot vilcienu kustības drošību un kritiski svarīgu sakaru iekārtu darbu. Mērījumiem tika izmantota *OTDR* reflektometra pieslēgšanas shēma, kas ir redzama 3.16. attēlā.



3.16. att. *OTDR* reflektometra pieslēgšanas shēma.

Mērījumu rezultātā tika iegūtas atsevišķu kabeļa šķiedru zudumu vērtības katrā no četriem apakšposmiem: Rīga–Šķirotava; Šķirotava–Dole; Šķirotava–Salaspils; Dole–Salaspils. Mērījumi ir apkopoti 3.4. tabulā un papildināti ar tehniskās dokumentācijas informāciju par līnijās esošām šķiedras metinājuma vietām un citiem savienojumiem, kas ietekmē zudumus.

3.4. tabula

Eksperimentāli iegūtie ŠOSL zudumu mērījumi iecirknī Rīga–Salaspils

Posma sākums	Posma beigas	Līnijas garums, km	Metinājumi, gab.	Savienotāji, gab.	Šķiedras Nr.	Viļņa garums, nm	Kopējie zudumi, dB	Vidējie zudumi, dB/km
Rīga–pas.	Šķirotava, "A" parks	8,726	5	2	25	1310	3,74	0,429
						1550	2,33	0,267
					26	1310	3,32	0,380
						1550	2,02	0,231
					27	1310	3,45	0,395
						1550	2,11	0,242
					28	1310	3,91	0,448
						1550	2,44	0,280
					29	1310	3,56	0,408
						1550	2,22	0,254
					30	1310	3,5	0,401
						1550	2,17	0,249
Šķirotava, "A" parks	Dole	9,649	7	2	25	1310	3,99	0,414
						1550	2,48	0,257
					26	1310	3,89	0,403
						1550	2,4	0,249
					27	1310	3,69	0,382
						1550	2,22	0,230
					28	1310	4,07	0,422
						1550	2,51	0,260
					29	1310	3,83	0,397
						1550	2,3	0,238
					30	1310	3,76	0,390
						1550	2,26	0,234
Šķirotava, "A" parks	Salaspils	11,799	8	2	31	1310	4,58	0,388
						1550	2,79	0,236
					32	1310	4,63	0,392
						1550	2,86	0,242
					33	1310	4,93	0,418
						1550	3,11	0,264
					34	1310	4,56	0,386
						1550	2,73	0,231
					35	1310	4,59	0,389
						1550	2,67	0,226
					36	1310	4,55	0,386
						1550	2,76	0,234

3.4. tabulas turpinājums

Posma sākums	Posma beigas	Līnijas garums, km	Metinājumi, gab.	Savienotāji, gab.	Šķiedras Nr.	Viļņa garums, nm	Kopējie zudumi, dB	Vidējie zudumi, dB/km
Dole	Salaspils	2,233	4	2	7	1310	1,5	0,672
						1550	1,01	0,452
					8	1310	1,67	0,748
						1550	1,16	0,519
					9	1310	1,66	0,743
						1550	1,16	0,519
					10	1310	1,25	0,560
						1550	0,84	0,376
					11	1310	1,34	0,600
						1550	0,88	0,394
					12	1310	1,04	0,466
						1550	0,68	0,305

Eksperimentāli iegūtie mērījumi vēlāk tika izanalizēti, un kopējo zudumu lieluma svārstības tika izteiktas kā minimālā, maksimālā un vidējā vērtībā. Katram apakšposmam tika veikti teorētiskie zudumu aprēķini, ņemot vērā kabeļa parametrus, līnijas garumu,etinājumu un savienojumu skaitu, kā arī citus signāla jaudu ietekmējošos faktorus. Parametru noteikšanai izmantota ŠOSL aprēķinu programma *Mathcad* vidē (3. pielikums). Pārstrādātais mērījumu apkopojums, salīdzinot ar inženieraprēķinu rezultātā iegūtām teorētiskām zudumu vērtībām, ir apkopots 3.5. tabulā.

3.5. tabula

ŠOSL eksperimentālu mērījumu un inženieraprēķinu salīdzinājums

Posma sākums	Posma beigas	Līnijas garums, km	Viļņa garums, nm	Eksperimentāli iegūtās zudumu vērtības, dB			Aprēķinātā vērtība, dB
				min.	maks.	vidēji	
Rīga-pas.	Šķirotava, "A" parks	8,726	1310	3,21	3,91	3,48	3,41
			1550	1,94	2,44	2,15	2,18
Šķirotava, "A" parks	Dole	9,649	1310	3,69	4,07	3,87	3,75
			1550	2,22	2,51	2,36	2,39
Šķirotava, "A" parks	Salaspils	11,799	1310	4,55	4,93	4,64	4,49
			1550	2,67	3,11	2,82	2,83
Dole	Salaspils	2,233	1310	1,04	1,67	1,41	1,35
			1550	0,68	1,16	0,96	0,92

Aprēķinātie kopējie zudumi šķiedru optiskajā līnijā, izmantojot zināmus kabeļu parametrus un sakaru tīkla elementu pieslēgšanas shēmas, atšķirās no vidējiem eksperimentāliem aprēķiniem ne vairāk par 5 %. Var secināt, ka

- piecus gadus veciem optiskās šķiedras kabeļiem, kas tika pārbaudīti, nav novērojama degradācija un visi pārraidi raksturojošie parametri ir normas robežās;

- 1.4. apakšnodaļā apskatītie ŠOSL matemātiskie modeļi sniedz diezgan precīzu parametru prognozi 1310 nm un 1550 nm viļņu garumos.

3.6. MST inženieraprēķini

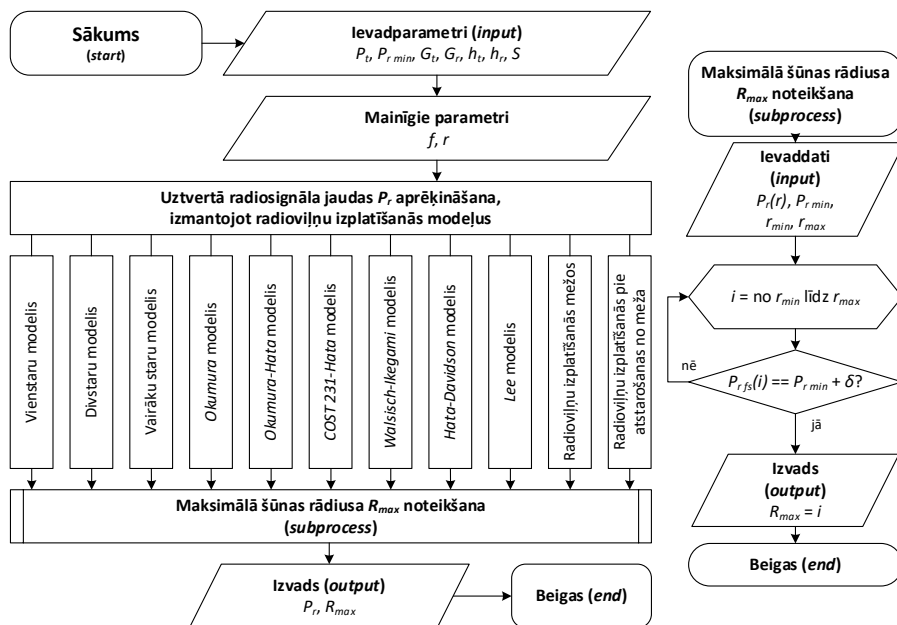
3.6.1. Šūnas radiopārklājuma zonas aprēķināšanas algoritms

Tehnoloģiskie radiosakaru tīkli (vilcienu, staciju, tehniskās apkopes un operatīvie) aptver visu Eiropas dzelzceļu tīklu, un to ekspluatācijā galvenokārt tiek izmantotas specializētas digitālās radioiekārtas. Lai aktīvi attīstītu un pilnveidotu radiosakaru pakalpojumus, tostarp mobilo sakaru tīklus, ir jāuzlabo radiofrekvenču resursu pārvaldības metodes.

MST šūnas radiopārklājuma zonas noteikšanas uzdevums ir ne tikai jaunu mobilo sakaru tīklu projektēšanas jautājums, bet arī esošo tīklu uzturēšanas izaicinājums, jo radiosignālu izplatīšanās nosacījumi mainās apkārtējo vides faktoru ietekmē. Dzelzceļa transporta telemātikas sistēmās mobiliem bezvadu tīkliem ir liela loma sakaru organizēšanā, un radiopārklājuma vienmērīguma nodrošināšana un tās pastāvīga kontrole ir obligāti uzdevumi.

Šūnas radiopārklājuma zonas noteikšanai minimāli ir nepieciešams: zināt bāzes stacijas radiosignāla jaudas izmaiņu likumsakarības, ko nosaka uztvertā signāla jaudu mobilās stacijas (MS) atrašanās vietā; mobilās stacijas radiouztvērēja jutības parametra $P_{r\ min}$ lielumu.

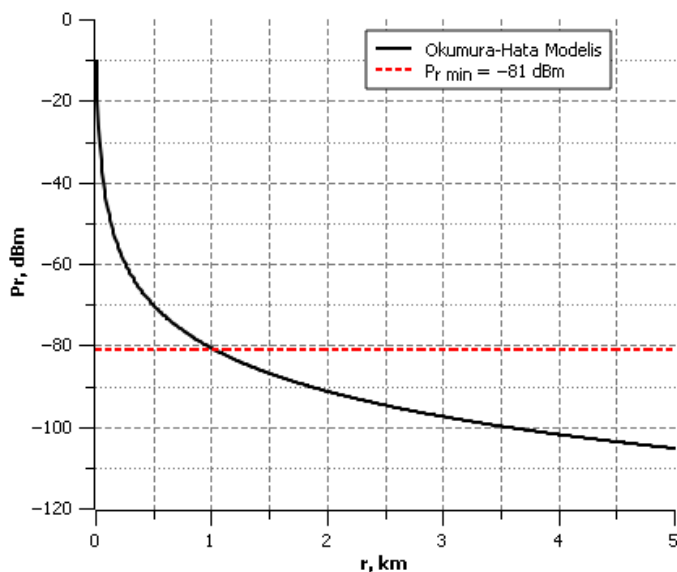
MS uztvertā signāla jaudas izmaiņas teorētiski tiek aprakstītas ar radioviļņu matemātisko modeļu palīdzību, savukārt jutību praksē nosaka mobilo iekārtu sakaru modemu parametri. Radiosignāla jaudas noteikšanai MS uztveršanas punktā un šūnas radiopārklājuma rādiusa noteikšanai tika sastādīts algoritms, kas ir redzams 3.17. attēlā.



3.17. att. MST šūnas maksimālā rādiusa aprēķināšanas algoritms.

No blokshēmas (3.17. att.) labas daļas izriet, ka atkarībā no mobilās stacijas MS uztvērēja jutības vērtības $P_{r\ min}$ un attiecīgā matemātiskā modeļa, kas nosaka $P_r(r)$ funkciju, programmas algoritms ļauj aprēķināt mobilā tīkla šūnas maksimālo rādiusu R_{max} .

Aprakstītā algoritma [31], [56] loģiku var attēlot arī grafiski. Piemēram, konstruējot MS uztvertā signāla jaudas līmeņa izmaiņu līkni $P_r(r)$ (3.18. att.) un atzīmējot MS uztvērēju jutību horizontālās līnijas veidā, šīs līnijas un līknes krustojuma punktā uz horizontālās ass būs nolasāma R_{max} vērtība lejupsaītes (*downlink*) režīmam.



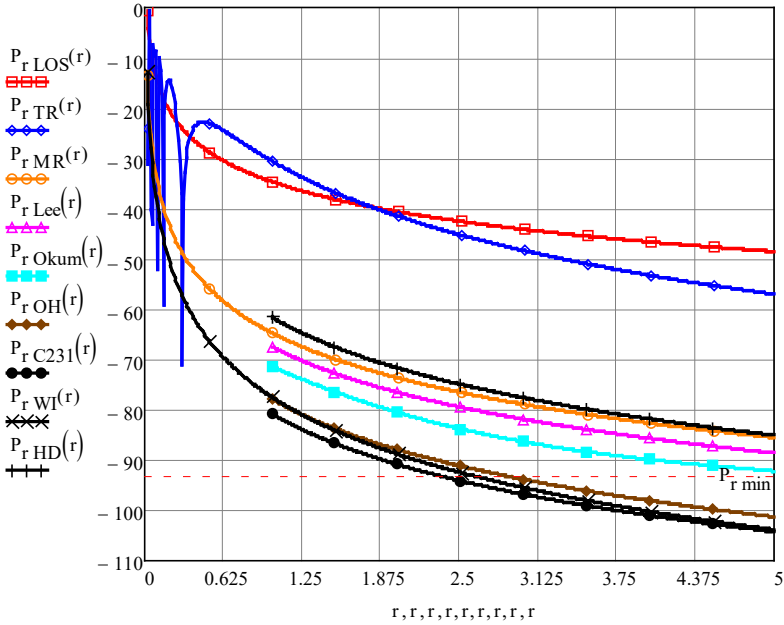
3.18. att. Maksimālā šūnas rādiusa noteikšana pēc Okumura–Hata modeļa ($P_{r\ min} = -81$ dBm, $R_{max} = 1,021$ km).

3.6.2. Radioviļņu izplatīšanās modeļu salīdzinājums

Apkārtējās vides ietekmes faktoru radioviļņu izplatīšanās novērtēšanai, kā arī rezultātu, kas tika iegūti, izmantojot 2.7.3. apakšnodaļā aprakstītos matemātiskus modeļus un algoritmu (3.17. att.), salīdzināšanai, *Mathcad* datorprogrammā realizēts uztvertā radiosignāla jaudas P_r skaitliskais aprēķins. Uztvertā signāla jauda ir noteikta kā funkcija $P_r(r)$ (3.19. att.) no attāluma starp raidītāju (*BTS*) un uztvērēju (MS) *downlink* režīmā pie šādiem parametriem:

- uzdotā *BTS* raidītāja izejas jauda: $P_t = 50$ W (47 dBm);
- darba diapazona frekvence: $f = 900$ MHz ($\lambda = 0,33$ m);
- *BTS* un MS antenu pastiprinājuma koeficienti: $G_t = 10$, $G_r = 1$.

Aprēķinos tika ņemti vērā apkārtējās vides nosacījumi un ierobežojumi, kas ir specifiski katra matemātiska modeļa gadījumā (2.20. tab.).



3.19. att. Radiosignāla jaudas uztveršanas punktā P_r (dBm) kā funkcijas no attāluma starp *BTS* un *MS* (*downlink* režīmā) 9 matemātisko modeļu salīdzinājums.

Tabulā ir apkopotas aprēķināto maksimālo šūnu rādus vērtības konkrētajiem radioviļņu izplatīšanās matemātiskiem modeļiem atkarība no uzdotā *MS* uztvērēja jutības lieluma $P_{r\ min} = [-81; -100]$ dBm.

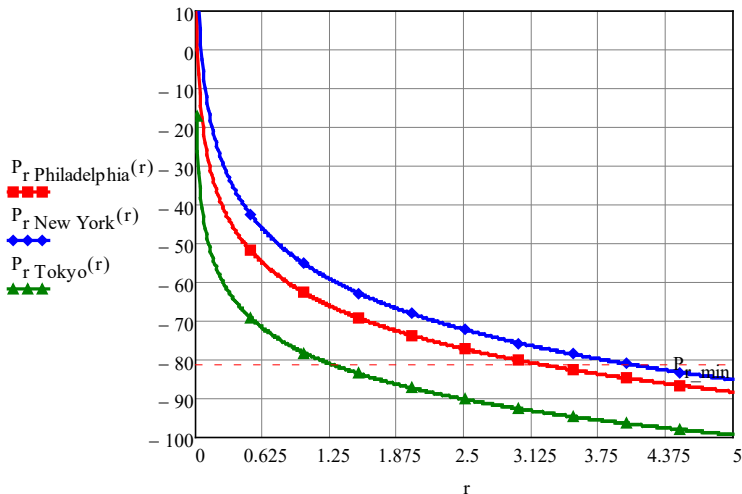
3.6. tabula

Maksimālais šūnas rādus R_{max} pie uzdotajiem *MS* uztvērēja jutības parametriem

Matemātiskais modelis	R_{max} , km ja $P_{r\ min} = -81$ dBm	R_{max} , km ja $P_{r\ min} = -100$ dBm
Vienstaru	210,253	1873,883
Divstaru	19,911	59,452
Daudzstaru	3,536	15,202
<i>Lee</i>	2,818	11,827
<i>Okumura</i>	2,077	9,141
<i>Okumura–Hata</i>	1,255	4,584
<i>COST 231–Hata</i>	1,026	3,748
<i>Walfisch–Ikegami</i>	1,253	3,962
<i>Hata–Davidson</i>	3,794	13,858

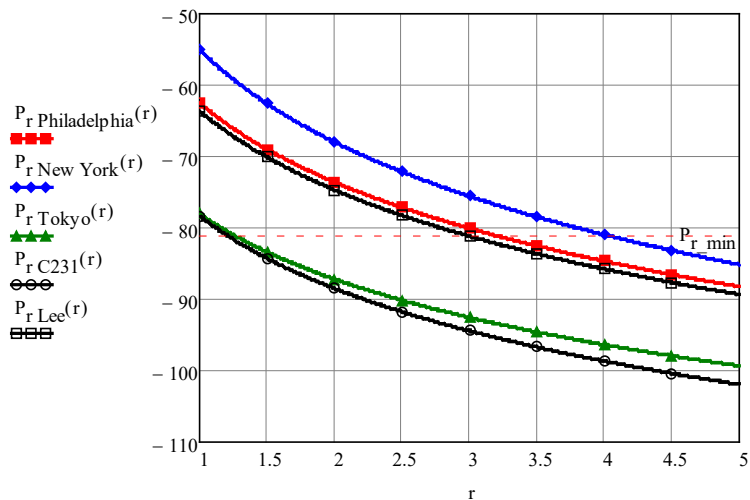
Kā izriet no grafika (3.19. att.), palielinoties attālumam starp *BTS* raidītāju un *MS* uztvērēju, signāla jauda tā uztveršanas punktā samazinās saskaņā ar radioviļņu izplatīšanās nosacījumiem. Piemēram, attālumā $r = 3$ km uztvertā signāla jauda tiešredzamības režīmā *LOS* būs

$P_r = -44$ dBm, taču blīvās apbūves nosacījumos (*Walfisch-Ikegami* modelis) jauda šajā attālumā $P_r = -95$ dBm. Atkarībā no MS uztvērēja jutības līmeņa, stabilie radiosakari var tikt traucēti, ja jutība tiks samazināta līdz $P_{r\ min} = -93$ dBm. Šādā gadījumā signāls no *BTS*, kas izplatās pēc *Walfisch-Ikegami* modeļa, norādītajā attālumā jau netiks pieņemts ar MS uztvērēju.



3.20. att. Radiosignāla jaudas uztveršanās punktā P_r (dBm) atkarība no attāluma r (km) starp *BTS* un MS norādītajās pilsētās.

Modeļu (3.19. att.) salīdzināšanai tika apskatītas radiosignālu izplatīšanās eksperimentāli iegūtās atkarības (3.20. att.) Filadelfijas, Ņujorkas un Tokio [40], kas ir pilsētas ar diezgan blīvu apbūvi.



3.21. att. Signāla jaudas uztveršanas punktā salīdzinājums eksperimentālā un aprēķinātām vērtībām.

No grafika (3.21. att.) izriet, ka $P_r(r)$ atkarība Filadelfijas pilsētai ir aptuveni aprakstīta ar *Lee* modeli, savikārt Tokijā tā ir līdzīga *COST 231-Hata* modelim. Atšķirības līknēs ir skaidrojamas ar uzdevumu parametru izvēli: *BTS* un *MS* antenu pacelšanas augstumu, antenu pastiprinājumu koeficientu, ēku vidējo augstumu utt.

Lai inženiertehniski novērtētu jaudas funkcijas vidējo vērtību uztveršanas punktā $P_r(r)$ lejupsaītes režīmā, pirmajā aproksimācijā var izmantot vienkāršotu daudzstaru radioviļņu izplatīšanās modeļa formulu:

$$P_r = P_{r,LOS} - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right), \text{ dBm} \quad (3.1.)$$

kur $P_{r,LOS}$ – signāla jauda *MS* uztveršanas punktā tiešredzamības nosacījumos, dBm;

n – rimšanas koeficients, kurš apraksta izplatīšanās vides īpatnības;

r_0 – normējošais attālums, $r_0 = 1$ km.

Piemēram, ja $P_{r,LOS} = -60$ dBm attālumā $r = 1$ km no bāzes stacijas, bet attālumā $r = 3$ km signāla jaudas vērtība uztveršanas punktā ir $P_r = -75$ dBm, tad eksperimentālo atkarību Ņujorkai var tuvināti izteikt pēc formulas (3.1.), ja rimšanas koeficients ir $n = (-75 + 60) / (-10 \cdot 0,48) = 3,125$.

3.6.3. MST radiopārklājuma eksperimentālie mērījumi

Mobilo sakaru operatoru sniegto sakaru pakalpojumu augstas kvalitātes garantēšanai ir nepieciešams pastāvīgi mērīt un uzraudzīt vairākus MST parametrus saskaņā ar standartos norādītajām prasībām [1], [2].

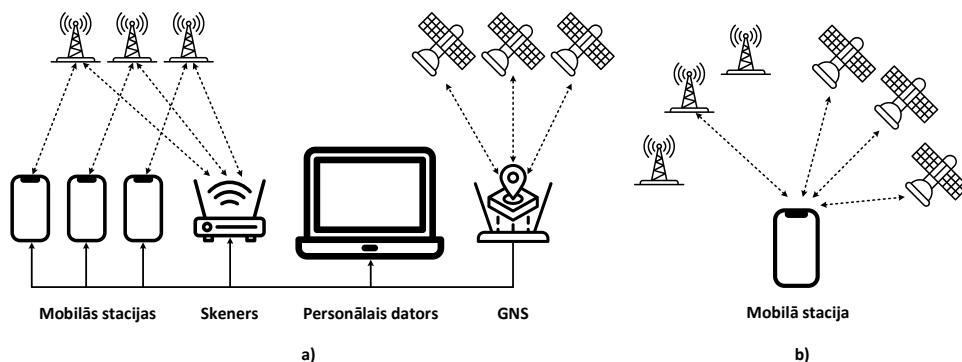
Mobilo sakaru tīklu stāvokļa monitorings ļauj laikus identificēt MST problemātiskās vietas, kā arī novērst iespējamās kļūmes, pirms tās ir radušās. MST monitoringa nozīmīguma ignorēšana dažkārt izraisa katastrofālas sekas, pat tīkla posma izslēgšanu no ekspluatācijas, kas dzelzceļa transporta telemātikas sistēmās nav pieļaujams.

Mobilā tīkla parametru mērīšanai ir nepieciešamas specializētas iekārtas, kas spēj uztvert un apstrādāt radio signālus. MST ir divas galvenās mērīšanas metodes: pasīvā un aktīvā. Pasīvos mērījumus veic, izmantojot skenēšanas uztvērēju (skeneri), kam nav nepieciešams aktīvs savienojums ar pakalpojumu sniedzēju. Aktīvos mērījumus veic, izmantojot mobilo iekārtu (*user equipment, UE*), un testēšanas laikā savienojumam ar mobilo sakaru operatoru obligāti ir jābūt aktīvam.

Braukšanas testu (*drive test*), kas ir MST radiopārklājuma, kapacitātes, *QoS* un darbības pamatrādītāju (*KPI*) mērīšanas process, var veikt, vienlaikus izmantojot aktīvās un pasīvās mērīšanas metodes. Tradicionālā braukšanas testa konfigurācija ietver (3.22. att.):

- radio mēriekārtas:
 - skenēšanas uztvērējs (*Rohde & Schwarz, PCTEL, CelPlan* u. c.),
 - mobilās iekārtas (ierīce ar *Qualcomm, HiSilicon, Exynos, MediaTek* mikroshēmojumu un *TEMS Pocket, Accuver XCAL-Mobile, Qtrun NSG* u. c. programmnodrošinājumu),
- personālais dators ar mērījumu programmatūru (*TEMS Investigation, Accuver XCAL, Huawei Genex Probe, Qtrun AirScreen* u. c.),

- GNS uztvērējs (*GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo* u. c.).

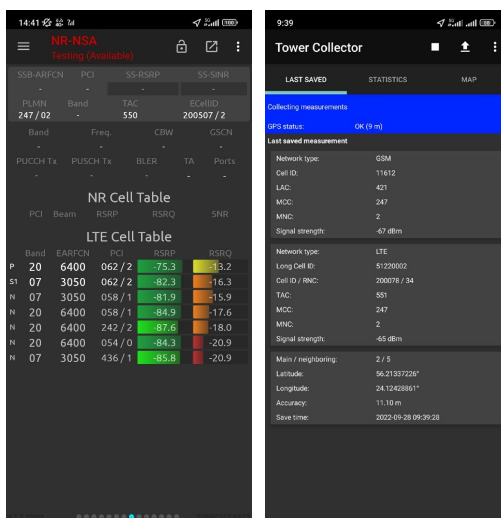


3.22. att. MST parametru mērīšanas metodes:
a) aktīvā; b) pasīvā.

MST parametru mērījumu veikšanas un apstrādes metodoloģija

Eksperimentālo pētījumu veikšanai [22], [25] tika izvēlēta aktīvā mērījumu metode, pateicoties šī paņēmiena pieejamībai un minimālas nepieciešamas aparatūras skaita dēļ.

Mērīšanas komplektā bija divi viedtālruņi ar Qualcomm mikroshēmojumiem, kas strādā *Android* operētājsistēmas vadībā (*Samsung M23*, kas aprīkots ar *Snapdragon SM7225*, un *Xiaomi Poco F4 GT*, kas aprīkots ar *Snapdragon SM8450*) un *Android* lietojumprogrammām tīkla testēšanai, kas bija instalētas minētajos tālruņos (*Network Signal Guru*, *Tower Collector*).



3.23. att. *Android* aplikāciju *Network Signal Guru* (pa kresi) un *Tower Collector* (pa labi) lietotāja saskarne.

Lai novērstu iespējamās problēmas, kas varētu rasties, darbojoties ar divām *SIM* kartēm, viedtālruņi tika iestatīti tā, lai izmantotu tikai vienu *SIM* karti. Abās iekārtās vienlaikus tika

uzstādītas viena un tā paša mobilo sakaru operatora *SIM* karte. Mērījumus veiktšanai dzelzceļa tuvumā, MS tika nostiprinātas mugursomā vertikālā stāvoklī tā, lai uz testētāja muguras tās atrastos 1 m augstumā no zemes.

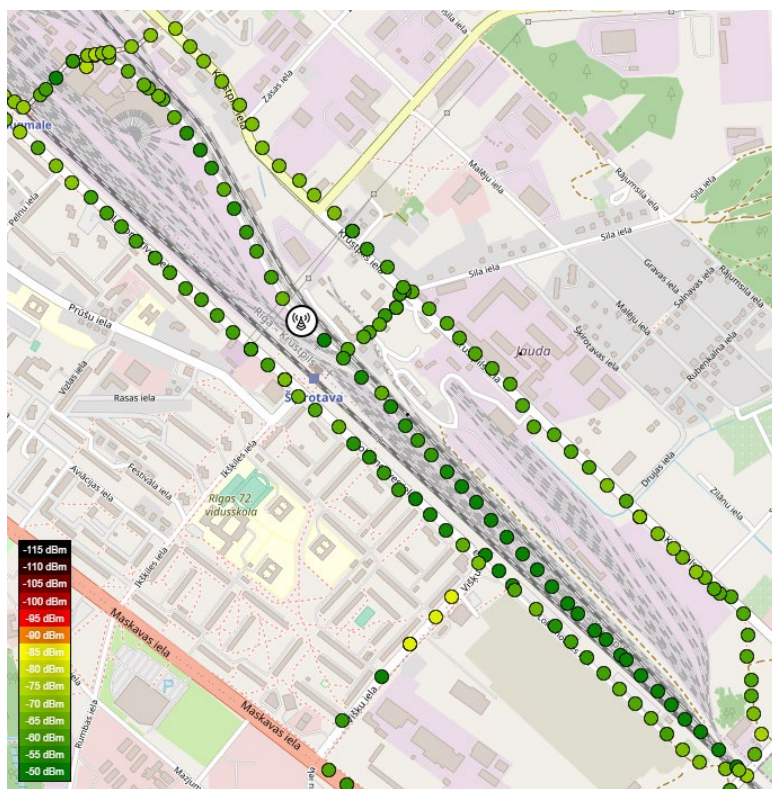
Android lietojumprogrammas [28] tika nokonfigurētas tā, lai visi mērījumu dati tiktu saglabāti žurnāla (*log*) failos vēlākai analīzei. Žurnālu failu dati tika apvienoti, konvertēti *CSV* formātā un apstrādāti, izmantojot *Python* skriptu. Skripts samazināja datu punktu skaitu, vidēji aprēķinot mērījumus vieniem un tiem pašiem mobilo sakaru torņiem vienā un tajā pašā atrašanās vietā, cenšoties izlīdzināt kļūdas, kas radušās nejaušo faktoru un MS mērījumu kļūdu dēļ.

Iegūtais žurnāla fails tika izmantots datu attēlošanai un parametru MST galīgajai analīzei, lietojot izstrādāto tīmekļa lietojumprogrammu (*HTML* un *JavaScript*).

MST radiopārklājuma mērījumu rezultāti

Mobilo sakaru pakalpojumus VAS “Latvijas dzelzceļš” koncerna darbiniekiem nodrošina sakaru operators *Tele2*, kura 2G mobilais tīkls tika izvēlēts radiopārklājuma eksperimentāliem pētījumiem. Mērījumi tika veikti Rīgā, Šķīrotavas dzelzceļa stacijas pieņemšanas un nosūtīšanas parkos.

Mobilās stacijas uztvertā radiosignāla jaudas mērījumu rezultāti ir parādīti kartē (3.24. att.).



3.24. att. *Tele2* 2G MST radiopārklājuma mērījumi Šķīrotavas stacijā.

Katrs kartētais aplis atbilst vienam mērījumam konkrētajā ģeogrāfiskajā lokācijā, apļa krāsa apzīmē signāla jaudu decibelos uz millivatu (dBm). Krāsu atšifrējums dots attēla apakšējā kreisajā stūrī.

Pārskatot mērījumu rezultātus, tika noteiktas *Tele2* 2G bāzes stacijas, kas nodrošina mobilos sakarus Šķirotavas stacijas teritorijā, un to aptuvenās atrašanās vietas (pēc triangulācijas principa). Vienai *BTS* (*MCC* 247, *MNC* 2, *LAC* 421, *ID* 820–822) Šķirotavas stacijas ēkas tuvumā (3.25. att.) tika atrasta konkrētā uzstādīšanas vieta (56,90580, 24,21051).



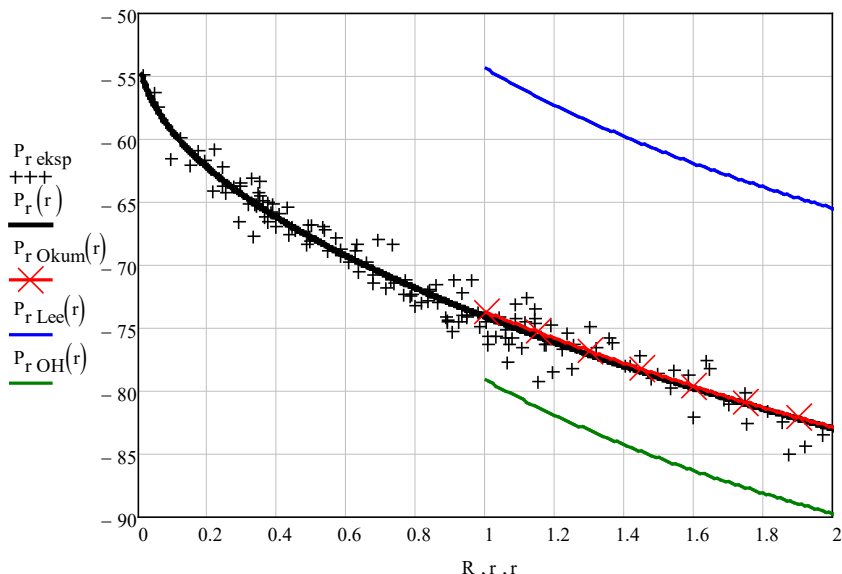
3.25. att. *Tele2* 2G MST bāzes stacija, izmantotā uztvertā signāla jaudas mērījumiem.

Balstoties veiktajos MST mērījumos norādītajai *BTS* un zinot MS ģeogrāfiskās koordinātes katrā mērījuma punktā, eksperimentāli iegūtie dati tika attēloti punktu veidā grafikā (3.26. att., $P_{r\text{eksp}}$), kur uz vertikālās ass tika atliktas signāla jaudas vērtības, uz horizontālās ass – attālums starp *BTS* un MS mērījumu vietās.

Analizējot iegūto grafiku, tika konstatēts, ka signāla jaudas vērtības svārstās nelielā diapazonā, kas var secināt par radiosignālu izplatīšanos daudzviļņu režīmā *NLOS* nosacījumos. Lai iegūtu tuvinātu signāla jaudas izmaiņu līkni, tika izmantota līknes piemeklēšanas (*curve fitting*) metode, kā rezultātā tika iegūta uztvertā signāla jaudas atkarības no attāluma funkcija $P_r(r)$.

Iegūtā signālu jaudas izmaiņu likumsakarība mobilās stacijas uztveršanas punktā tika salīdzināta ar *Okumura*, *Lee*, *Okumura–Hata* radioviļņu izplatīšanās matemātiskajiem modeļiem, kuriem, izmantojot 3.6.1. apakšnodaļā apskatīto algoritmu un *Mathcad* programmu, tika konstruētas jaudas izmaiņu līknes pie šādiem parametriem:

- uzdotā *BTS* raidītāja izejas jauda: $P_t = 40$ W (46 dBm);
- darba diapazona frekvence: $f = 900$ MHz ($\lambda = 0,33$ m);
- *BTS* un MS antenu pastiprinājuma koeficienti: $G_t = 10$, $G_r = 1$;
- *BTS* un MS antenu pacelšanas augstums: $h_t = 30$ m, $h_r = 1$ m;
- signālu izplatīšanās vide – pilsēta.



3.26. att. Eksperimentāli iegūtā MS uzvērtās jaudas līkne $P_r(r)$, salīdzinājumā ar radioviļņu izplatīšanās matemātiskiem modeļiem (*Okumura, Lee, Okumura-Hata*).

Kā ir redzams 3.26. attēlā, *Okumura* modeļa līkne ($P_r Okum(r)$) ir gandrīz identiska eksperimenta rezultātā iegūtajiem datiem posmā $r = [1; 2]$ km.

Nepieciešams minēt, ka *Okumura*, kā arī vairākiem citiem matemātiskajiem modeļiem ir definēts ierobežojums: minimālais pieļaujamais attālums starp *BTS* un *MS* ir 1 km. Tieši tāpēc posmā $r = (0; 1)$ km *Okumura, Lee* u. c. modeļu aprēķini nav attēloti grafiski.

3.7. Heterogēna tīkla simulācijas modeļi

3.7.1. Ievads

Informācijas tehnoloģiju straujā attīstība sekmē dzelzceļa transporta telemātikas sistēmu heterogēnu sakaru tīklu modernizāciju, prasa to pastāvīgu uzraudzību un pilnveidošanu. Pēdējos gados plaši tiek pielietotas optisku un bezvadu tīklu tehnoloģijas, kurās izmanto modernās ciparu informācijas apstrādes un analoģu signālu pārraides metodes. Turklāt tiek realizēta ne tikai datu un balss, bet arī tālkontroles un tālvadības signālu pārraide.

Heterogēnu tīklu primāras projektēšanas posmā parasti rodas nepieciešamība pēc tīklu modeļiem ar modernām, perspektīvām tehnoloģijām. Šajā sakarā tika noformulēts uzdevums eksperimentāla heterogēna tīkla modeļa izveidei ar šādām prasībām:

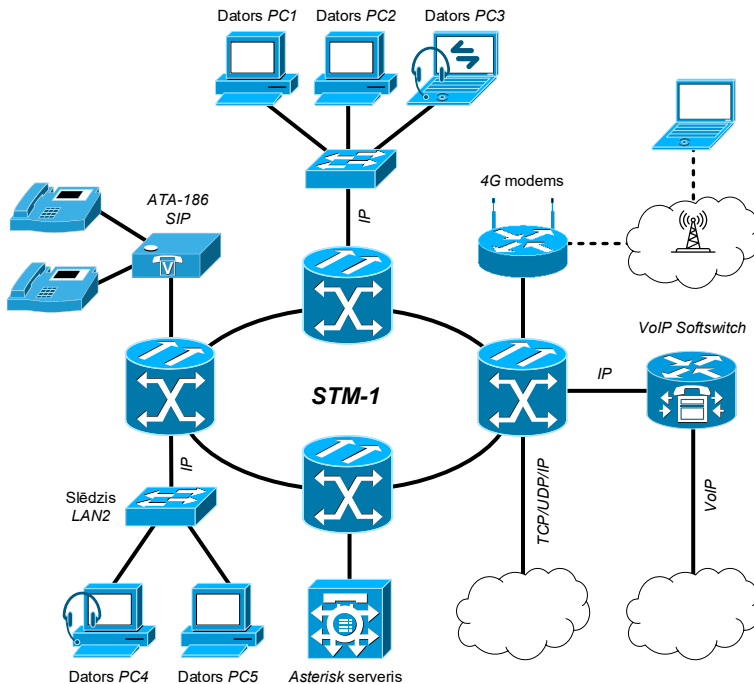
- tīkla ribas: šķiedru optikas un simetriskās kabeļu sakaru līnijas;
- tīkla mezgli: elektriskie un optiskie multipleksori, komutatori, modemi;
- tīkla galiekārtas: ciparu telefona aparāti, personālie datori, mobilās ierīces;
- informācijas tehnoloģijas: *SDH, TCP/IP, VoIP*.

3.7.2. Heterogēnā tīkla uzbūve

Organizētais heterogēnais tīkls (3.27. att.) [29], [34] pēc konstrukcijas ir maksimāli līdzīgs reāliem tīkliem, ko savā infrastruktūrā izmanto Latvijas vadošie uzņēmumi: VAS “Latvijas dzelzceļš”, LMT, *Tele2*, *Tet* u. c.

Uzbūvētā heterogēna pamattīkla (3.29. att.) elementi [30], [34]:

- tīkla ribas: vienmodu šķiedru optikas kabeļi ($\lambda = 1310$ nm, $\alpha = 0,22$ dB/km), vara koaksiālie kabeļi ($Z_v = 70 \Omega$), vara simetriskie kabeļi ($Z_v = 120 \Omega$);
- tīkla mezgli: optiskie multiplexori *SURPASS hiT 7020*, komutatori *ALOE Systems MVTS Softswitch* un *Digium Asterisk Softswitch*, maršrutētājs *HUAWEI B535-232* ar iebūvētu 4G modemu;
- tīkla galiekārtas: analogu telefonu adapteris *Cisco ATA 186*, VoIP programmatelofoni *Zoiper* un *CounterPath X-Lite*, personālie datori tīkla monitoringam un kontrolei ar programmnodrošinājumu *TNMS-M SURPASS hiT 7020 3.2.2 LCT*, ciparu analizators *Wandel & Goltermann ANT-20E*, reflektometrs *IRK-PRO Gamma*, optiskais reflektometrs *EXFO AXS-100*;
- tīkla saskarnes: LC savienotāji optisko multiplexoru *SFP* moduļu savienojumam, FC savienotāji savienojumam ar analizatoru un testeru, BNC savienotāji koaksiāliem kabeļiem, 8P8C un 6P6C savienotāji vītā pāra kabeļiem.



3.27. att. Heterogēnā tīkla shēma.

STM-1 tīklam ir dubultā gredzena topoloģija, katrs *SURPASS hiT 7020* multiplexors ir savienots ar diviem blakus esošajiem multiplexoriem. Multiplexoros ir instalēti optiskie raidzuvēvēji (3.28. att.) – *STM-1 SFP* moduļi *Fiberxon FTM-3101C-L15-A* ar *LC* savienotāju.



3.28. att. Optiskais multiplexors ar instalētiem *SFP* moduļiem.

Fiberxon FTM-3101C-L15-A vienmodu *SFP* moduļa parametri ir apkopoti 3.7. tabulā. Uzbūvētā heterogēnā tīkla kopskats ir parādīts 3.29. attēlā.

3.7. tabula

FTM-3101C-L15-A SFP moduļa parametri

Parametrs	Parametra vērtība	Mērvienība
Darba viļņa garums	1310	nm
Pārraides līnijas garums	15	km
Starojuma avota spektra platums	< 4	nm
Raidītāja jauda	-15(-8)	dBm
Uztvērēja jutība	-34	dBm



3.29. att. Heterogēnais telekomunikāciju tīkls Transporta institūtā laboratorijā.

3.7.3. Heterogēnā tīkla darbības princips

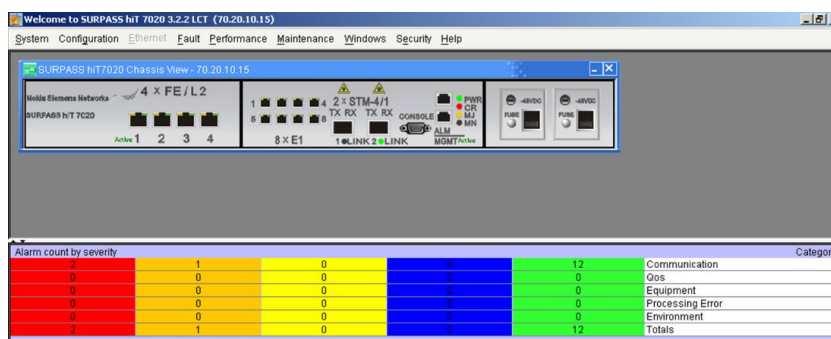
VoIP (Voice-over-IP) tehnoloģijas nodrošināšanai kalpo *Asterisk* un *MVTS* serveri. *VoIP* ir balss sakaru ciparu sistēma, kas spēj pārraidīt skaņas informāciju bez ievērojamiem zudumiem un ir balstīta IP pakešu komutācijas principā.

Balss signālu pārraide notiek no *VoIP* telefona caur *STM-1* tīklu, kur trafiks nonāk *Asterisk* Softswitch serverī. *Asterisk* ir telefona centrāles programmatūra ar atvērto pirmkodu. Tā atbalsta visas standarta automātiskās telefona centrāles iespējas un uztur lielu *VoIP* protokolu skaitu. *Asterisk* izpilda telefona centrāles pamatfunkcijas un, izmantojot *SDH* tīklu, nosūta izsaukumu *MVTS Softswitch* serverim, kurā notiek maršrutizācija un zvana pārraide publiskajā komutējamajā telefonu tīklā (*PSTN*).

Datu pārraide no personāla datora notiek, izmantojot lokālo un *STM-1* tīklu, kur trafiks nonāk globālajā internetā ar maršrutētāja palīdzību. Datori ir apvienoti lokālajos tīklos un pieslēgti tīklam caur *Ethernet* saskarni.

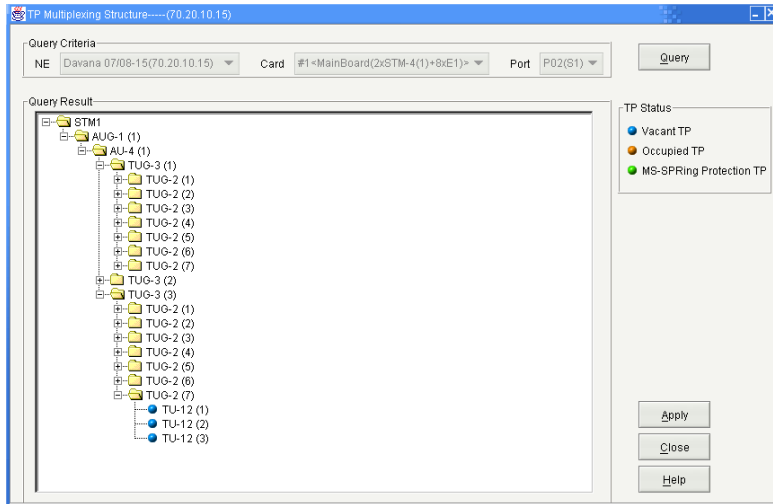
3.7.4. Heterogēnā tīkla monitoringa un mērījumu metodes

SURPASS hiT 7020 optisko multipleksoru iestatīšanai un tīkla pārraudzīšanai tika izmantota ražotāja programmatūra *TNMS-M SURPASS hiT 7020 3.2.2 LCT* (3.30. att.). Lai pieslēgtos vienai no *SURPASS* ierīcēm, ir nepieciešams savienot personālo datoru, kurā ir uzstādīta ražotāja programmatūra, ar ierīces pārvaldības (*management*) saskarni, izmantojot 8P8C slēgkautu. Kopš visi multipleksori ir apvienoti vienā *STM-1* tīklā, no jebkura mezgla var pieslēgties visiem multipleksoriem.



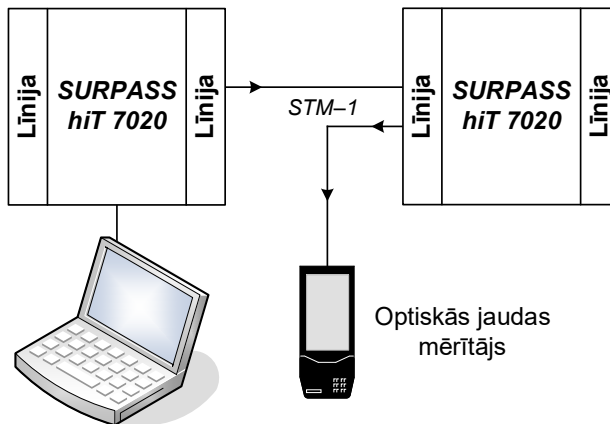
3.30. att. *SURPASS hiT 7020* vadības panelis.

TNMS-M SURPASS hiT 7020 3.2.2 LCT programmatūra pilnā mērā sniedz informāciju par datu multipleksēšanu (un demultipleksēšanu) virtuālajos konteineros (*VC-4*, *VC-12* u. c.), kad informācija tiek pārraidīta no personāla datora caur *STM-1* tīklu. Tīkla multipleksēšanas režīma piemērs ir redzams 3.31. attēlā.



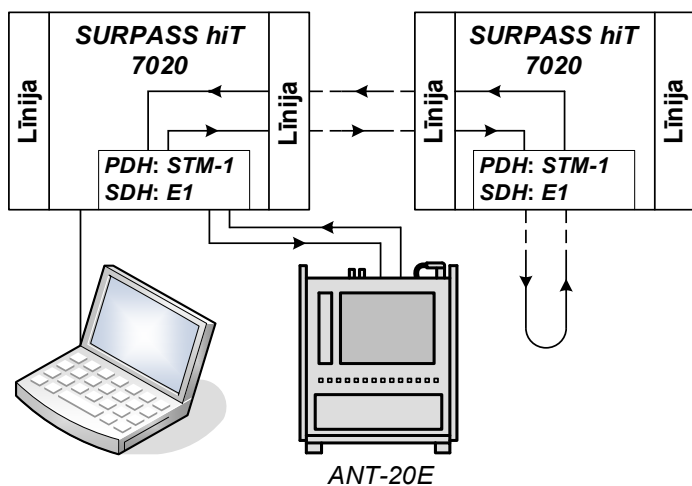
3.31. att. STM-1 multipleksēšanas virkne.

Optiskā raidītāja jaudas līmenis nosaka kabeļa līnijas, kas savieno tīkla mezglus, maksimālo garumu. Šim parametram ir diezgan liela nozīme, un to var izmērīt, izmantojot optiskās jaudas mērītāju (3.32. att.).



3.32. att. Optiskās jaudas mērīšanas shēma.

Tīkla kopējās darbības noteikšanai tika izmantots tīkla testeris – *Wandel & Goltermann ANT-20E* analizators. Šāda tipa mērinstrumenti ļauj ģenerēt un analizēt trafiku, apskatīt *PDH* un *SDH* freimu struktūru un saturu, mērīt zudumus, dispersiju un signāla aizkavi pārraides līnijā. Analizatora pieslēgšanas shēma redzama 3.33. attēlā.



3.33. PDH/SDH analizatora pieslēgšanas shēma.

3.7.5. Heterogēnā tīkla darbības scenāriju izpēte

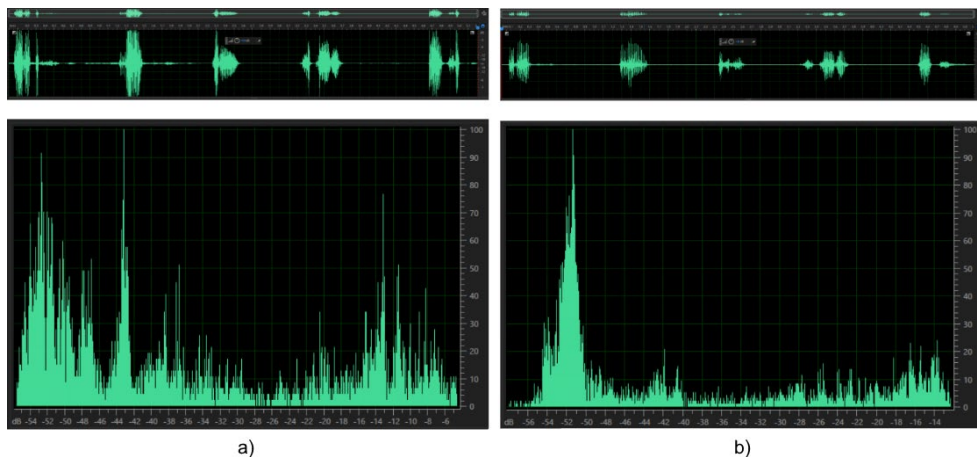
Heterogēnā tīkla modelim aprakstīti un īstenoti divi darbības scenāriji: runas signālu pārraide un datu pārraide [34].

Runas signālu cauriešanas analīzei tika izmantota daļa no heterogēnā tīkla aparatūras (3.27. att.). Balss signālu pārraide tika veikta ar *VoIP* telefoniem, izmantojot *STM-1* tīklu, apstrādāta un maršrutēta *Asterisk* Softswitch serverī, pie tam savienojums var tikt realizēts šādo maršrutos:

- 1) *VoIP* Softphone (*PC3*) → *LAN1* → *MUX1* → *MUX4* → *LAN2* → *VoIP* Softphone (*PC4*);
- 2) *PH1* → *ATA-186 SIP* → *MUX4* → *MUX3* → *Asterisk* Softswitch → *MUX3* → *MUX2* → *VoIP* Softswitch → *PSTN*;
- 3) *PH1* → *ATA-186 SIP* → *MUX4* → *MUX3* → *Asterisk* Softswitch → *MUX3* → *MUX2* → 4G modems → *MST*.

VoIP zvanu saņemšanas datoros tika izmantots *VoIP SIP* programmatēlons (*softphone*) *Zoiper*. Šī programmatūra nodrošina balss signāla analogo pārveidošanu ciparu signālā, kodēšanu ar kompresiju izmantojot *iLBC30*, *GSM*, *G.729*, *G.711 u-law* kodekus) un pakešu pārraidi tīklā. Balss signāla spektrālās analīzes veikšanai tika izmantota *Adobe Audition* programmatūra.

Pirmajā maršrutā analogā signāla pārraide sākas no mikrofona, caur kuru tas tiek padots uz datora *PC3* audioieeju. Datorā īstenojas vairāki procesi: analogā signāla diskretizācija, kodēšana un kompresija, izmantojot *G.711*, *ilbc*, *GSM*, *G.729* kodekus, un tā spektrālā analīze. Tālāk signāls tiek pārraidīts uz *PBX Asterisk*, izmantojot *STM-1* primāro tīklu, un pēc komutācijas *PBX* serverī tiek nosūtīts uz citu *Zoiper VoIP* programmatēlonu. Pēc ciparu-analogu pārveidošanas, analogais izejas signāls tika padots uz telefona klausuli un datora *PC4* audioieeju, kur realizējās izejas balss signāla spektrālā analīze. Izejas balss signāla spektrs pēc trakta *PC3-LAN1-MUX1-MUX4-LAN2-PC4* cauriešanas redzams 3.34. attēlā.



3.34. att. Balss testa signāla spektrs: a) ieejā; b) izejā.

Kā ir redzams grafikos (3.34. att.), runas testa signāla pārraides rezultātā izejas signāla amplitūda samazinājās un ievērojami pārveidojās tā spektrālais sastāvs. Tas ir saistīts ar runas signālu dubulto analogciparu un ciparanalogu pārveidošanos, kā arī ar sakaru kanāla ierobežotu joslas platumu.

Datu pārraides analīzei tika īstenota lokālā LANI tīkla datoru *PCI-PC3* pieslēgšanās mobilā operatora sakaru tīklam, izmantojot *STM-1* multiplexorus un 4G radio modemu maršrutā: *PCI/PC2/PC3* → *LANI* → *MUX1* → *MUX2* → 4G modems → MST.

Testu realizēšanai, datorā *PCI LANI* tīklā tika ģenerēts testa ciparu signāls, kas tika saņemts datorā *PC4 LAN2* tīklā. Visi testa dati pārraidei *STM-1* tīklā tika pakļauti standarta multipleksēšanai, strukturēšanai virtuālos konteineros un demultipleksēšanai. Pārraides ātrums *LAN1* un *LAN2* tīklos, kā arī to slēdžu saskarnēs ir 100 Mbit/s, *STM-1* tīklā – 155 Mbit/s.

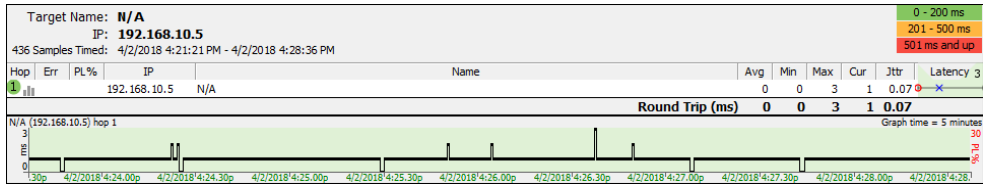
Datorā *PC2 LANI* tīklā tika instalēts *TNMS-M SURPASS hiT7020 3.2.2 LCT* programmnodrošinājums, ar kura palīdzību tika pārraudzīta datu pārraide *STM-1* tīklā, savukārt plūsmas optiskajos kanālos tika kontrolētas, izmantojot *Wandel & Goltermann ANT-20E* analizatoru. *PingPlotter* programmatūra tika izmantota testa datu pārraides laika aizkaves mērījumiem.

Datu pārraidei testēšanai tika definēti divi eksperimenti, kuru rezultāti parādīti 3.35., 3.36. un 3.37. attēlos.

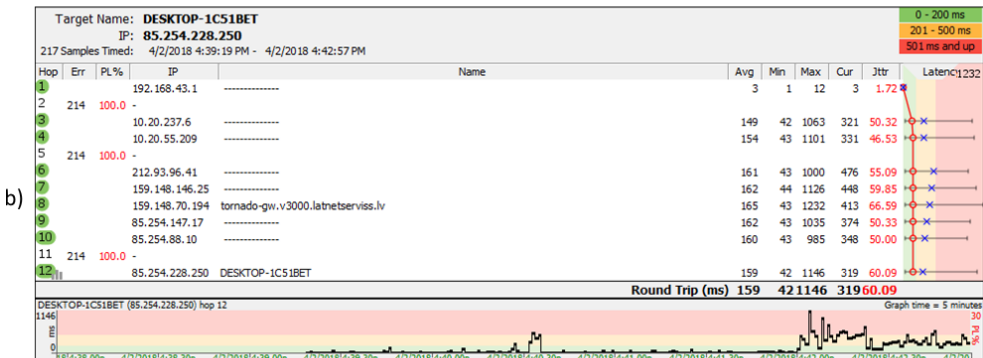
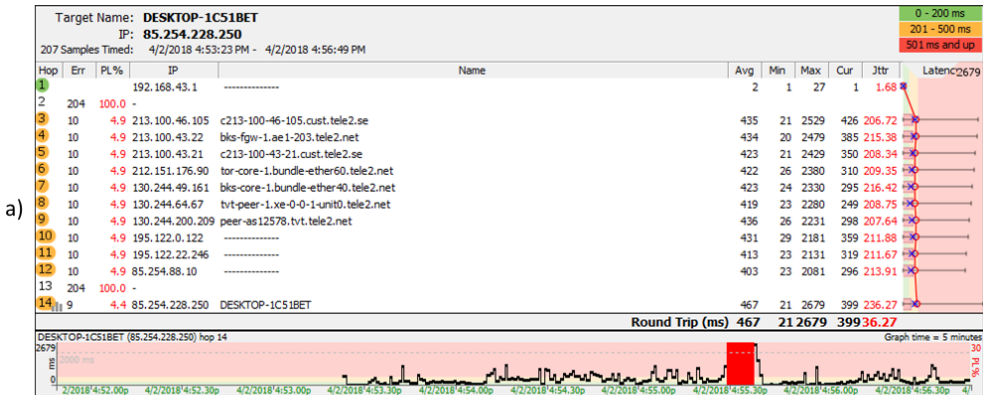
Pirmā eksperimenta mērķis ir pārraidīt multimediju testa informāciju heterogēnā tīklā, izmantojot *STM-1* vidi, no datora *PCI* uz datoru *PC5*.

Otrā eksperimenta mērķis ir pārraidīt augstas izšķirtspējas testa video plūsmu *H.264/AVC* formātā no mediju servera (dators *PCI*), izmantojot heterogēnu pamattīklu (3.27. att.), uz attālināto mediju klientu (datoru *PC6*) caur 3G/4G mobilo sakaru tīklu.

Laika aizkaves mērījumu rezultāti pirmajam eksperimentam ir redzami 3.35. attēlā. Signāla pārraides laikā no testa avota *PCI* uz uztvērēju *PC5* (3.35. att.) maksimālā aizture (*max*) bija 3 ms, vidējā aizture (*cur*) – 1 ms un trīce (*jtrr*) – 0,07 ms, kas ir tuvu ideāliem pārraides apstākļiem.



3.35. att. Datu pārraides laika aizkaves mērījumu rezultāti pirmajam eksperimentam.

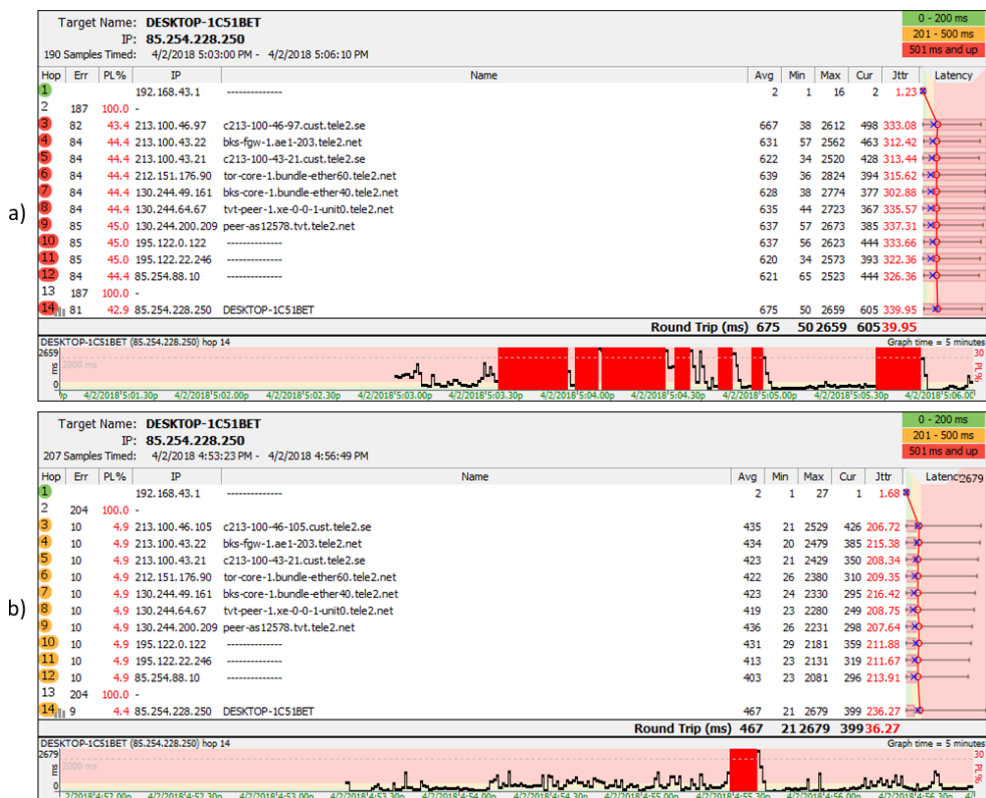


3.36. att. Datu pārraides laika aizkaves mērījumu rezultāti otrajam eksperimentam LMT MST savienojumiem: a) 2G (EDGE); b) 3G (HSPA); c) 4G (LTE-A);

Laika aizkaves mērijumu rezultāti, kad testa signāls tiek raidīts no mediju servera (raidītāja) uz mediju klientu (uztvērēju), ir redzami 3.36., 3.37. attēlos. Maksimālā aizture (*max*) svārstās no 402 ms (3.36. c att.) līdz 2800 ms (3.36. a att.). Vidējā aiztures vērtība (*cur*) ir no 2 ms (3.36. c att.) līdz 444 ms (3.37. b att.), trīces vērtība – no 8,23 ms (3.36. c att.) līdz 340 ms (3.37. b att.).

Otrā eksperimenta rezultāti rāda, ka, pārraidot testa datus caur MST un izmantojot 2G savienojumu, pat pie pietiekami vāja bāzes stacijas signāla uztveršanas līmeņa, kā arī ja attālinātais dators (mediju klients) atrodas vairāku kilometru attālumā no bāzes stacijas, vēl joprojām ir iespējams pārraidīt un uztvert video plūsmas un audio testa signālus augstas izšķirtspējas formātā (*H.264/AVC*). Šajā gadījumā, lai uztvertais video un audio testa materiāls nezaudētu kvalitāti, sākotnējai buferizēšanai parasti nepieciešams atvēlēt ilgu laiku – aptuveni 60–70 sekundes.

PingPlotter mērijumu programma rāda, ka ir *IP* pakešu zudumi 2G savienojumiem (*EDGE*) LMT (3.36. a att.) un *Tele2* (3.37. a att.) mobilajos tīklos veido aptuveni 35–45 %. Šajā eksperimentā trīce liecina par lielu paketes tranzīta laika izkliedi (līdz 400 ms). Jāatzīmē, ka eksperimentu rezultāti bija paredzami, jo tie ir saistīti ar MST 2G radiokanāla šauru frekvenču joslas platumu.



3.37. att. Datu pārraides laika aizkaves mērijumu rezultāti otrajam eksperimentam *Tele2* MST savienojumiem: a) 2G (*EDGE*); b) 3G (*UMTS*).

Līdzīgi eksperimenti tika veikti, pārraidot multimediju testa datus publisko operatoru LMT, *Tele2* 3G un 4G mobilo sakaru tīklos (3.36. b, 3.36. c, 3.37. b att.). Tika iegūti šādi rezultāti:

- pārraidot augstas izšķirtspējas video formātu (*H.264/AVC*) reālajā laikā, plūsmas sākotnējās buferizēšanas aiztures laiks, salīdzinot ar 2G MST, samazinās un veido 2–3 sekundes);
- video un audio testu plūsmas tiek pārraidītas praktiski bez kvalitātes zudumiem;
- novērota trīce abu operatoru testēšanas rezultātā: LMT tīklā trīce nepārsniedza 60 ms, kas ir pieņemami multimediju informācijas pārraidei, savukārt *Tele2* tīklā trīce sasniedza 200 ms, kas praksē var izraisīt kļūmes, it sevišķi tādos protokolos, kā, piemēram, *VoIP*.

3.7.6. Rezultāti

Galvenās pētāmā heterogēnā tīkla priekšrocības var formulēt šādi:

- *PDH*, *SDH* multipleksēšanas tehnoloģijas pārredzama implementācija;
- viegla piekļuve dažādiem signāliem, datu paketēm, plūsmām, veicot multipleksēšanu ar augstu datu pārraides ātrumu *PDH*, *SDH* standartos;
- elastīga piekļuve heterogēnā tīkla elementiem, jo tiek izmantotas standarta saskarnes, kas atbalsta visus mūsdienu datu un multimedijas protokolus. Iespēja paplašināt tīklu, mainot optisko multipleksatoru mezglu skaitu vai pārveidojot topoloģiju;
- veiktspējas monitorings tiek veikts saskaņā ar *ITU-T Y.1731* standartu, izmantojot tīkla pārvaldības sistēmu (*OAM&P*). Ir nodrošināta šādu parametru kontrole: kadru zudumu koeficients, kadru aizkave, pakalpojumu līmeņa vienošanās *SLA* (*Service Level Agreements*) starp operatoru un abonentiem, vispārējās kvalitātes novērtējums *MOS* (*Mean Opinion Score*) un aprēķinātais plānošanas vērtības samazinājuma koeficients *ICPIF* (*Impairment/Calculated Planning Impairment Factor*);
- standarta saskarnes ļauj savstarpēji savienot tīkla iekārtas un pakalpojumus, lai izpētītu dažādus lietojuma scenārijus:
 - trafika plūsmu (*E1/E3*) pārraide ar komutāciju starp *PBX* un *PSTN*, izmantojot signalizācijas un datu apmaiņas protokolus (*DSS1*, *BRI*, *PRI*) vai signalizācijas sistēmas (*SS7*) optisko vai elektrisko *PCM* kanālu savienošanai;
 - ātrgaitas datplūsmas pārraide (*Fast Ethernet*) un *TCP/UDP/IP* maršrutēšanas protokolu izmantošana, lai pieslēgtu vietējos un maģistrālos datortīklus internetam;
 - esošā *STM-1* tīkla savienošana ar citiem *SDH* tīkliem teritoriālai paplašināšanai;
- savienojums ar ārējiem mobilo sakaru tīkliem caur radio modemu, izmantojot šo kanālu, piemēram, savienojumam ar fiksēto telefonu tīklu;
- *VoIP* protokola (*H.323/SIP*) izmantošana heterogēnā tīkla iekārtās, kas ļauj savienot fiksēto un mobilo telefonu tīklus, izmantojot internetu;
- eksperimentālā heterogēnā tīkla konfigurācija ir piemērota augstas izšķirtspējas multimediju datu [33], datorsistēmu ciparu informācijas, tālkontroles un tālvaldības signālu pārraidei dzelzceļa telemātikas jomā šādu funkciju īstenošanai:

- vilcienu kustības vadības sistēmu sakaru nodrošināšana;
- dzelzceļa objektu attālināta kontrole un vadība;
- videonovērošana;
- datorredze (dzelzceļa objektu un iekārtu vizuālai apsekošanai, vagonu monitoringa un izsekošanas sistēmām, ceļu satiksmes uzraudzības risinājumiem);
- vilcienu vadīšanas automatizācija un vadīšanas asistēšana (izmantojot mašīnmācības un mākslīgā intelekta (*AI*) tehnoloģijas).

Piedāvātais heterogēnais tīkls (3.29. att.) atspoguļo mūsdienu telekomunikāciju tehnoloģiju iespējas un var tikt izmantots kā simulācijas modelis dzelzceļa transporta telemātikas sistēmu izpētei [34].

SECINĀJUMI

Kabeļu sakaru līniju izmantošana, neskatoties uz bezvadu informācijas pārraides tehnoloģiju izplatīšanos, paliek nemainīgi aktuāla. Dzelzceļa telemātikā vītā pāra kabeļi tiek izmantoti signalizācijas, centralizācijas un bloķēšanas sistēmās, datoru tīklos, videonovērošanā u. c. Koaksiālie kabeļi mūsdienu sakaru tīklos gandrīz netiek lietoti, savukārt šķiedru optiskus kabeļus izmanto arvien vairāk, turklāt ne tikai maģistrālajās līnijās, bet arī galiekārtu pusē.

Mobilo sakaru tehnoloģijas transporta jomā arī kļūst arvien vairāk pieprasītas. Daudzas dzelzceļa telemātikas sistēmas daļēji vai pilnībā balstās bezvadu datu pārraidē. *ERTMS* apakšsistēmas *ETCS* otrajā un trešajā līmenī gan balss sakari, gan signalizācijas un centralizācijas dati tiek pārraidīti, izmantojot mobilo sakaru standartu dzelzceļiem *GSM-R*. Šobrīd tiek izstrādāts šī standarta aizstājējs – nākotnes dzelzceļa mobilo sakaru sistēma *FRMCS*.

Dzelzceļa telemātikas sistēmas sastāv no elementiem, kas balstās dažādās sakaru tehnoloģijās un veido heterogēnus telekomunikāciju tīklus. Šādu tīklu uzbūvei, uzturēšanai, atjaunošanai un modernizēšanai ir nepieciešamas padziļinātas zināšanas par lietojamiem standartiem, sakaru līniju projektēšanas uzdevumiem un pieejamiem rīkiem šo uzdevumu risināšanai.

Atbilstoši promocijas darba uzdevumiem, tika sasniegti pētījuma rezultāti.

1. Izskatīti kabeļu līniju matemātiskie modeļi, kas ļauj realizēt simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju parametru inženieraprēķinus.
2. Izpētīti 11 radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi, kas ir paredzēti mobilā sakaru tīkla bāzes stacijas radiosignāla jaudas aprēķināšanai mobilās stacijas uztveršanas punktā un ļauj noteikt bāzes stacijas radiopārklājuma zonas robežas.
3. Izstrādāti simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametru aprēķināšanas algoritmi.
4. Balstoties izstrādātajos aprēķinu algoritmos, īstenots simetrisko, koaksiālo, šķiedru optisko sakaru līniju un mobilo sakaru tīklu parametru skaitliskais novērtējums, izmantojot izveidotas automatizēto aprēķinu programmas *Mathcad* vidē.
5. Noteikti galvenie simetrisko un koaksiālo sakaru līniju raksturojošie parametri: garuma rimšanas un saīsinājuma koeficienti. Garuma rimšanas koeficients liecina par zudumiem līnijā un nosaka tās maksimālo teorētisko garumu. Saīsinājuma koeficients rāda, cik reizes impulsa izplatīšanās ātrums līnijā ir mazāks par gaismas ātrumu. Tā precīzu vērtību ir nepieciešams zināt, lai, piemēram, noteiktu nevienādīgumu vai bojājuma vietu kabeļu līnijā, izmantojot reflektometru.
6. Skaitlisko aprēķinu ietvaros, veikta simetrisko un koaksiālo sakaru līniju primāro un sekundāro parametru frekvenču dispersijas analīze. Aprēķinu piemērā (1. pielikums) izmantotajām simetriskajām kabelim, signāla frekvencei palielinoties 1–250 kHz diapazonā, garuma rimšanas koeficients palielinās no 4,53 dB/km līdz 7,58 dB/km, savukārt saīsinājuma koeficients samazinās no 1,407 līdz 1,375. Ja pieņem, ka maksimālais pieļaujamaais vājinājums līnijā ir 20 dB, tad, neņemot vērā zudumus

savienojumos un aparatūrā, maksimālais teorētiskais līnijas garums ir no 4,41 km līdz 2,64 km.

7. Noteikti galvenie šķiedru optisko sakaru līniju raksturojošie parametri: garuma rimšanas koeficients un kopējā dispersija. Dispersija raksturo optiskā signāla spektrālo vai modes komponentu izkliedi laika gaitā, kas ietekmē impulsu formu un platumu. Starpmodu dispersija daudzmodu kabeļos dominē citu dispersijas avotu vidū.
8. Apskatīts šķiedru optiskas sakaru līnijas maksimālā garuma noteikšanas uzdevums, dots reģenerācijas iecirkņa skaitliskā aprēķina piemērs. Piemērā (3. pielikums) izmantotajam optiskajam kabelim pie uzdotajiem līnijas parametriem 1550 nm viļņu garumā rimšanas koeficients ir 0,234 dB/km, kopējā dispersija – 15,3 ps/km, reģenerācijas iecirkņa garums – 54,53 km.
9. Izstrādāts mobilo sakaru tīklu šūnu pārklājuma zonas robežu noteikšanas algoritms, uz tā pamata realizēts šūnas maksimālā rādiusa automatizētais aprēķins *Mathcad* programmā. Atkarībā no izplatīšanās vides nosacījumiem un izmantotā matemātiskā modeļa pie uzdotajiem bāzes stacijas un mobilās stacijas parametriem, kas ir doti piemērā (4. pielikums), maksimālais bāzes stacijas radiopārklājuma rādiuss pie $P_{r\ min} = -81$ dBm svārstās 1,026–3,794 km robežās.
10. Veikta simetrisko, koaksiālo un šķiedru optisko līniju skaitliski aprēķināto un standarta parametru salīdzinošā analīze. Analīze liecina, ka ar inženieraprēķinu palīdzību noteiktās sakaru līniju parametru vērtības nepārsniedz vairāk par 5 % no simetriskā vai koaksiālā un 15 % no optiskā kabeļa standarta lielumiem.
11. Veikti šķiedru optiskās sakaru līnijas jaudas zudumu mērījumi dzelzceļa virzienā Rīga–Salaspils. Eksperimentāli iegūtie zudumu lielumi 1310 nm un 1550 nm viļņu garumos atsevišķajām maģistrālā kabeļa šķiedrām tika izteikti kā vīdējās vērtības katrā no četriem posmiem: Rīga–“A” parks, “A” parks–Dole, “A” parks–Salaspils, Dole–Salaspils. 8,726 km garā posmā Rīga–“A” parks vidējie kopējie zudumi veidoja 3,48 dB (1310 nm) un 2,15 dB (1550 nm). Skaitliskie aprēķini šim posmam, ņemot vērā informāciju par līnijā esošām metinājuma vietām un savienotājiem, parādīja vērtības, kas nebūtiski atšķiras no eksperimentu rezultātiem – 3,41 dB (1310 nm) un 2,18 dB (1550 nm).
12. Realizēti mobilā sakaru tīkla radiopārklājuma eksperimentālie mērījumi, izmantojot darbā piedāvāto uztvertā signāla jaudas zudumu uztveršanas punktā noteikšanas metodoloģiju. Eksperimentālie publiskā operatora *Tele2* 2G mobilā tīkla parametru mērījumi tika veikti Šķirotavas stacijā gar dzelzceļa līnijām un to tuvumā. Iegūtie rezultāti attēloti kartē un jaudas izmaiņu grafika veidā, atkarībā no *BTS*–*MS* attāluma izvēlētajai bāzes stacijai, kurai tika noteikta konkrēta atrašanās vieta.
13. Eksperimentāli saņemtā *Tele2* 2G bāzes stacijas jaudas izmaiņu līkne, atkarībā no attālumā starp bāzes stacijas rādītāju un mobilās stacijas uztvērēju tika salīdzināta ar radioviļņu izplatīšanās matemātiskajiem modeļiem, balstoties šādos *BTS* un *MS* parametros: $P_t = 40$ W, $f = 900$ MHz, $G_t = 10$, $G_r = 1$, $h_t = 30$ m, $h_r = 1$ m. Konstatēts, ka attālumā diapazonā no 1 km līdz 2 km pie uzdotajiem parametriem signāla jaudas izmaiņas tiek ideāli raksturotas ar *Okumura* modeli.

14. Realizēts mūsdienu heterogēnā tīkla modelis, veikta tā eksperimentālā analīze. Piedāvātais tīkls apvieno simetriskās, koaksiālās, šķiedru optikas sakaru līnijas, mobilo sakaru tehnoloģijas un ir piemērots mūsdienu dzelzceļa telemātikas sistēmu izpētei.
15. Izstrādātais eksperimentālais heterogēnais tīkls ļauj īstenot šādas galvenās funkcijas: pārskatāmi pārsūtīt datus, izmantojot *SDH* tīklu, un apskatīt multipleksēšanas procesus tajā; realizēt telefona sakarus, izmantojot *VoIP* tehnoloģiju; pārraidīt augstas izšķirtspējas multimediju datus, datorsistēmu ciparu informāciju, tālkontroles un tālvadības signālus dzelzceļa telemātikas sistēmu sakaru kanālu darbības analīzei.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. 3GPP TS 38.101-4. *User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception. Part 4: Performance Requirements*. Sophia Antipolis: 3GPP, 2022. 601 p.
2. 3GPP TS 38.104. *Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*. Sophia Antipolis: 3GPP, 2022. 359 p.
3. Alim M. A., Rahman M. M., Hossain M. M., Al-Nahid A. Analysis of Large-Scale Propagation Models for Mobile Communications in Urban Area. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*. 2010, vol. 7, no. 1.
4. Blaunstein, N. *Radio Propagation in Cellular Networks*. London: Artech House, 2000. 384 p.
5. COST Action 231. *Digital Mobile Radio Towards Future Generations Systems*. Technical Report EUR 18957. European Commission, 1999. 474 p.
6. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). *System Requirements Specification (SRS) Version 15.4.0*. GSM-R Operators Group, 2014 [viewed May 10, 2019]. Available from: <http://www.uic.org/IMG/pdf/p0028d004.3r0.5-15.4.0.pdf>
7. Fujimoto, K., James, J. R. *Mobile Antenna Systems Handbook*. London: Artech House, Inc., 1994. 710 p.
8. Fujimoto, K., Morishita, H. *Modern Small Antennas*. New York: Cambridge University Press, 2014. 473 p.
9. Gibson, J. D. *The Mobile Communication Handbook*. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. 813 p.
10. Golovins, J. *Sakaru kabeļa līniju parametru izpēte un skaitliska analīze*. Maģistra darbs. Rīga: RTU, DzTI, 2004. 77 lpp.
11. Hata, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1980, vol. 29, no. 3, pp. 317–325.
12. Huynh, M. C. *A Numerical and Experimental Investigation of Planar Inverted-F Antennas for Wireless Communication Applications*. Master thesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. 123 p.
13. Ikegami, F., Takeuchi, T., Yoshida, S. Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1991, vol. 39, no. 3, pp. 299-302.
14. ITU-R P.1238. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 450 GHz*. Geneva: ITU, 2021. 29 p.
15. ITU-R P.1411. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*. Geneva: ITU, 2021. 56 p.
16. ITU-R P.525. *Calculation of Free-space Attenuation*. Geneva: ITU, 2019. 6 p.
17. Kathrein Inc. *Professional Antennas for Mobile Communications*. Kathrein Inc. [viewed May 10, 2019]. Available from: http://www.kathrein-scala.com/catalog/700-3800_C35.pdf

18. Lee, W. C. Y. *Mobile Communications Design Fundamentals*. 2nd Edition. New York: Wiley, 1993. 398 p.
19. Lee, W. C. Y. Lee's Model. In: *Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference – Frontiers of Technology*. 1992, vol. 1, pp. 343–348.
20. Mezītis, M., Vasiljevs, A. Feasibility of IIoT Application in Railway Signalling and Interlocking Systems. In: *Transport Means 2019: Sustainability: Research and Solutions: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference, Palanga, Lithuania October 2–4, 2019*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019, pp. 169-175. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034.
21. Milligan, T. A. *Modern Antenna Design*. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 2005. 614 p.
22. Otersone, K., Vasiljevs, A. Experimental Investigations of Radio Coverage Conditions in 5G Cellular Mobile Communication Networks for Railway Application. In: *Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference, Lithuania, Kaunas, October 5–8, 2022*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022, pp. 146–150. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034.
23. Parsons, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. 2nd Edition. New York: Wiley, 2000. 436 p.
24. Pinho, P., Rocha Pereira, J. F. Optimisation of a PIFA Antenna Using Genetic Algorithms. In: *Proceedings of the 3rd Conference on Telecommunications (ConfTele 2001), April 23–24, 2001*.
25. Popovs, V., Otersone, K., Ševčenko, A., Skudnovs, V., Vasiljevs, A. Experimental Investigations of Radio Coverage Conditions in CNMC 2G–4G along the Railway. In: *Transport Means 2021: Proceedings of 25th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, October 6–8, 2021*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2021. pp. 131–135. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034.
26. Popov, V., Skudnov, V. *Fundamentals of Designing Cellular Mobile Communication Networks*. Moscow: Goryachaya Liniya–Telekom, 2017. 400 p.
27. Popovs, V. *GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēmas. Projektēšanas problēmas*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2003. 362 lpp.
28. Popovs, V., Skudnovs, V., Ševčenko, A., Vasiljevs, A. Application of Software Complexes for Monitoring of Cellular Networks of Mobile Communication KPI on Railway Transport. In: *Transport Means 2020: Proceedings of the 24th International Scientific Conference, Lithuania, Palanga, September 30–October 2, 2020*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2020, pp. 748.-752. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034.
29. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiljevs, A. Simulation Model of Modern HetNet: Design and Experimental Studies. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017, vol. 13, no. 1, pp. 190–198. ISSN 2411-1473.
30. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiljevs, A. Simulation of Modern Heterogeneous Data Network. In: *Proceedings of the 55. International Scientific conference of the Riga Technical University, Latvia, Riga, 2014*.

31. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A. Mathematical Models and Algorithms of Radio Wave Propagation in Cellular Networks of Mobile Communication. *Technologijos ir menas*. 2016, no. 7, pp. 102–111. ISSN 2029-400X.
32. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A. Modern Antenna Systems of Mobile Terminals in Cellular Networks of Mobile Communication. *Visnyk Universytetu "Ukraina". Series Informatics, Computing and Cybernetics*. 2019, vol. 1, no. 22, pp. 38-48.
33. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A., Ševčenko, A. Problems of Telemedicine in Latvia. *Technologijos ir menas*. 2017, no. 8, pp. 101–107. ISSN 2029-400X.
34. Popovs, V., Skudnovs, V., Vasiļjevs, A., Ševčenko, A. Railway Heterogeneous Communication Network Model Investigations. In: *Procedia Computer Science. Vol. 149: ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018), Lithuania, Klaipeda, 2019*. Amsterdam: Elsevier, 2018. pp. 223–230. ISSN 1877-0509. Pieejams: doi: 10.1016/j.procs.2019.01.127
35. Popovs V. *Tehniskā elektrodinamika, 4. daļa: radioviļņu izplatīšanās*. Lekciju konspekts. Rīga: RTU, DzTI, 2005. 74 lpp.
36. Popovs V. *Transporta sakaru līnijas*. Laboratorijas praktikums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. 53 lpp.
37. Popovs V. *Transporta sakaru līnijas*. Lekciju konspekts. Rīga: RTU, DzTI, 2005. 209 lpp.
38. Popovs V. *Transporta sakaru līnijas: Kabeļu sakaru līniju parametru aprēķinu pamati*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2008. 114 lpp.
39. Senior, J. M., Jamro, M. Y. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Harlow: Pearson Education, 2009. 1127 p.
40. Singh, Y. Comparison of Okumura, Hata and COST–231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength. *International Journal of Computer Applications*. 2012, vol. 59, no. 11.
41. Siwiak, K., Bahreini, Y. *Radio wave Propagation and Antennas for Personal Communications*. 3rd Edition. London: Artech House, 2007. 494 p.
42. Sneps-Sneppe, M., Fedorova, N., Sukonnikov, G., Kupriyanovsky, V. Digital Railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R — whether it takes place? *Int. Journal of Open Information Technologies*. 2010, vol. 5, no. 1, pp. 71–80.
43. Taoglas. *Product Catalogue*. [viewed May 8, 2021]. Available from: <http://www.taoglas.com/store/>
44. Tataria, H., Haneda, K. F., Molisch, A. F., Shafi, M., Tufvesson, F. Standardization of Propagation Models for Terrestrial Cellular Systems: A Historical Perspective. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2021, vol. 28: pp. 20–44.
45. Vasiļjevs, A., Otersone, K. Mathematical Models of VHF/UHF Radio Wave Propagation in Cellular Mobile Communication Networks. In: *Transport Means 2022: Proceedings of 26th International Scientific Conference, Lithuania, Kaunas, October 5–8, 2022*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022. pp. 260–266. ISSN 1822-296X. e-ISSN 2351-7034.

46. Kin-Lu, W. *Planar Antennas for Wireless Communications*. New York: Wiley-Inter Science, 2003. 301 p.
47. Yin, X., Cheng, X. *Propagation Channel Characterization, Parameter Estimation, and Modeling for Wireless Communications*. New York: Wiley-IEEE Press, 2016. 350 p.
48. Zhang, Z. *Antenna Design for Mobile Devices*. New York: Wiley-IEEE Press, 2011. 304 p.
49. Ziemelis, J. *Elektrodinamikas pamati*. Rīga: RPI, 2001. 200 lpp.
50. Андреев, В. А., Портнов, Э. Л., Бурдин, В. А., Бурдин, А. В., Воронков, А. А. *Направляющие системы электросвязи: теория передачи и влияния, проектирование, строительство и техническая эксплуатация*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2018. 396 с.
51. Весоловский, К. *Системы подвижной радиосвязи*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2006. 536 с.
52. Попов, В. И. *Основы сотовой связи стандарта GSM*. Москва: Эко–Трендз, 2005. 296 с.
53. Попов, В. И. *Распространение радиоволн в лесах*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2015. 392 с.
54. Попов, В. И., Скуднов, В. А., Васильев, А. С. Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития. *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*. 2015, №11 (20), часть 3, с. 138–150.
55. Попов, В. И., Скуднов, В. А., Васильев, А. С. Антенные системы мобильных терминалов в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития. *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*. 2015, №11 (20), часть 3, с. 132–137.
56. Попов, В. И., Скуднов, В. А., Васильев, А. С. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи. *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*. 2016, №3 (24), часть 3, с. 68–80.
57. Слюсар, В. Антенны PIFA для мобильных средств связи. *Электроника НТБ*. 1/2007, с. 64–74.

PIELIKUMI

SKSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

Dots:

$d := 0.64$	mm	vada dzīslas diametrs
$\delta := 0.265$	mm	vada izolācijas biezums (fāzes izolācija)
$\Delta := 0$	mm	vada joslizolācija
$h := 65$	mm	savijuma solis
$k_{st} := 0$		savijuma tips: 0 — pāra 1 — dubultpāra 2 — zvaigžņu 3 — dubultzvaigžņu
$\sigma := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vadu elektrovadītspēja
$\rho := 0.0175$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	vadu īpatnēja pretestība
$\epsilon_r := 1.38$		izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība
$t_{g\delta_t} := (3 \ 8 \ 12 \ 20)^T \cdot 10^{-4}$		izolācijas zuduma leņķa tangensa vērtības uzdotajās frekvencēs $f_{tg\delta}$
$f_{tg\delta} := (10 \ 100 \ 250 \ 500)^T \cdot 10^3$	Hz	
$f := (1 \ 10 \ 50 \ 100 \ 250)^T \cdot 10^3$	Hz	

Fiziskie parametri:

$\rho_v := 0.0175$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	vara īpatnēja pretestība
$\rho_a := 0.0292$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	alumīnija īpatnēja pretestība
$\sigma_v := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vara elektrovadītspēja
$\sigma_a := 37 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	alumīnija elektrovadītspēja
$\mu_r := 1$		relatīvā magnētiskā caurlaidība
$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$	magnētiskā konstante
$c := 3 \cdot 10^5$	$km \cdot s^{-1}$	gaismas ātrums
$\epsilon_0 := \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2}$	$\frac{F}{m}$	elektriskā konstante
$\mu := \mu_0 \cdot \mu_r$		absolūtā magnētiskā caurlaidība
$\epsilon := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$		absolūtā dielektriskā caurlaidība
$f_g := f_0, f_0 + 2f_0, \dots, f_{length(f)-1}$	Hz	$n := 0..length(f) - 1$

Izolētas dzīslas diametrs:

$$d_1 := d + 2 \cdot \delta + 2\Delta = 1.17 \quad \text{mm}$$

Attālums starp diviem vadiem:

$$a := \begin{cases} d_1 & \text{if } k_{st} = 0 \vee k_{st} = 1 \\ 1.41d_1 & \text{if } k_{st} = 2 \vee k_{st} = 3 \end{cases}$$

$$a = 1.17 \quad \text{mm}$$

Grupas diametrs:

$$D := \begin{cases} 1.71d_1 & \text{if } k_{st} = 0 \\ 2.72d_1 & \text{if } k_{st} = 1 \\ 2.41d_1 & \text{if } k_{st} = 2 \\ 3.98d_1 & \text{if } k_{st} = 3 \end{cases}$$

$$D = 2.001 \quad \text{mm}$$

Kabeļa savijuma koeficients:

$$\chi := \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{d + d_1}{h} \right)^2} = 1.004$$

Cilindriskās funkcijas:

$v_x :=$	$v_F :=$	$v_G :=$	$v_H :=$	$v_Q :=$
$\begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 1.5 \\ 2.0 \\ 2.5 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 4.0 \\ 4.5 \\ 5.0 \\ 7.0 \\ 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.000326 \\ 0.00519 \\ 0.0258 \\ 0.0782 \\ 0.1756 \\ 0.318 \\ 0.492 \\ 0.678 \\ 0.862 \\ 1.042 \\ 1.743 \\ 2.799 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.000975 \\ 0.01519 \\ 0.0691 \\ 0.1724 \\ 0.295 \\ 0.405 \\ 0.499 \\ 0.584 \\ 0.669 \\ 0.755 \\ 1.109 \\ 1.641 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0417 \\ 0.042 \\ 0.053 \\ 0.092 \\ 0.169 \\ 0.263 \\ 0.348 \\ 0.416 \\ 0.466 \\ 0.503 \\ 0.530 \\ 0.596 \\ 0.643 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.9998 \\ 0.997 \\ 0.987 \\ 0.961 \\ 0.913 \\ 0.845 \\ 0.766 \\ 0.686 \\ 0.616 \\ 0.556 \\ 0.400 \\ 0.286 \end{pmatrix}$

$$F(x) := \begin{cases} \text{return } 0.25 \cdot (\sqrt{2} \cdot x - 3) & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_F), v_x, v_F, x) & \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos
virsmas efekta dēļ

$$G(x) := \begin{cases} \text{return } 0.125 \cdot (\sqrt{2} \cdot x - 1) & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_G), v_x, v_G, x) & \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos
kaimiņvadu tuvuma dēļ

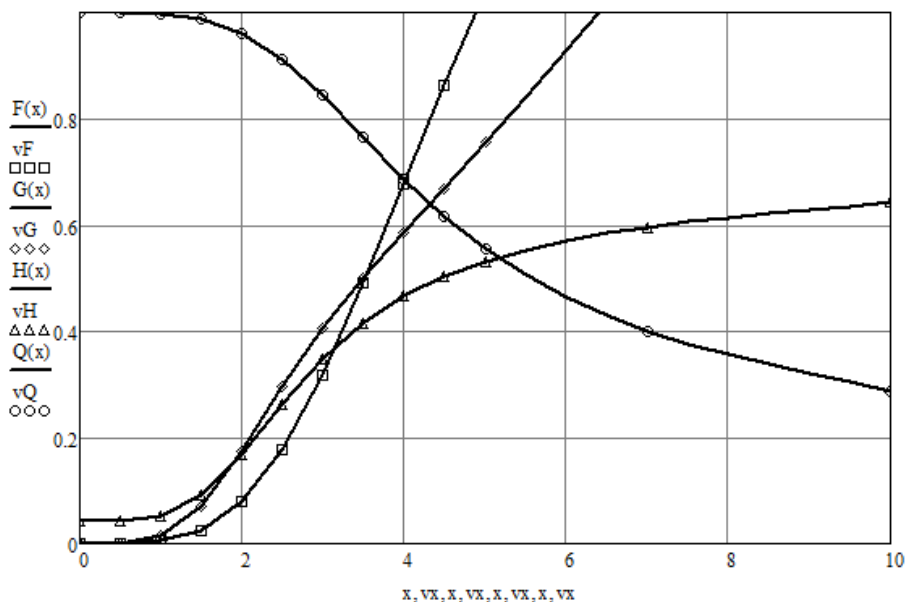
$$H(x) := \begin{cases} \text{return } 0.750 & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_H), v_x, v_H, x) & \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos kaimiņ
vadu tuvuma dēļ

$$Q(x) := \begin{cases} \text{return } 2\sqrt{2} \cdot x^{-1} & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_Q), v_x, v_Q, x) & \end{cases}$$

raksturo pretestības pazemināšanos
virsmas efekta dēļ

$x := 0, 0.5.. 10$



Aktīvā garuma pretestība:

$$R_0 := \frac{2550 \cdot \rho \cdot \chi}{d^2} = 109.364 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

garuma pretestība līdstrāvai

$$x(f) := 0.0005 \cdot d \cdot \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$$

$$P_S := \begin{cases} 1 & \text{if } k_{St} = 0 \\ 2 & \text{if } k_{St} = 1 \\ 5 & \text{if } k_{St} = 2 \\ 3 & \text{if } k_{St} = 3 \end{cases}$$

koeficients, kas raksturo zudumus
kaimiņvadu tuvuma efekta dēļ

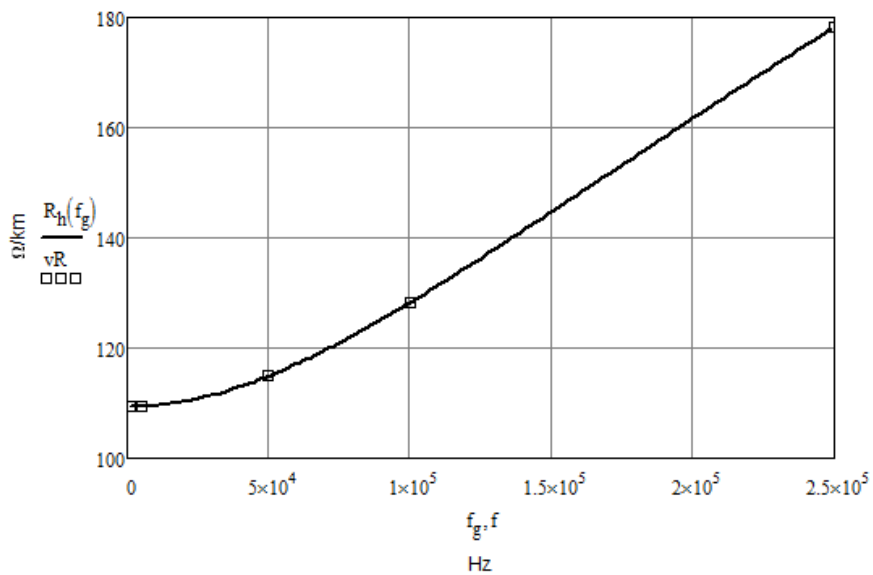
$$P_S = 1$$

$$R_h(f) := R_0 \left[1 + F(x(f)) + \frac{P_S \cdot G(x(f)) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(x(f)) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2} \right] \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$vR := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow R_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad vR_n = \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$1 \cdot 10^3$	109.408
$5 \cdot 10^3$	109.426
$50 \cdot 10^3$	114.924
$100 \cdot 10^3$	128.272
$250 \cdot 10^3$	178.23



Garuma induktivitāte:

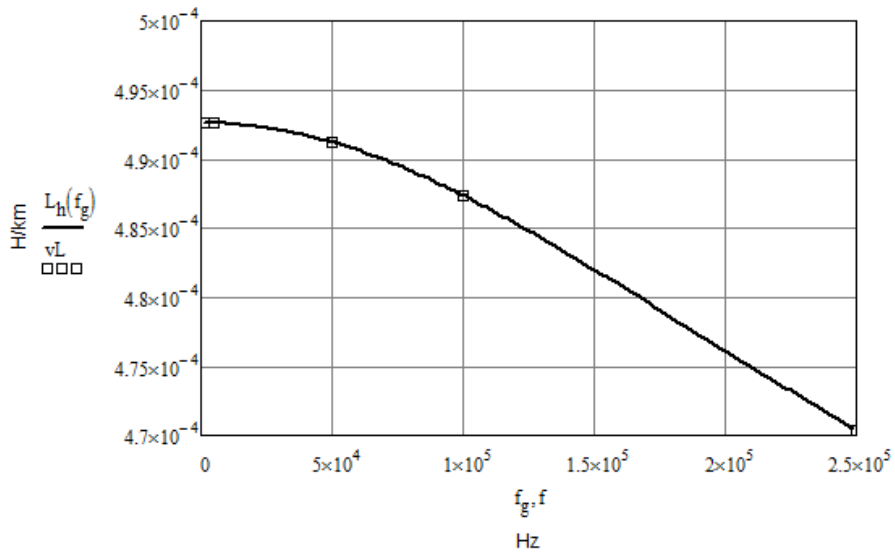
$$L_h(f) := \chi \cdot \left(4 \ln \left(\frac{2a - d}{d} \right) + Q(x(f)) \cdot \mu_r \right) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

$$vL := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow L_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad vL_n = \frac{H}{\text{km}}$$

$1 \cdot 10^3$
$5 \cdot 10^3$
$50 \cdot 10^3$
$100 \cdot 10^3$
$250 \cdot 10^3$

$492.642 \cdot 10^{-6}$
$492.623 \cdot 10^{-6}$
$491.228 \cdot 10^{-6}$
$487.382 \cdot 10^{-6}$
$470.392 \cdot 10^{-6}$



Labojuma koeficients savijumam:

$$\psi := \begin{cases} \frac{(D + d_1 - d)^2 - a^2}{(D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{St} = 0 \vee k_{St} = 2 \\ \frac{(0.65D + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.65D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{St} = 1 \\ \frac{(0.43D + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.43D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{St} = 3 \end{cases}$$

$$\psi = 0.648$$

Garuma kapacitāte:

$$C_h := \frac{\chi \cdot \epsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln\left(\frac{2a}{d} \psi\right)} = 44.627 \times 10^{-9} \frac{F}{km}$$

Izolācijas zuduma leņķa tangenss:

$$tg\delta(f) := \begin{cases} tg\delta_{t_0} & \text{if } f \leq f_{tg\delta_0} \\ \text{interp}(f_{tg\delta_0}, tg\delta_{t_0}, f) & \text{if } (f_{tg\delta_0} \leq f \leq f_{tg\delta_{length}}(f_{tg\delta_0}) - 1) \\ tg\delta_{t_{length}(tg\delta_{t_0}) - 1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

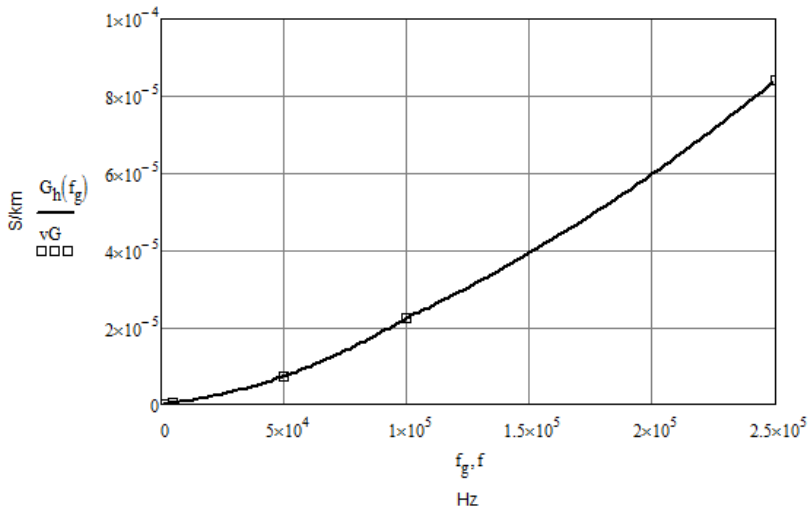
Izolācijas garuma vadītspēja:

$$G_h(f) := 2\pi \cdot f \cdot C_h \cdot tg\delta(f) \text{ S} \cdot km^{-1}$$

$$vG := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow G_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vG_n =$ $\frac{S}{km}$

$1 \cdot 10^3$	$84.119 \cdot 10^{-9}$
$5 \cdot 10^3$	$420.596 \cdot 10^{-9}$
$50 \cdot 10^3$	$7.321 \cdot 10^{-6}$
$100 \cdot 10^3$	$22.432 \cdot 10^{-6}$
$250 \cdot 10^3$	$84.119 \cdot 10^{-6}$



Viļņu pretestība:

$$Z_v := \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{2a-d}{d}\right) = 99.793 \quad \Omega$$

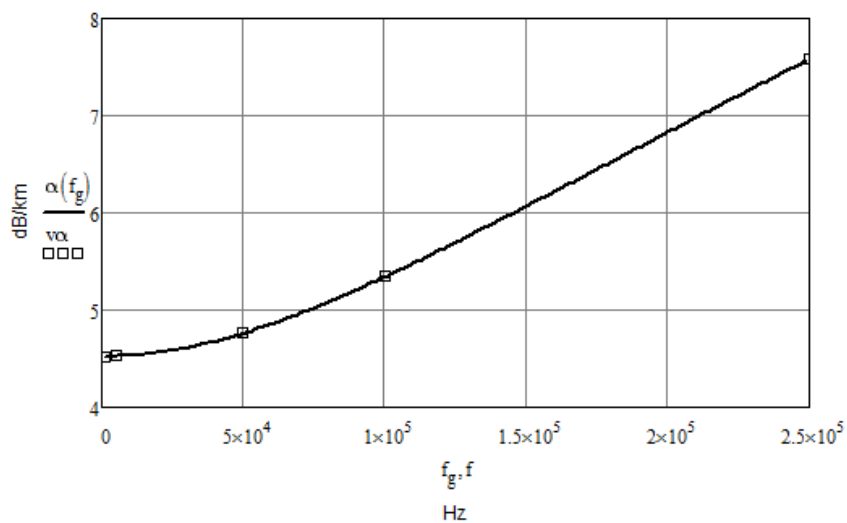
Garuma rimšanas koeficients:

$$\alpha(f) := 8.69 \cdot \left(\frac{R_h(f)}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_h}{L_h(f)}} + \frac{G_h(f)}{2} \cdot \sqrt{\frac{L_h(f)}{C_h}} \right) \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

$$v\alpha := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \alpha(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \quad \text{Hz} \quad \quad v\alpha_n = \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

$1 \cdot 10^3$	4.525
$5 \cdot 10^3$	4.526
$50 \cdot 10^3$	4.763
$100 \cdot 10^3$	5.343
$250 \cdot 10^3$	7.58



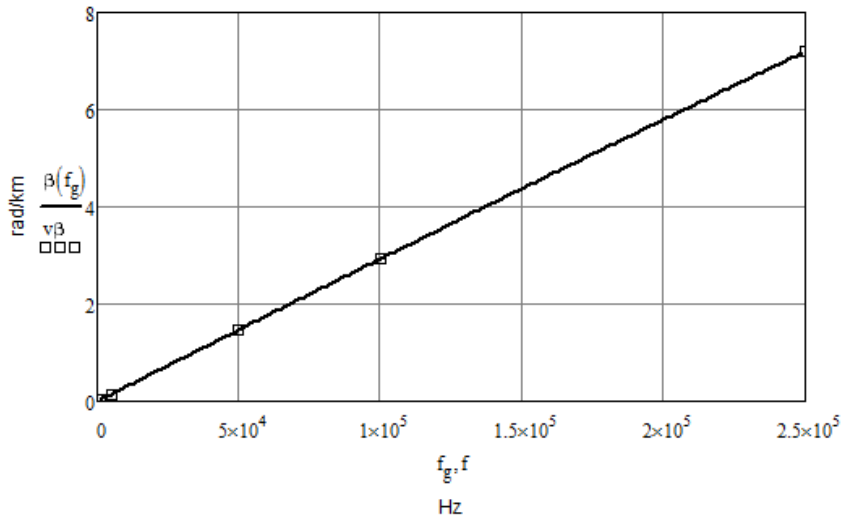
Fāzes koeficients:

$$\beta(f) := 2\pi f \cdot \sqrt{L_h(f) \cdot C_h}$$

$$v\beta := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \beta(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad v\beta_n = \frac{\text{rad}}{\text{km}}$$

$1 \cdot 10^3$	0.029
$5 \cdot 10^3$	0.147
$50 \cdot 10^3$	1.471
$100 \cdot 10^3$	2.93
$250 \cdot 10^3$	7.197



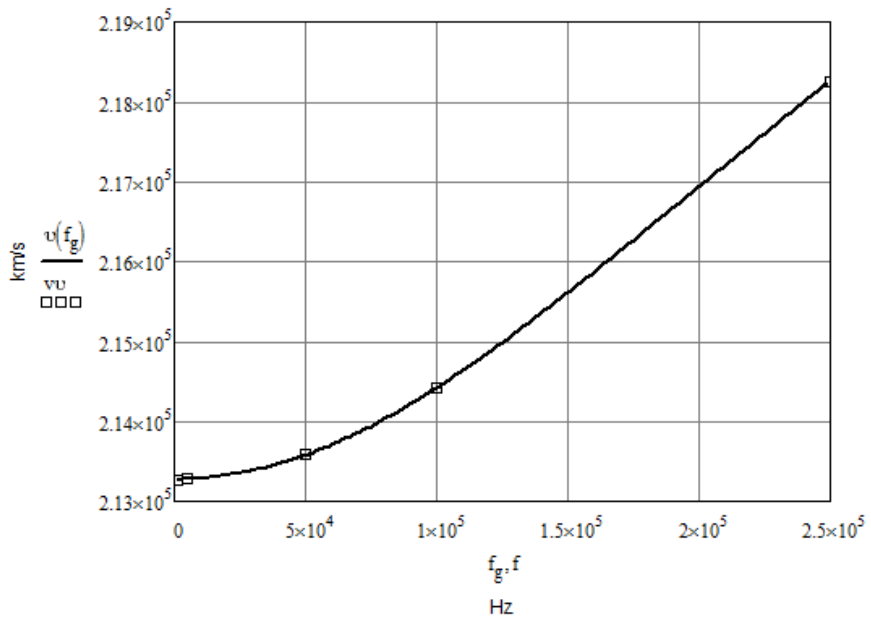
Izplatīšanās ātrums:

$$v(f) := \frac{1}{\sqrt{L_h(f) \cdot C_h}} \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$v\upsilon := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow v(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad v\upsilon_n = \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$1 \cdot 10^3$	213274
$5 \cdot 10^3$	213278
$50 \cdot 10^3$	213580
$100 \cdot 10^3$	214421
$250 \cdot 10^3$	218259



Izplatīšanās laiks:

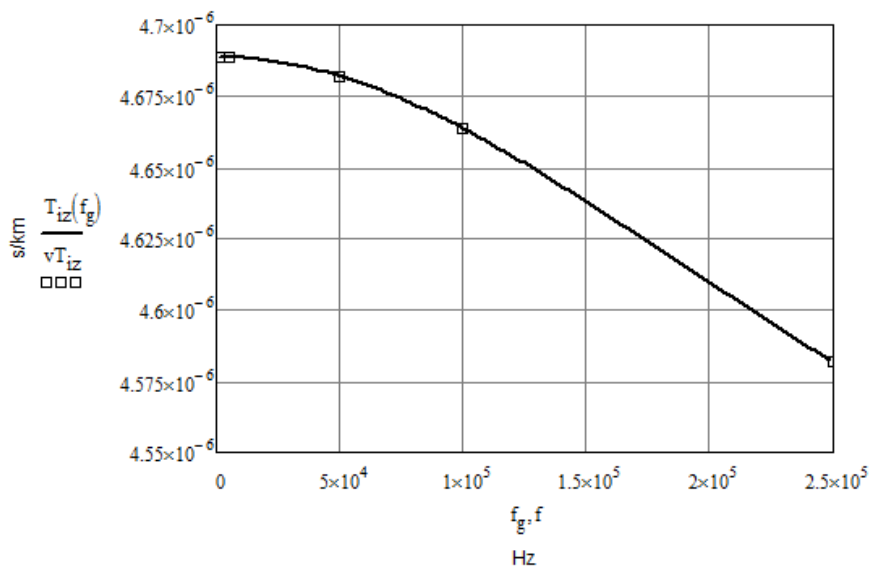
$$T_{iz}(f) := \frac{1}{v(f)} \frac{s}{km}$$

$$vT_{iz} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow T_{iz}(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vT_{iz_n} =$ $\frac{s}{km}$

$1 \cdot 10^3$
$5 \cdot 10^3$
$50 \cdot 10^3$
$100 \cdot 10^3$
$250 \cdot 10^3$

$4.689 \cdot 10^{-6}$
$4.689 \cdot 10^{-6}$
$4.682 \cdot 10^{-6}$
$4.664 \cdot 10^{-6}$
$4.582 \cdot 10^{-6}$



Saīsinājuma koeficients:

$$K_s(f) := \frac{c}{v(f)}$$

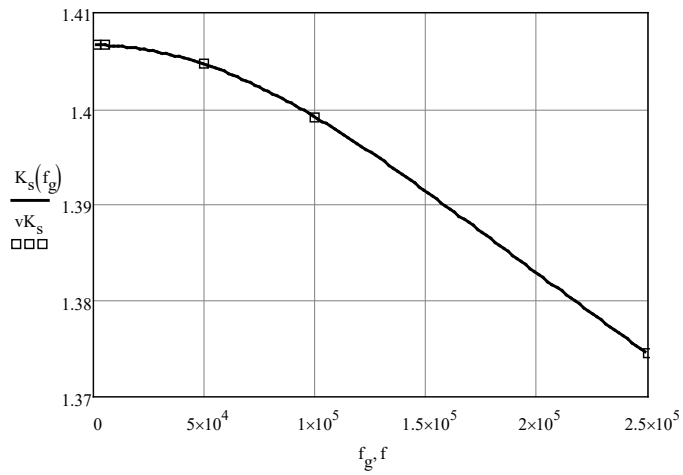
$$vK_s := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow K_s(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz

$vK_{s_n} =$

1 · 10 ³
5 · 10 ³
50 · 10 ³
100 · 10 ³
250 · 10 ³

1.407
1.407
1.405
1.399
1.375



Līnijas darba rimšana:

Līnijas garums — 0.5, 1, 2 km

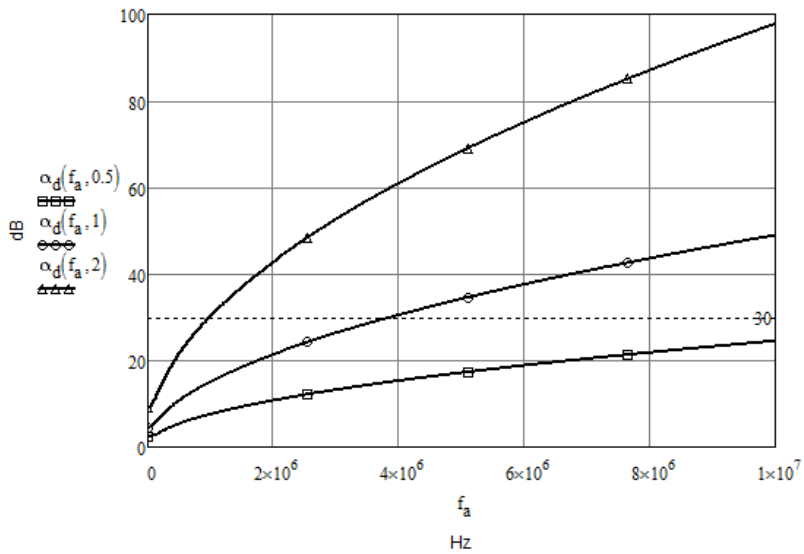
$$\Delta a_1 := 0 \text{ dB}$$

$$\Delta a_2 := 0 \text{ dB}$$

$$\Delta a_3 := 0 \text{ dB}$$

$$\alpha_d(f, L) := \alpha(f) \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 \text{ dB}$$

$$f_a := f_0, f_0 + 10 \cdot f_0 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$$



KKSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

Dots:

$d := 3.38$	mm	iekšējā vadītāja diametrs
$D := 14.9$	mm	ārējā vadītāja diametrs
$\sigma_{ic} := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	iekšējā vadītāja elektrovadītspēja
$\sigma_{ar} := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	ārējā vadītāja elektrovadītspēja
$\epsilon_r := 1.41$		PEEG izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība
$tg\delta_t := (0.9 \ 1.18)^T \cdot 10^{-4}$		izolācijas zuduma leņķa tangensa vērtības uzdotajās frekvencēs $f_{ig\delta}$
$f_{ig\delta} := (10^6 \ 10^9)^T$	Hz	
$f := (5 \ 50 \ 100 \ 200 \ 400 \ 600)^T \cdot 10^6$	Hz	darba frekvenču diapazons

Fiziskie parametri:

$\sigma_v := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vara elektrovadītspēja
$\sigma_a := 37 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	alumīnija elektrovadītspēja
$\mu_r := 1$		relatīvā magnētiskā caurlaidība
$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$	magnētiskā konstante
$c := 3 \cdot 10^8$	$m \cdot s^{-1}$	gaismas ātrums
$\epsilon_0 := \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2}$	$\frac{F}{m}$	elektriskā konstante
$\mu := \mu_0 \cdot \mu_r$		absolūtā magnētiskā caurlaidība
$\epsilon := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$		absolūtā dielektriskā caurlaidība
$f_g := f_0, f_0 + 2f_0 \dots f_{length(f)-1}$		$n := 0 \dots length(f) - 1$

Aktīvā garuma pretestība:

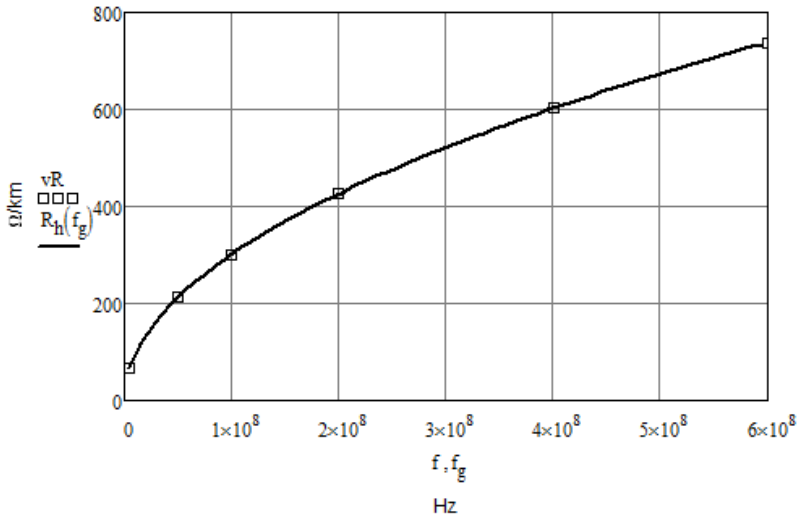
$$R_h(f) := 6.32 \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_{ic} \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ar} \cdot D}} \right) \cdot 10^2 \frac{\Omega}{km}$$

$$vR := \begin{cases} \text{for } i \in 0 \dots (length(f) - 1) \\ v_i \leftarrow R_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vR_n =$ $\frac{\Omega}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

67.354
212.991
301.215
425.982
602.43
737.823



Garuma induktivitāte:

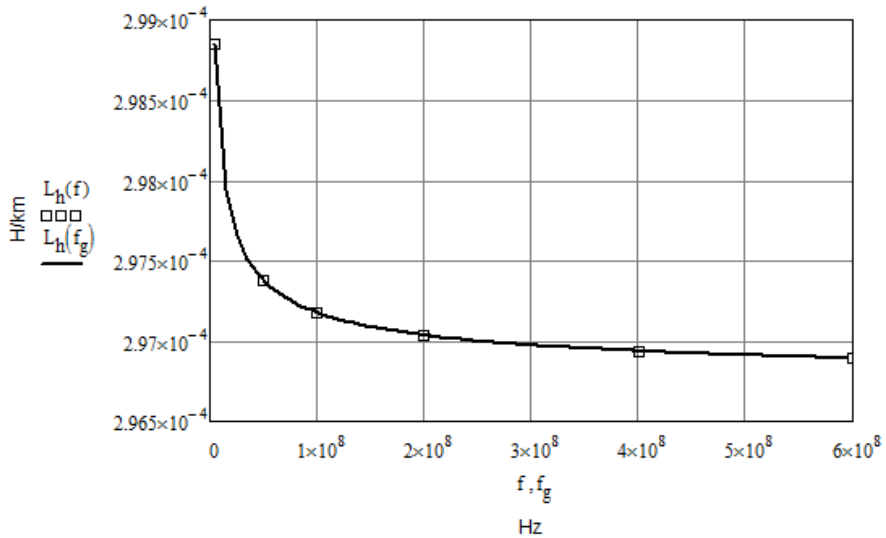
$$L_h(f) := \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_{ie} \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ar} \cdot D}} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

$$vL := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow L_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vL_n =$ $\frac{\text{H}}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$298.85 \cdot 10^{-6}$
$297.378 \cdot 10^{-6}$
$297.178 \cdot 10^{-6}$
$297.037 \cdot 10^{-6}$
$296.938 \cdot 10^{-6}$
$296.894 \cdot 10^{-6}$



Garuma kapacitāte:

$$C_h := \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} = 5.28 \times 10^{-8} \frac{F}{km}$$

Izolācijas zuduma leņķa tangenss:

$$\text{tg}\delta(f) := \begin{cases} \text{tg}\delta_{t_0} & \text{if } (f \leq f_{\text{tg}\delta_0}) \\ \text{interp}(f_{\text{tg}\delta}, \text{tg}\delta_t, f) & \text{if } (f_{\text{tg}\delta_0} \leq f \leq f_{\text{tg}\delta_{\text{length}(f_{\text{tg}\delta})-1}}) \\ \text{tg}\delta_{\text{length}(f_{\text{tg}\delta})-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Izolācijas garuma vadītspēja:

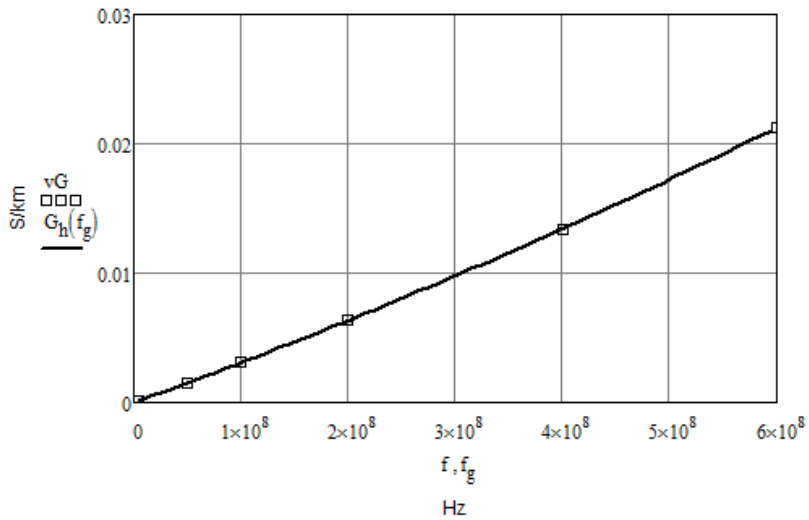
$$G_h(f) := 2\pi \cdot f \cdot C_h \cdot \text{tg}\delta(f) \frac{S}{km}$$

$$vG := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow G_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad vG_n = \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$149.485 \cdot 10^{-6}$
$1.516 \cdot 10^{-3}$
$3.078 \cdot 10^{-3}$
$6.342 \cdot 10^{-3}$
$13.428 \cdot 10^{-3}$
$21.258 \cdot 10^{-3}$



Vijņu pretestība:

$$Z_v := \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) = 74.959 \, \Omega$$

Garuma rimšanas koeficients:

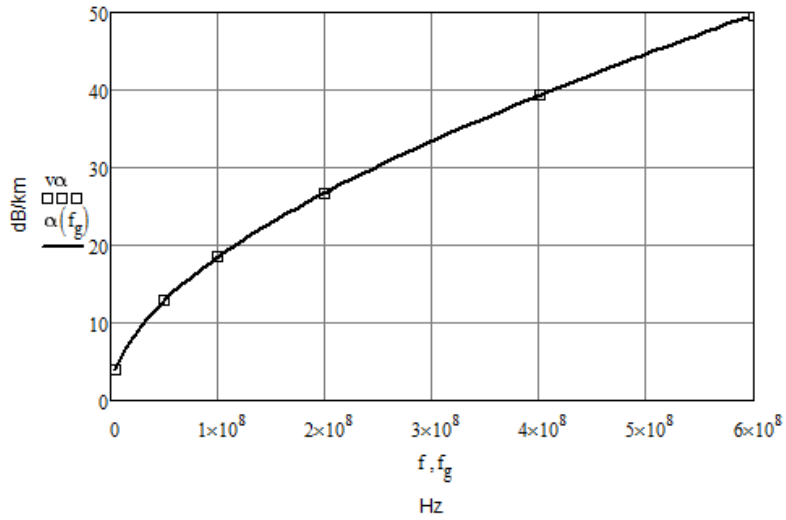
$$\alpha(f) := 8.69 \left(\frac{R_h(f)}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_h}{L_h(f)}} + \frac{G_h(f)}{2} \sqrt{\frac{L_h(f)}{C_h}} \right) \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

$$v\alpha := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \alpha(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $v\alpha_n =$ $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

3.939
12.826
18.449
26.745
39.281
49.68



Fāzes koeficients:

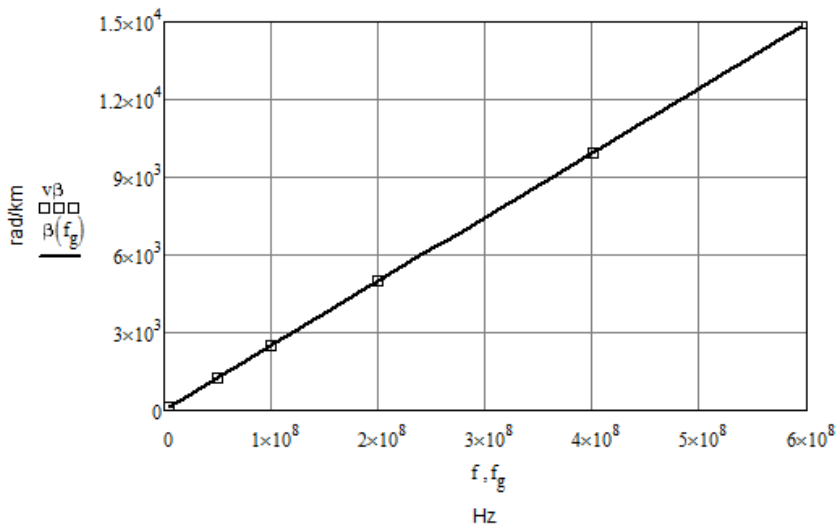
$$\beta(f) := 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L_h(f) \cdot C_h} \frac{\text{rad}}{\text{km}}$$

$$v\beta := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \beta(f_i) \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $v\beta_n =$ $\frac{\text{rad}}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

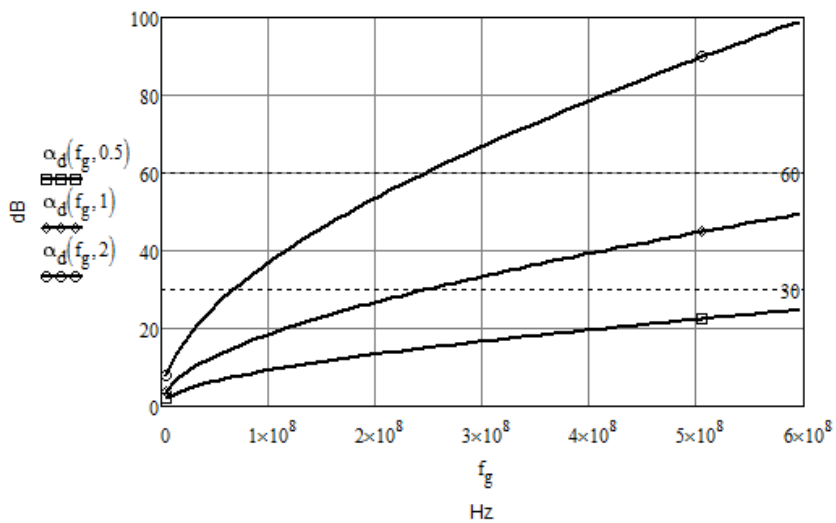
124.798
$1.245 \cdot 10^3$
$2.489 \cdot 10^3$
$4.977 \cdot 10^3$
$9.952 \cdot 10^3$
$1.493 \cdot 10^4$



Līnijas darba rīšana:

Līnijas garums — 0.5, 1, 2 km.

$$a_d(f, L) := \alpha(f) \cdot L \text{ dB}$$

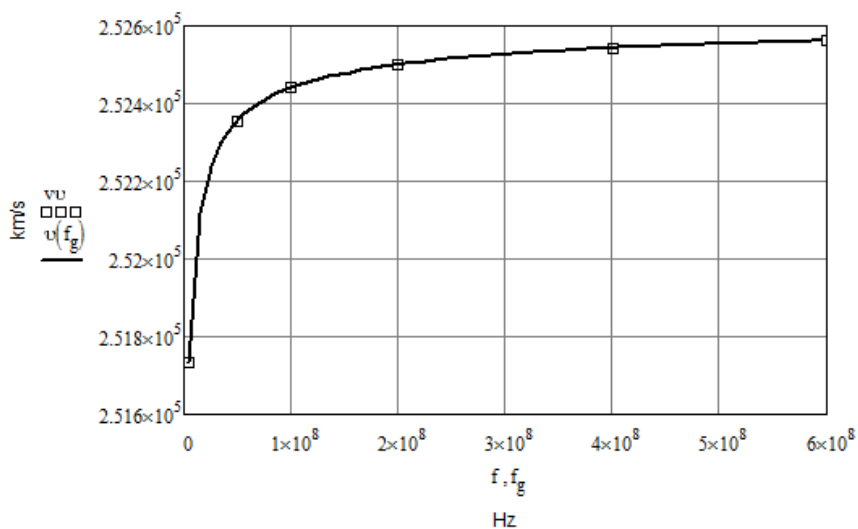


Izplatīšanās ātrums:

$$v(f) := \frac{1}{\sqrt{L_h(f) \cdot C_h}} \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$vU := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow v(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$vU_n =$	$\frac{\text{km}}{\text{s}}$
$5 \cdot 10^6$		$251.734 \cdot 10^3$	
$50 \cdot 10^6$		$252.356 \cdot 10^3$	
$100 \cdot 10^6$		$252.441 \cdot 10^3$	
$200 \cdot 10^6$		$252.501 \cdot 10^3$	
$400 \cdot 10^6$		$252.543 \cdot 10^3$	
$600 \cdot 10^6$		$252.562 \cdot 10^3$	



Sāisinājuma koeficients:

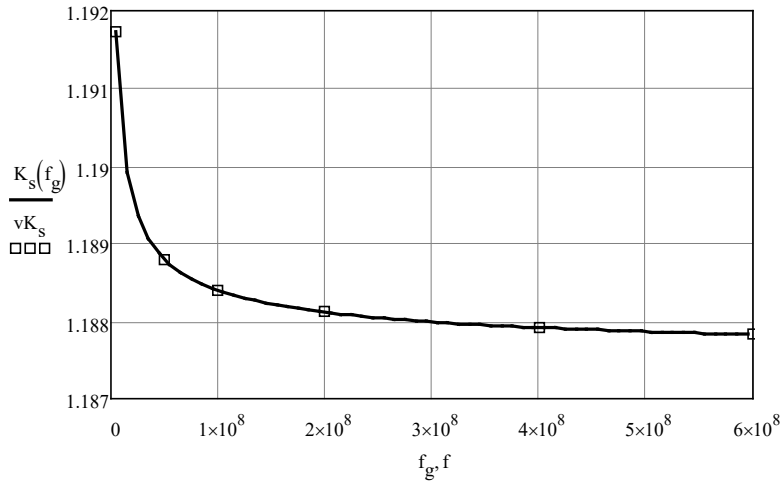
$$K_s(f) := \frac{c}{v(f)}$$

$$vK_s := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow K_s(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vK_{s_n} =$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

1.192
1.189
1.188
1.188
1.188
1.188



Izplatīšanās laiks:

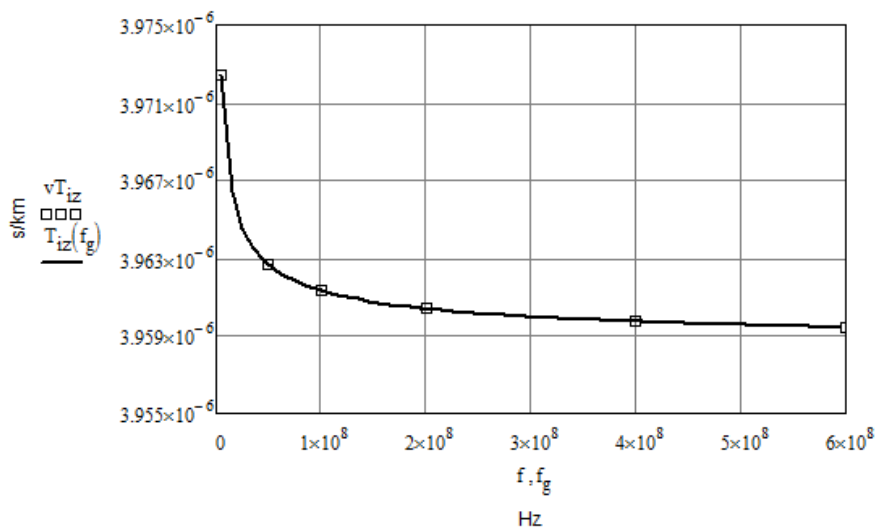
$$T_{iz}(f) := \frac{1}{v(f)} \frac{s}{km}$$

$$vT_{iz} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow T_{iz}(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$ Hz $vT_{iz_n} =$ $\frac{s}{km}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$3.972 \cdot 10^{-6}$
$3.963 \cdot 10^{-6}$
$3.961 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.959 \cdot 10^{-6}$



Aiztures laiks:

$$T_{aiz}(f, L) := T_{iz}(f) \cdot L \text{ s}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad T_{aiz}(f, 0.5)_n = \text{s} \quad T_{aiz}(f, 1)_n = \text{s} \quad T_{aiz}(f, 2)_n = \text{s}$$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$1.986 \cdot 10^{-6}$
$1.981 \cdot 10^{-6}$
$1.981 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$

$3.972 \cdot 10^{-6}$
$3.963 \cdot 10^{-6}$
$3.961 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.959 \cdot 10^{-6}$

$7.945 \cdot 10^{-6}$
$7.925 \cdot 10^{-6}$
$7.923 \cdot 10^{-6}$
$7.921 \cdot 10^{-6}$
$7.919 \cdot 10^{-6}$
$7.919 \cdot 10^{-6}$

ŠOSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

Dots:

$d := 8.3$	μm	serdeņa diametrs
$\lambda := 1.55$	μm	darba viļņa garums
$\Delta\lambda := 2$	nm	starojuma avota spektra platums
$n_1 := 1.467$		serdeņa laušanas koeficients
$\Delta := 0.003$		laušanas rādītāju relatīvā starpība
$t_{g\delta} := 10 \cdot 10^{-12}$		viļņvada materiāla zuduma leņķa tangenss
$c := 3 \cdot 10^5$	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	gaismas ātrums vakuumā
$L := (10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 100)^T$	km	līnijas garums
$L_g := 1, 2, \dots, L_{\text{length}(L)-1}$	km	

Apvalka laušanas koeficients:

$$n_2 := n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta} = 1.463$$

Skaitliskā apertūra:

$$NA := n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} = 0.114$$

Raksturojošā frekvence:

$$V := \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda} = 1.912$$

Kritiskā viļņa garums:

$$\lambda_{kr} := \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2.405} = 1.232 \quad \mu\text{m}$$

Kritiskā frekvence:

$$f_{kr} := \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3 = 1.66 \times 10^8 \quad \text{MHz}$$

Fāžu ātrums:

$$V_\phi := \frac{c}{n_1} \cdot 10^3 = 2.045 \times 10^8 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Energijas zudumi uz apslāpēšanu:

$$\alpha_a := \frac{\pi n_1 \cdot \text{tg} \delta}{\lambda} \cdot 8.69 \cdot 10^8 = 0.026 \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

Releja zudumi:

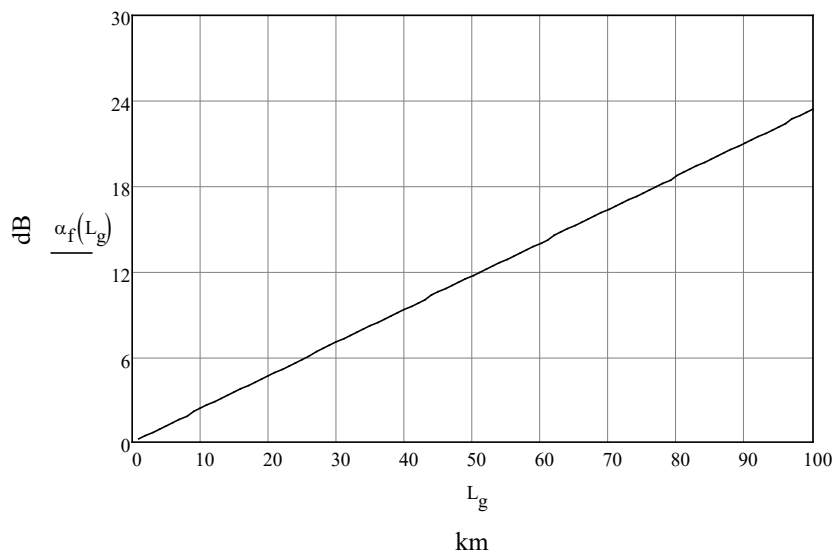
$$K_R := 1.2 \quad \text{dB} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\alpha_R := \frac{K_R}{\lambda^4} = 0.208 \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

Garuma rimšanas koeficients:

$$\alpha := \alpha_a + \alpha_R = 0.234 \quad \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\alpha_f(L) := \alpha \cdot L \quad \text{dB}$$



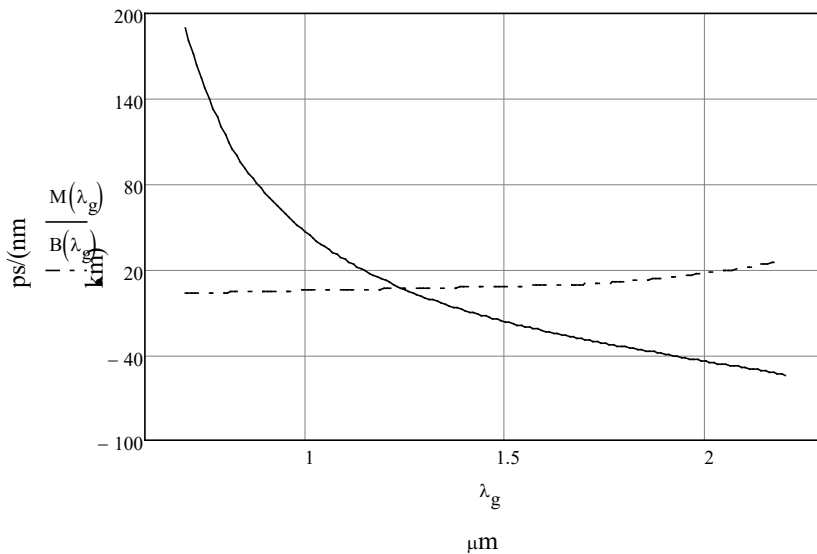
Materiālās un viļņvada dispersijas atkarība no viļņa garuma:

$\lambda_t :=$	$\begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.6 \\ 1.7 \\ 1.8 \\ 1.9 \\ 2 \\ 2.1 \\ 2.2 \end{pmatrix}$	μm	$M_t :=$	$\begin{pmatrix} 189.58 \\ 114.875 \\ 73.985 \\ 46.584 \\ 26.743 \\ 12.175 \\ 0.456 \\ -8.999 \\ -16.651 \\ -23.375 \\ -29.251 \\ -34.574 \\ -39.54 \\ -44.67 \\ -49.137 \\ -54.069 \end{pmatrix}$	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$	$B_t :=$	$\begin{pmatrix} 3.457 \\ 3.967 \\ 4.579 \\ 5.182 \\ 5.744 \\ 6.315 \\ 7.006 \\ 7.501 \\ 8.205 \\ 8.777 \\ 9.790 \\ 11.618 \\ 14.154 \\ 17.431 \\ 21.561 \\ 26.547 \end{pmatrix}$	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$
----------------	--	---------------	----------	--	---	----------	---	---

$$M(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, M_t), \lambda_t, M_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

$$B(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, B_t), \lambda_t, B_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

$$\lambda_g := 0.7, 0.71 \dots 2.2 \quad \mu\text{m}$$



Materiālā dispersija:

$$M(\lambda) = -20.116 \quad \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$$

$$\tau_{\text{mat}} := \Delta\lambda \cdot M(\lambda) = -40.233 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

Viļņvada dispersija:

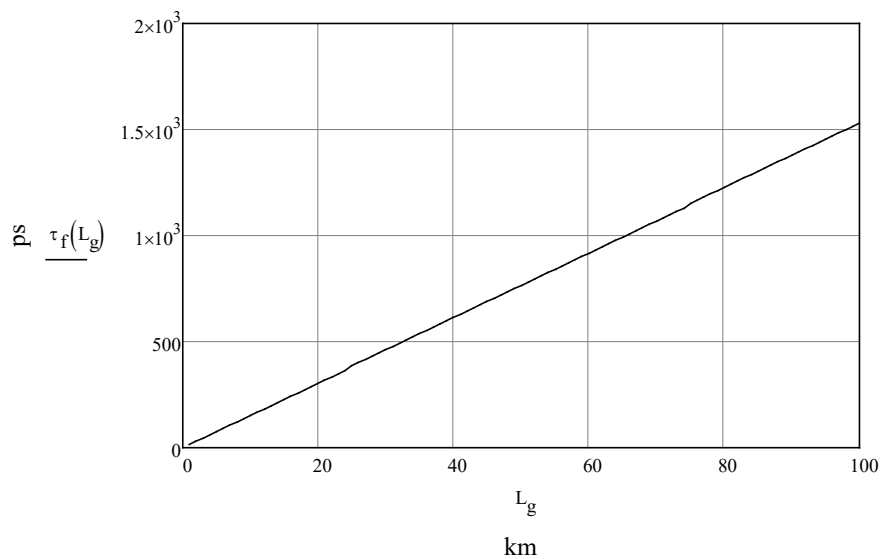
$$B := \frac{2n_1^2 \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9 = 27.769 \quad \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$$

$$\tau_{\text{v}} := \Delta\lambda \cdot B = 55.538 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

Kopējā dispersija:

$$\tau := \tau_{\text{mat}} + \tau_{\text{v}} = 15.305 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

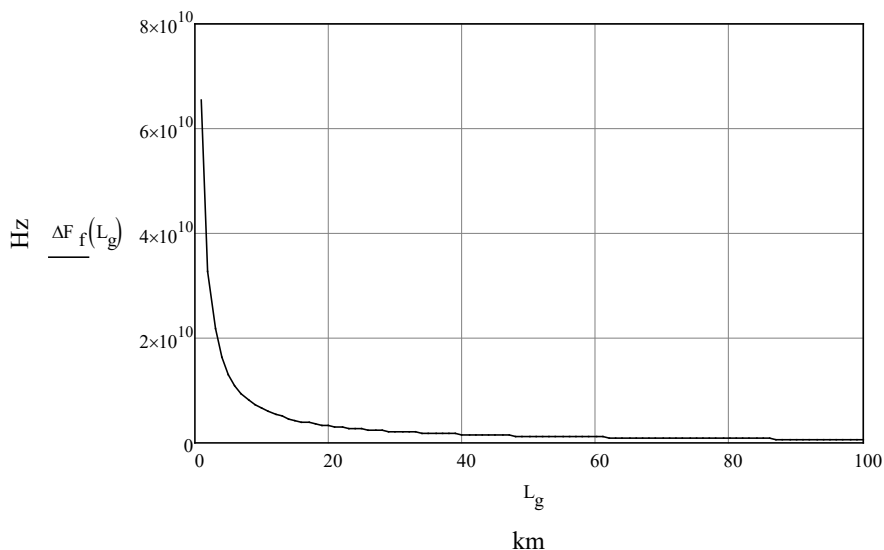
$$\tau_f(L) := \tau \cdot L \quad \text{ps}$$



Kanāla caurlaides josla:

$$\Delta F := \frac{1}{\tau} \cdot 10^{12} = 6.534 \times 10^{10} \quad \text{Hz}$$

$$\Delta F_f(L) := \frac{1}{\tau_f(L)} \cdot 10^{12} \quad \text{Hz}$$



Reģenerācijas iecirkņa garums:

$P_r := 5$	dBm	pārraides jaudas līmenis
$P_u := -26$	dBm	uztvērēja jutība
$\delta := 6$	dB	enerģētiskā rezerve
$\alpha_r := 0.1$	dB	zudumi raidītājā
$\alpha_s := 0.1$	dB	zudumi savienotājā
$n_s := 2$		savienotāju skaits
$\alpha_{ns} := 0.1$	dB	zudumi nesadalāmā savienotājā
$n := 2$		nesadalāmo savienotāju skaits
$\alpha_{saz} := 4.3$	dB	zudumi sazarotājā
$n_{saz} := 2$		sazarotāju skaits
$L_b := 6$	km	kabeļa būvgarums

$$L_m := \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha + \frac{\alpha_{ns}}{L_b}} = 54.562 \quad \text{km}$$

Uztvertā radiosignāla jaudas, šūnas maksimālā rādiusa automatizētā aprēķina piemērs

Dots:

$P_t W := 50$	W	bāzes stacijas raidītāja jauda
$G_t := 10$		bāzes stacijas raidītāja antenas pastiprinājuma koeficients
$G_r := 1$		mobilas stacijas uztvērēja antenas pastiprinājuma koeficients
$h_t := 50$	m	bāzes stacijas antenas pacelšanas augstums
$h_r := 1$	m	mobilas stacijas antenas pacelšanas augstums
$r := 0.1, 0.11.. 20$	km	attālums starp bāzes staciju un mobilo staciju
$P_{r \min} := -100$	dBm	mobils stacijas uztvērēja jutība
$k_e := 4$		signāla izplatīšanās vide: 0 — brīvā telpa (LOS) 1 — lauki 2 — piepilsēta 3 — pilsēta 4 — lielapilsēta

Normējošie parametri:

$P_0 := 1$	mW	$h_0 := 1$	m	$\lambda_0 := 1$	m
$r_0 := 1$	km	$w_0 := 1$	m	$b_0 := 1$	m
$f_0 := 1$	MHz				

Darba viļņa garums:

$$c := 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \text{gaismas ātrums vakuumā}$$

$$\lambda(f) := \frac{c}{f \cdot 10^6} \text{ m}$$

BTS raidītāja jauda::

$$P_t := 10 \log \left(\frac{P_t W}{P_0 \cdot 10^{-3}} \right) = 46.99 \text{ dBm}$$

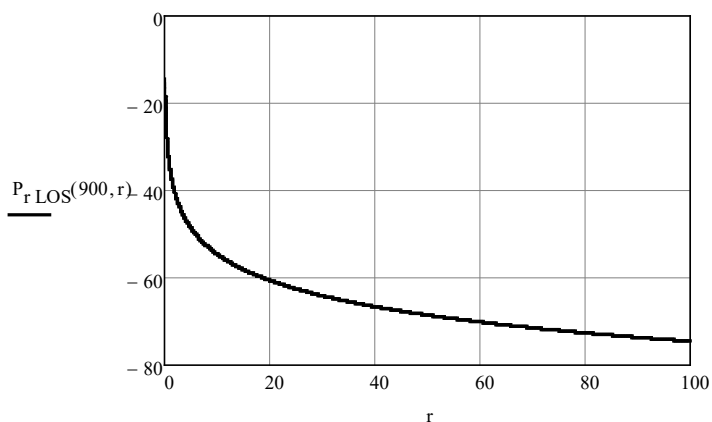
1. Vienstaru modelis (LOS):

$$P_{r\text{LOS}}(f, r) := P_t + 10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) - 20 \log(4\pi) + 20 \log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) - 20 \log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r\text{LOS}}(900, x) = P_{r\text{min}}$$

$$R_{\text{LOS}900} := \text{Find}(x) = 1.874 \times 10^3 \quad \text{km} \quad r := 0.1, 0.11.. 100 \quad \text{km}$$



2. Divstaru modelis:

$$R := 1$$

atstarošanas koeficients ($R \leq 1$)

$$\varphi := 180 \cdot \frac{\pi}{180} = 3.142 \quad \text{rad}$$

atstarošanas leņķis

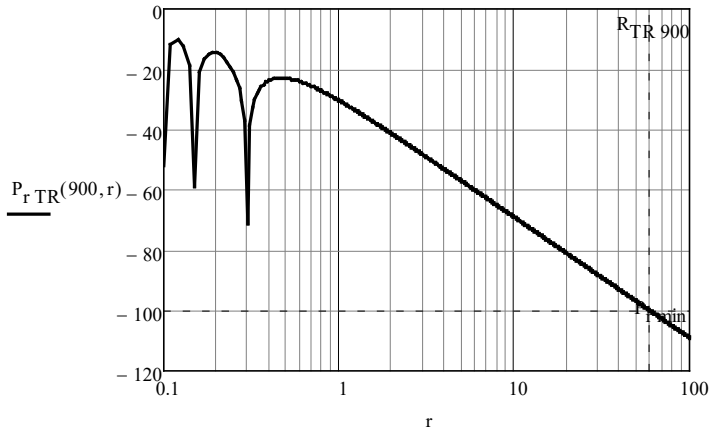
$$\psi(f, r) := 1 + R^2 + 2R \cdot \cos\left(\varphi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda(f) \cdot r \cdot 10^3}\right)$$

$$P_{r\text{TR}}(f, r) := P_{r\text{LOS}}(f, r) + 10 \log(\psi(f, r)) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r\text{TR}}(900, x) = P_{r\text{min}}$$

$$R_{\text{TR}900} := \text{Find}(x) = 59.459 \quad \text{km} \quad r := 0.1, 0.11.. 100 \quad \text{km}$$



3. Daudzstaru modelis:

$$n := 3$$

rimšanas koeficients

$$P_{rMR}(f, r) := P_t + 10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 20 \log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) - 20 \log(4\pi) - 10 \cdot n \log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) \text{ dBm}$$

Šūnas maksimālā rādus aprēķins:

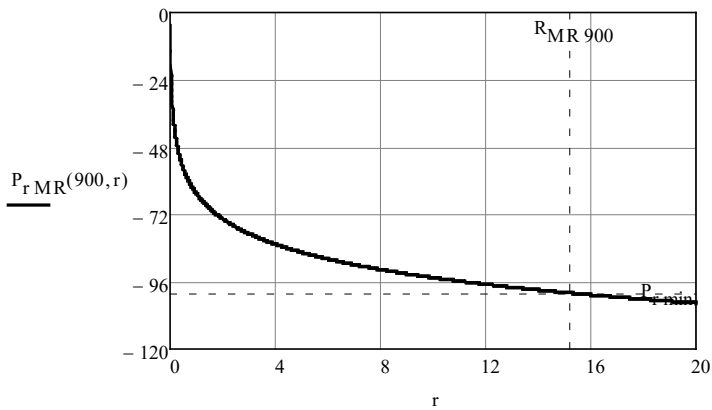
$$x := 1$$

Given

$$P_{rMR}(900, x) = P_{r \min}$$

$$R_{MR900} := \text{Find}(x) = 15.202 \quad \text{km}$$

$$r := 0.01, 0.02 \dots 20 \quad \text{km}$$



4. Lee modelis:

Nominālie parametri:

$$P_{tn0} := 10 \quad \text{W}$$

$$h_{tn0} := 30.48 \quad \text{m}$$

$$h_{m0} := 3 \quad \text{m}$$

$$f_{n0} := 900 \quad \text{MHz} \qquad r_{n0} := 1.6 \quad \text{km}$$

$$n(f) := \begin{cases} 2 & \text{if } k_e \leq 2 \vee f < 450 \\ 3 & \text{if } k_e > 2 \vee f \geq 450 \end{cases} \quad \text{frekvences korekcijas koeficients, } 2 \leq n \leq 3$$

$$v := \begin{cases} 2 & \text{if } h_r > 10 \\ 1 & \text{if } h_r < 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{MS antenas pacelšanas augstuma korekcijas koeficients}$$

$$P_{r0} := \begin{cases} -45 & \text{if } k_e \leq 0 \\ -49 & \text{if } k_e = 1 \\ -61.7 & \text{if } k_e = 2 \\ -70 & \text{if } k_e = 3 \\ -84 & \text{if } k_e \geq 4 \end{cases} \quad \text{dBm} \quad \text{nominālie zudumi nominālajā attālumā}$$

$$\gamma := \begin{cases} 2 & \text{if } k_e \leq 0 \\ 4.35 & \text{if } k_e = 1 \\ 3.84 & \text{if } k_e = 2 \\ 3.68 & \text{if } k_e = 3 \\ 3.05 & \text{if } k_e \geq 4 \end{cases} \quad \text{zudumu korekcijas koeficients}$$

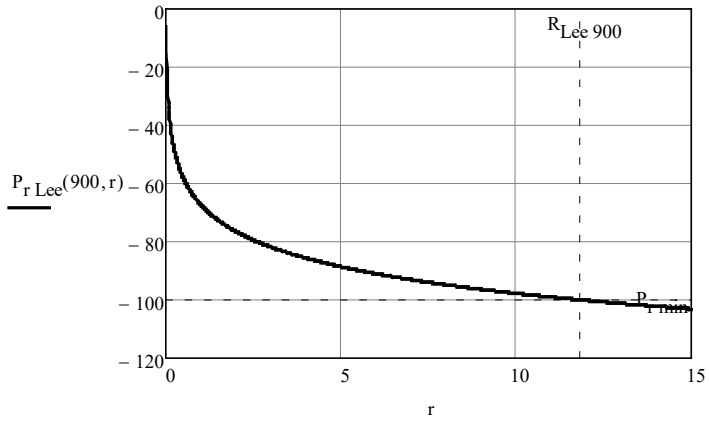
$$\alpha_0 := \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right)^v \cdot \frac{P_t W}{P_{tn0}} \cdot \frac{G_t \cdot G_r}{4} \quad \text{dBm} \quad \text{parametru korekcijas koeficients}$$

$$P_{r \text{ Lec}}(f, r) := P_{r0} - 10\gamma \log\left(\frac{r}{r_{n0}}\right) - 10 \cdot n(f) \cdot \log\left(\frac{f}{f_{n0}}\right) + 10 \log(\alpha_0) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \qquad \text{Given} \qquad P_{r \text{ Lec}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{Lee } 900} := \text{Find}(x) = 11.827 \quad \text{km} \qquad r := 0.01, 0.02.. 15 \quad \text{km}$$



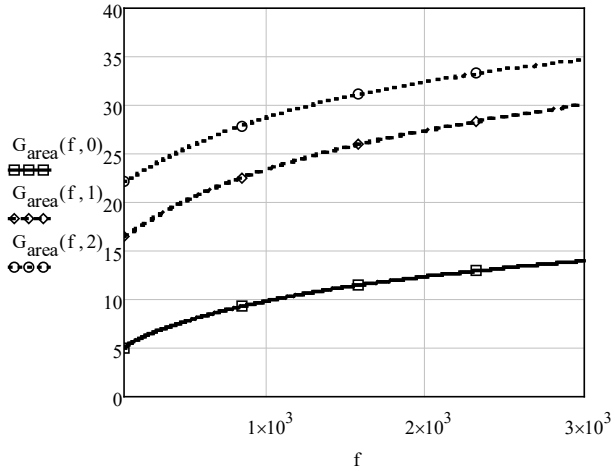
5. Okumura modelis:

Nominālie parametri:

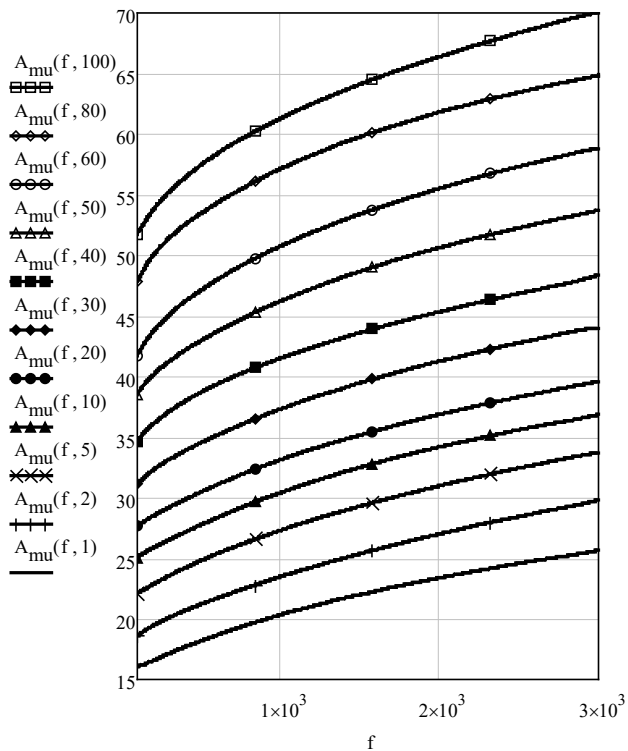
$h_{tn0} := 200$ m nominālais *BTS* antenas pacelšanas augstums

$h_{m0} := 3$ m nominālais *MS* antenas pacelšanas augstums

Signāla rimšanas korekcijas faktors atkarībā no apkārtējās vides tipa



Signāla rimšanas komponente pilsētai:



$$Hh_t := 20 \log \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right) \quad \text{dB} \quad \text{BTS antenas pastiprinājuma koeficients}$$

$$Hh_r := \begin{cases} 10 \log \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right) & \text{if } h_r \leq 3 \\ 20 \log \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right) & \text{if } 3 < h_r < 10 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{MS antenas pastiprinājuma koeficients}$$

$$P_{rOkump}(f, r) := P_{rLOS}(f, r) - A_{mu}(f, r) + Hh_t + Hh_r + G_{area}(f, k_e) \quad \text{dBm}$$

$$r_p := (1 \ 2 \ 5 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 80 \ 100)^T \quad \text{km}$$

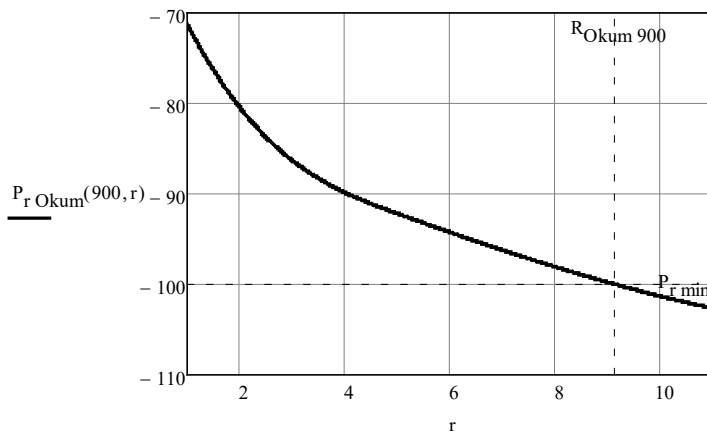
$$P_{rOkumf}(f) := \begin{cases} v \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..10 \\ v_i \leftarrow P_{rOkump}(f, r_{p_i}) \\ v \end{cases} \quad \text{dBm}$$

$$P_{rOkum}(f, r) := \text{interp}(\text{pspline}(r_p, P_{rOkumf}(f)), r_p, P_{rOkumf}(f), r) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ Okum}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{Okum } 900} := \text{Find}(x) = 9.143 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01.. 11 \quad \text{km}$$



6. Okumura–Hata modelis:

$$a(f, h_r) := \begin{cases} 8.29 \log \left(1.54 \frac{h_r}{h_0} \right)^2 - 1.1 & \text{if } 300 > f \wedge k_e > 3 \\ 3.2 \log \left(11.75 \frac{h_r}{h_0} \right)^2 - 4.97 & \text{if } 300 \leq f \wedge k_e > 3 \\ \left(1.1 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right) & \text{if } k_e \leq 3 \end{cases} \quad \text{dB}$$

labojuma koeficients MS antenas pacelšanas augstumam

$$K(f) := \begin{cases} 4.78 \log \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 - 18.33 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94 & \text{if } k_e \leq 0 \\ 2 \log \left(\frac{f}{28} \right)^2 + 5.4 & \text{if } 0 < k_e \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB}$$

zudumu komponente atkarībā no vides

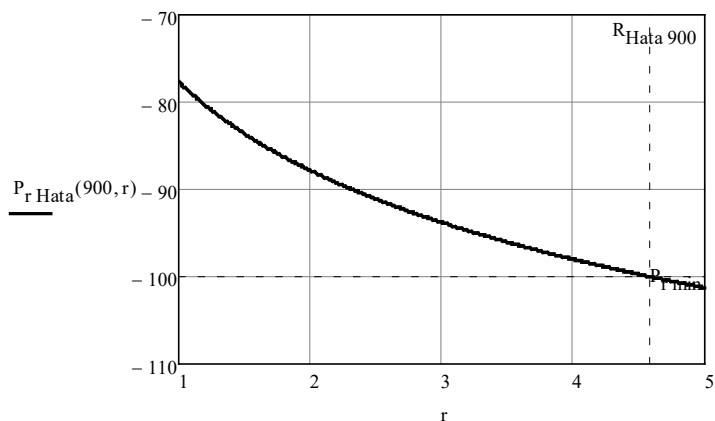
$$P_{r \text{ Hata}}(f, r) := P_t - 69.55 - 26.16 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - \left(44.9 - 6.55 \log \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right) \cdot \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \dots$$

$$+ 13.82 \log \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) + K(f) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ Hata}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{Hata } 900} := \text{Find}(x) = 4.584 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01..5 \quad \text{km}$$



7. COST 231–Hata modelis:

$$A(f) := \begin{cases} 69.55 & \text{if } 150 \leq f < 1500 \\ 46.33 & \text{if } 1500 \leq f \leq 2000 \end{cases}$$

dB zudumu pastāvīgā komponente

$$B(f) := \begin{cases} 26.16 & \text{if } 150 \leq f < 1500 \\ 33.9 & \text{if } 1500 \leq f \leq 2000 \end{cases}$$

frekvences korekcijas faktors

$$C(f) := \begin{cases} 3 & \text{if } k_e \geq 4 \\ 0 & \text{if } k_e < 4 \end{cases}$$

dB zudumu korekcijas koeficients atkarībā no apkārtējās vides

$$\alpha(f, h_r) := \left(1.1 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.8 \right)$$

dB MS antenas augstuma labojuma koeficients

$$P_{r \text{C231}}(f, r) := P_t - A(f) - B(f) \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 13.82 \log\left(\frac{h_t}{h_0}\right) \dots$$

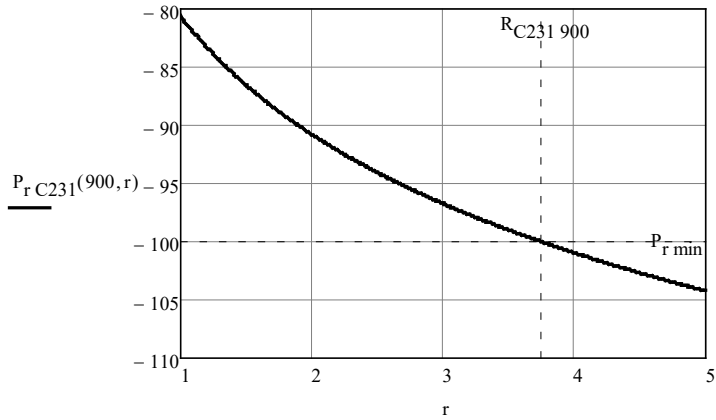
dBm

$$+ \alpha(f, h_r) - \left(44.9 - 6.55 \log\left(\frac{h_t}{h_0}\right) \right) \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - C(f)$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{C231}}(900, x) = P_{r \text{min}}$$

$$R_{\text{C231 } 900} := \text{Find}(x) = 3.748 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01..5 \quad \text{km}$$



8.1. Walfisch-Ikegami LOS modelis:

$$P_{r\ WILOS}(f, r) := P_t - 42.6 - 26 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

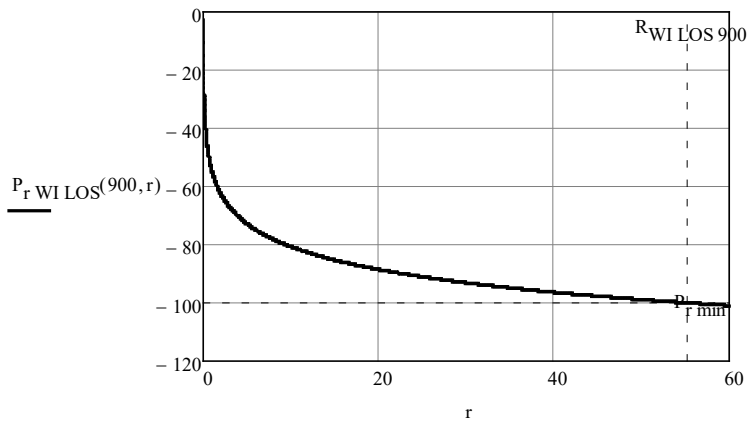
$$x := 1$$

Given

$$P_{r\ WILOS}(900, x) = P_{r\ min}$$

$$R_{WILOS\ 900} := \text{Find}(x) = 55.2 \quad \text{km}$$

$$r := 0.01, 0.02.. 60 \quad \text{km}$$



8.2. Walfisch-Ikegami NLOS modelis:

Pilsētas parametri:

$$h_B := 30 \quad \text{m}$$

ēku vidējais augstums

$$\Delta h_t := h_t - h_B = 20 \quad \text{m}$$

BTS antenas pacelšanas augstums virs ēku jumtiem

$\Delta h_r := h_B - h_r = 29$	m	attālums no MS antenas līdz ēku jumtiem
$b := 40$	m	attālums starp prefī stāvošajām ēkām
$w := 20$	m	ielu vidējais platums
$\phi := 90$	°	ielas orientācijas leņķis attiecībā pret vilni

$$L_0(f, r) := -32.45 - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad \text{dB} \quad \text{zudumi brīvajā telpā}$$

$$L_{\text{ori}} := \begin{cases} -10 + 0.354\phi & \text{if } 0 \leq \phi < 35 \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35) & \text{if } 35 \leq \phi < 55 \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55) & \text{if } 55 \leq \phi \leq 90 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{zudumi orientācijas dēļ}$$

$$L_{\text{rts}}(f, r) := 16.9 + 10 \log\left(\frac{w}{w_0}\right) - 10 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \log\left(\frac{\Delta h_r}{h_0}\right) - L_{\text{ori}} \quad \text{dB} \quad \begin{array}{l} \text{zudumi} \\ \text{difrakcijas un} \\ \text{izkliedes dēļ} \end{array}$$

$$L_{\text{bsh}} := \begin{cases} -18 \log\left(1 + \frac{\Delta h_t}{h_0}\right) & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB} \quad \begin{array}{l} \text{jaudas pastiprinājums} \\ \text{gadījumos, kad } \textit{BTS} \\ \text{antena uzstādīta virs} \\ \text{ēku jumtiem} \end{array}$$

$$k_a(r) := \begin{cases} 54 & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 54 - 0.8 |\Delta h_t| & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 |\Delta h_t| \cdot 2r & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r < 0.5 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \begin{array}{l} \text{zudumi atkarībā no} \\ \text{attāluma starp } \textit{BTS} \text{ un} \\ \text{MS un } \textit{BTS} \text{ antenas} \\ \text{pacelšanas augstuma} \end{array}$$

$$k_d := \begin{cases} 18 & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 18 - 15 \frac{|\Delta h_t|}{h_B} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{zudumu korekcijas} \\ \text{koeficients atkarībā no} \\ \text{attāluma starp } \textit{BTS} \text{ un} \\ \text{MS} \end{array}$$

$$k_f(f) := \begin{cases} -4 + 1.5 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{if } k_e \geq 4 \\ -4 + 0.7 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{difrakcijas zudumu} \\ \text{koeficients atkarībā no} \\ \text{darba frekvences} \\ \text{vērtības} \end{array}$$

$$L_{\text{msd}}(f, r) := -L_{\text{bsh}} - k_a(r) - k_d \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - k_f(f) \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 9 \log\left(\frac{b}{b_0}\right) \quad \text{dB}$$

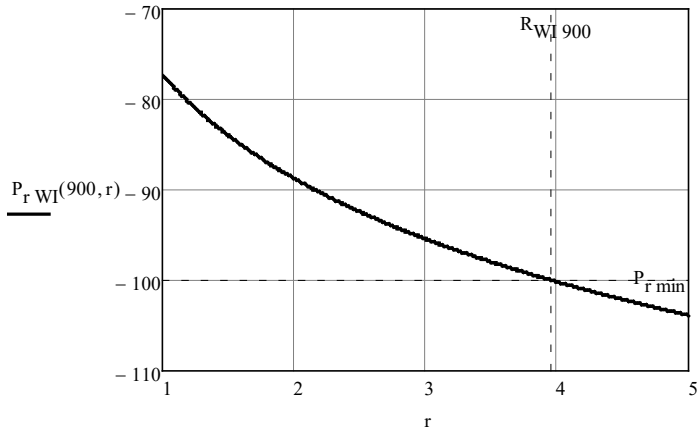
$$L_{\text{rt}}(f, r) := \begin{cases} L_0(f, r) + L_{\text{rts}}(f, r) + L_{\text{msd}}(f, r) & \text{if } L_{\text{rts}}(f, r) + L_{\text{msd}}(f, r) \leq 0 \\ L_0(f, r) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB}$$

$$P_{\text{rWI}}(f, r) := P_t + L_{\text{rt}}(f, r) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{\text{rWI}}(900, x) = P_{\text{r min}}$$

$$R_{\text{WI}900} := \text{Find}(x) = 3.962 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01.. 5 \quad \text{km}$$



9. Hata-Davidson modelis:

$$A(h_t, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 20 \\ 0.62137(r - 20) \cdot \left(0.5 + 0.15 \log\left(\frac{h_t}{121.92}\right) \right) & \text{if } 20 \leq r < 300 \end{cases} \quad \text{dB korekcijas faktori, atkarībā no attāluma starp}$$

$$S_1(r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 64.38 \\ 0.174(r - 64.38) & \text{if } 64.38 \leq r < 300 \end{cases} \quad \text{dB BTS un MS}$$

$$S_2(h_t, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } h_t < 300 \\ 0.00784 \left| \log\left(\frac{9.98}{r}\right) \right| \cdot (h_t - 300) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB korekcijas faktori, atkarībā no BTS antenas pacenšas augstuma un attāluma starp BTS un MS}$$

$$S_3(f) := \frac{f}{250 \log\left(\frac{1500}{f}\right)} \quad \text{dB korekcijas faktori, atkarībā no darba frekvenču diapazona}$$

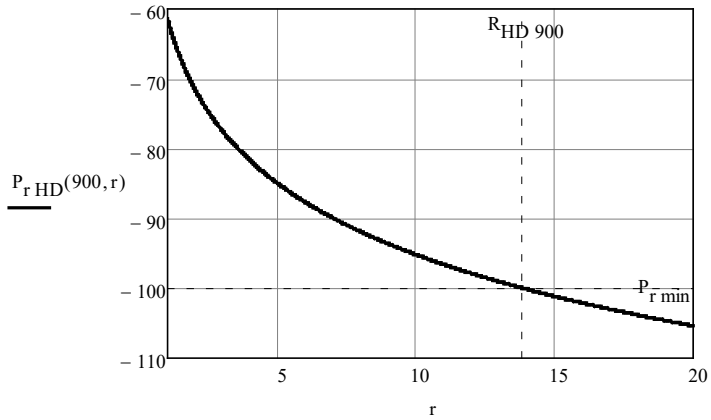
$$S_4(f, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 64.38 \\ 0.112 \log\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64.38) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB korekcijas faktori, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp BTS un MS}$$

$$P_{rHD}(f, r) := P_{rHata}(f, r) - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{rHD}(900, x) = P_{rmin}$$

$$R_{HD900} := \text{Find}(x) = 13.858 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01.. 20 \quad \text{km}$$



10. Radioviļņu izplatīšanās mežā

$$\alpha_{mF}(f) := \begin{cases} 0.185 & \text{if } f = 900 \\ 0.36 & \text{if } f = 1800 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad \text{garuma rimšanas koeficients}$$

$$\sigma(r) := 10^{0.1} \quad \text{korekcijas parametrs (virsmas viļņa ietekme)}$$

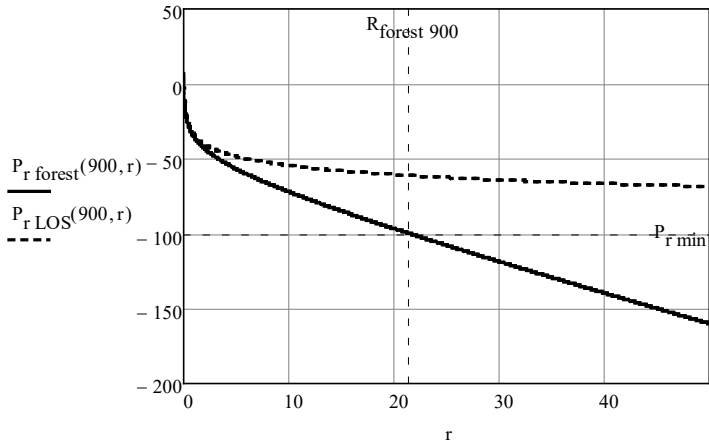
$$P_{r \text{ forest}}(f, r) := P_t + 10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) - 20 \log(4\pi) + 20 \log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) \dots$$

$$+ 10 \log(\sigma(r)) - 20 \log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) - \alpha_{mF}(f) \cdot r \cdot 10 \quad \text{dBm}$$

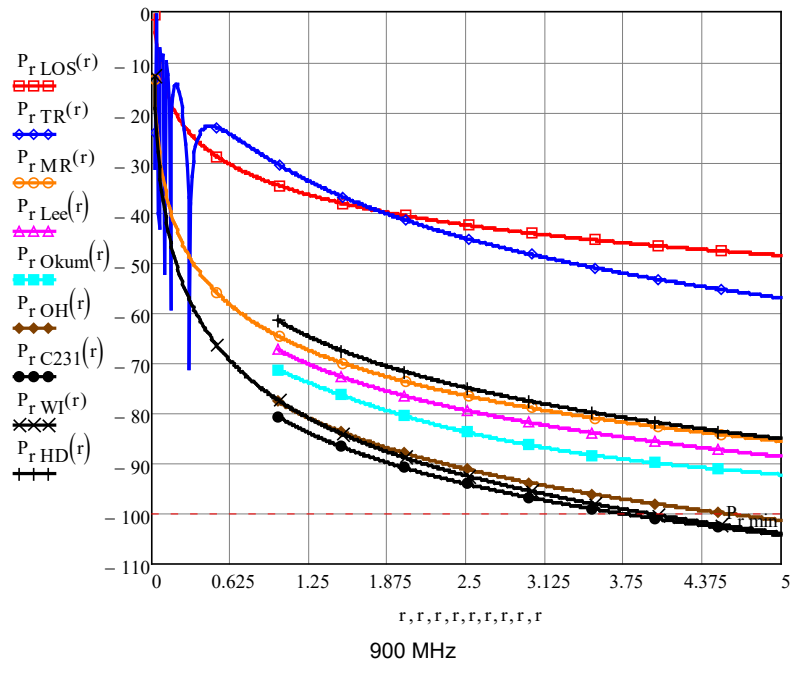
Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ forest}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{forest } 900} := \text{Find}(x) = 21.515 \text{ km} \quad r := 0.01, 0.02.. 50 \text{ km}$$



Radioviļņu izplatīšanās modeļu salīdzinājums:



Mobilā sakaru tīkla parametru aprēķināšanas piemērs

Dots:

$R := 3$	km	pārklājuma zonas rādiuss
$S := 182$	km ²	apkalpošanas zonas laukums
$S/I_{dB} := 12$	dB	vidējā signāla līmeņa attiecība pret vidējo traucējumu līmeni
$n_c := 12$		radiokanālu skaits
$\langle \lambda \rangle := 10$	izs · st ⁻¹	vidējā zvanu intensitāte
$\langle T \rangle := 1$	min	vidējais sarunu ilgums
$P_{bm} := 0.01$		uzdotā kļūmes varbūtība

1. Maksimālais šūnas radiopārklājuma zonas laukums:

$$S_m := \pi \cdot R^2 = 28 \quad \text{km}^2$$

2. Šūnu skaits apkalpošanas zonā:

$$N_c := \text{ceil} \left(\frac{S}{S_m} \right) = 7$$

3. Līdzkanālu atkārtības koeficients:

$$\frac{S/I_{dB}}{10} = 15.849$$

$$n := 3$$

$$q := \sqrt[n]{S/I} + 1 = 3.512$$

4. Šūnu skaits klasterī:

$$N_{ck} := \text{floor} \left(\frac{1}{3} \cdot q^2 \right) = 4$$

5. Klasteru skaits apkalpošanas zonā:

$$N_k := \text{ceil} \left(\frac{N_c}{N_{ck}} \right) = 2$$

6. Vidējā trafika intensitāte:

$$A_v := \langle \lambda \rangle \cdot \frac{\langle T \rangle}{60} = 0.167 \quad \text{E}$$

7. Kļūmes varbūtība (Erlanga B modelis):

$$P_b(A) := \frac{\frac{A^{n_c}}{n_c!}}{\sum_{n=0}^{n_c} \left(\frac{A^n}{n!} \right)}$$

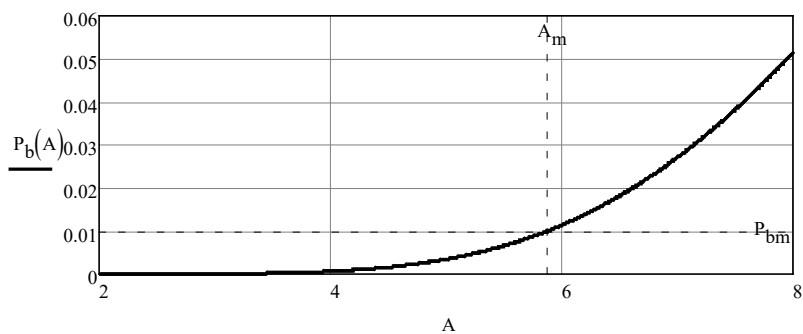
Kļūmes varbūtība pie uzdotās trafika intensitātes:

$$x := 10 \quad \text{Given} \quad P_b(x) = P_{bm}$$

$$A_m := \text{Find}(x) = 5.876$$

$$A := 2, 2.01.. 8$$

Maksimālās trafika intensitātes noteikšana, atkarībā no pieļaujamās atteikuma varbūtības:




8. Abonentu skaits vienā šūnā:

$$N_{ac} := \frac{A_m}{A_v} = 35.256$$

9. Abonentu skaits apkalpošanas zonā:

$$N_a := N_{ac} \cdot N_c = 246.791$$

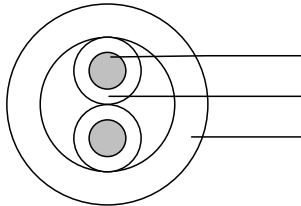
	TECHNICAL DATA SHEET	code	7701NH
		version	3
	NH (D2Y-NH 2x0.64 mm)	page	1/2

OVERVIEW CODES

Code number	Color code xxxx	Put-up yyy	Color	Put-up length	Belden-EIW part number
50006	3536	000	White	305 -0/+30 meter	BG6628.1
50006	3536	500	White	500 -0/+50 meter	BG6628.2

APPLICATION

Instrumentation and computer cables for data transmission applications.

CONSTRUCTION

. Conductor

Insulation

Conductor

Material Solid bare copper
Dimensions 0.64 mm (AWG22)

2. Insulation


Material Polyethylene
Diameter 1.17 +/- 0.05 mm
Minimum wall thickness 0.23 mm
Colors in twisted pair white/blue and blue/white; ring marking
Stranding lay 30 mm

3. Jacket

Material FRNC
Diameter 3.50 +/- 0.4 mm
Min. wall thickness 0.45 mm
Color White (like RAL 9003)

REQUIREMENTS AND TEST METHODS**Electrical:**

Nominal impedance (1-20 MHz)	100 Ohm
Nominal attenuation at 0.772 MHz	1.3 dB/100m
1 MHz	1.5 dB/100m
4 MHz	3.1 dB/100m
10 MHz	4.9 dB/100m
16 MHz	6.3 dB/100m
20 MHz	6.9 dB/100m

	TECHNICAL DATA SHEET	code	7701NH
		version	3
	7701 NH (D2Y-NH 2x0.64 mm)	page	2/2

Nominal capacitance conductor to conductor @ 1kHz 46 pF/m
 Nominal conductor DC resistance @ 20°C 55 Ohm/km
 Maximum operating voltage 300 V rms
 Maximum continuous current per conductor 2.5 A

Mechanical and physical:

Maximum pulling tension 50 N
 Minimum bending radius 80 mm
 Copper weight 5.8 kg/km
 Total weight 15.9 kg/km
 Temperature rating -15 to + 80 °C
 Flame resistance IEC 60332-3C
 Applicable specification BS 7655 Section 6.1 table 1 LTS 3

MARKING

Color code	Sheath color	RAL	Text
3536	White	9003	BELDEN 7701NH 1 PAIR 22 AWG LSNH IEC 60332-3C

Datemarking: Yes; format YYDDD, where YY = 2 digit year number, and DDD = day of the year
 Metermarking: Yes


PACKAGING

Put-up code	Put-up length	Put-up type
000	305 -0/+30 meter	Non-returnable reel
500	500 -0/+50 meter	Non-returnable reel

Each reel is labeled with the following data:
 Belden Logo. Belden code number. Item description.
 Length on the reel. Date of manufacture. CE-marking.



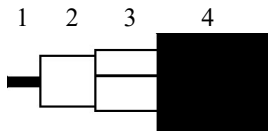
Belden CDT believes this product to be in compliance with the environmental regulations EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27 January 2003); this is valid for all material produced after the RoHS compliant date for this product.

	TECHNICAL DATA SHEET	code	CX3C1
		version	2
	COAX 3 FOAM F18 PE	page	1/2

APPLICATION

Coaxial cables used in cabled distribution networks designed according the European Standard EN 50117 operating at frequencies between 5 MHz and 2150 MHz and the International Standard IEC 1196.

CONSTRUCTION



- 1 Inner conductor Solid soft annealed copper
- 2 Dielectric Gas injected PE
- 3 Foil Copper
- 4 Sheath PE according the European Standard HD 624

REQUIREMENTS AND TEST METHODS

Test methods in accordance with European standard EN 50117-1.

Mechanical characteristics

1. Inner conductor.


Diameter:	3.38 mm ± 0.03 mm
-----------	-------------------
2. Dielectric:

Diameter:	14.9 mm ± 0.2 mm
Centricity:	≥ 0.85
Adhesion:	53 – 530 N at 50 mm
3. Outer conductor:

Diameter screen:	15.3 mm ± 0.3 mm
Foil overlap:	≥ 5 mm
4. Sheath:

Diameter:	18.00 mm ± 0.3 mm
Tensile strength	≥ 10 N/mm ²
Elongation at break:	≥ 300 %
5. Cable:

Crush resistance of cable:	< 1% (load of 700N)
Storage/operating temperature:	-40°C to +70°C

	TECHNICAL DATA SHEET	code	CX3C1
		version	2
	COAX 3 FOAM F18 PE	page	2/2

Minimum installation temperature: -5 °C
 Maximum tensile strength of cable: 1200 N
 Minimum static bend radius: 180 mm
 Total weight: 267 g/m

Electrical characteristics

Mean characteristic impedance: $75 \pm 3 \Omega$
 Regularity of impedance: $> 46 \text{ dB}$
 DC loop resistance: $\leq 4.5 \Omega/\text{km}$
 DC resistance inner conductor: $\leq 1.9 \Omega/\text{km}$
 DC resistance outer conductor: $\leq 2.6 \Omega/\text{km}$
 Capacitance: $54 \text{ pF/m} \pm 2 \text{ pF/m}$
 Velocity ratio: 0.84 ± 0.02
 Insulation resistance: $> 10^4 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$
 Voltage test of dielectric: 3 kVdc
 Screening efficiency 30-1000 MHz: $\geq 100 \text{ dB}$
 Return loss at 5-30 MHz: $\geq 26 \text{ dB}^*$
 30-470 MHz: $\geq 26 \text{ dB}^*$
 470-862 MHz: $\geq 22 \text{ dB}^*$
 862-2400 MHz: $\geq 18 \text{ dB}^*$

*Max. 3 peak values 4 dB lower than specified.

Attenuation at	Nominal	Attenuation at	Nominal
5 MHz:	0.4 dB/100m	800 MHz:	5.7 dB/100m
50 MHz:	1.3 dB/100m	1000 MHz:	6.5 dB/100m
100 MHz:	1.8 dB/100m	1350 MHz:	7.7 dB/100m
200 MHz:	2.6 dB/100m	1750 MHz:	9.0 dB/100m
400 MHz:	3.9 dB/100m	2150 MHz:	10.2 dB/100m
600 MHz:	4.8 dB/100m	2400 MHz:	10.9 dB/100m

Maximum attenuation is 10 % higher.



Belden declares this product to be in compliance with the environmental regulations EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27 January 2003); this is valid for all material produced after the RoHS compliant date for this product.

© Belden Wire & Cable B.V.

All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the written consent of the copyright owner

Detailed Specifications & Technical Data

METRIC MEASUREMENT VERSION

LT096FM Fiber - Light ArmorFor more Information
please call

1-800-Belden1

Description**Physical Characteristics (Overall):**

Fiber Type	Single Mode 125/245 Micron, Non-Dispersion Shifted
Number of Fibers	96
Core Diameter	8.3
Mode Field Diameter @ 1310nm	9.2 +/- 0.4
Mode Field Diameter @1550nm	10.5 +/- 1.0
Clad Diameter	125 +/- 1
Clad Non-Circularity	1.0% Maximum
Core-clad Concentricity Error	0.8 Microns Maximum
Primary Coating Material	Acrylate
Primary Coating Diameter	245 +/- 10
Buffer Tube Diameter	3.0
Buffer Tube Material	PBT - Polybutylene Terephthalate
Buffer Tube Filling Material	Synthetic Thixotropic Gel

Buffer Tube Color Code Chart

Number	Color
1	Blue
2	Orange
3	Green
4	Brown
5	Slate
6	White
7	Red
8	Black

Outer Jacket:

Outer Jacket Material	High Density Polyethylene
Outer Jacket Nominal Wall Thickness	.055
Outer Jacket Diameter	15.824
Outer Jacket Ripcord	Aramid
Outer Jacket Color	Black

Strength Member:

Strength Member Material	Strength Member Material
--------------------------	--------------------------

Detailed Specifications & Technical Data



METRIC MEASUREMENT VERSION

LT096FM Fiber - Light Armor

Armor Type	Corrugated
Armor Material	Steel
Armor Thickness	.006

Overall Cabling:

Overall Cabling Fillers	Foam Polypropylene
-------------------------	--------------------

Mechanical Characteristics (Overall):

Operating Temperature Range	-40°C To +75°C
Storage Temperature Range	-40°C To +75°C
Bulk Cable Weight:	220.254 Kg/Km
Min. Bend Radius (Install):	317.500 mm
Min. Bend Radius for Long Term Application:	158.750 mm
Crush Resistance	Passes TIA/EIA 455-41
Impact Resistance	Passes TIA/EIA 455-25
Solar Radiation Resistance	High
Water Penetration	Passes TIA/EIA 455-82
Compound Flow	Passes TIA/EIA 455-81
Cyclic Flexing	Passes TIA/EIA 455-105
Twist Bend	Passes TIA/EIA 455-85
Max. Load for Installation:	2668.920 N
Max. Load for Long Term Application:	600.507 N
Proof Test:	689132 kPa

Applicable Specifications and Agency Compliance (Overall):

Applicable Standards:

Other Specification	RUS PE-90 Listed
---------------------	------------------

Suitability:

Suitability – Outdoor	Excellent
Suitability – Aerial	Fair
Suitability – Burial	Excellent

Optical Characteristics (Overall):

Maximum Attenuation @ 1310nm	0.35
Maximum Attenuation @ 1550nm	0.25
Point Loss @ 1310 & 1550nm	0.1

Dispersion @ 1310nm	< 3.5
Dispersion @ 1550 nm	< 18
Dispersion Slope	< 0.092
Zero Dispersion Wavelength	1300 - 1322
PMD	< 0.5
Cutoff Wavelength	< 1260
Refractive Index @ 1310nm	1.466
Refractive Index @ 1550nm	1.467

© 2007 Belden, Inc
All Rights Reserved.

Although Belden makes every reasonable effort to ensure their accuracy at the time of this publication, information and specifications described herein are subject to error or omission and to change without notice, and the listing of such information and specifications does not ensure product availability.

Belden provides the information and specifications herein on an "AS IS" basis, with no representations or warranties, whether express, statutory or implied. In no event will Belden be liable for any damages (including consequential, indirect, incidental, special, punitive, or exemplary damages) whatsoever, even if Belden has been advised of the possibility of such damages, whether in an action under contract, negligence or any other theory, arising out of or in connection with the use, or inability to use, the information or specifications described herein.

All sales of Belden products are subject to Belden's standard terms and conditions of sale.

Belden believes this product to be in compliance with the following environmental regulations: California Proposition 65 Consent Judgment For Wire & Cable Mfgs.(San Francisco Superior Court Nos. 312962 And 320342); EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27-Jan-2003); Material manufactured prior to the compliance date may still be in stock at Belden facilities and in our Distributor's inventory; and China Ministry of Information Industry order#39 (China RoHS). EU ELV (Directive 2000/53/EC, 18-Sept-2000); EU WEEE (Directive 2002/96/EC, 27-Jan-2003); EU BFR (Directive 2003/11/EC, 6-Feb-2003). The information provided in this Product Disclosure, and the identification of materials listed as reportable or restricted within the Product Disclosure, is correct to the best of Belden's knowledge, information and belief at the date of its publication. The information provided in the Product Disclosure is designed only as a general guide for the safe handling, storage, and any other operation of the product itself or the one that it becomes a part of. This Product Disclosure is not to be considered a warranty or quality specification. Regulatory information is for guidance purposes only. Product users are responsible for determining the applicability of legislation and regulations based on their individual usage of the product.



Aleksejs Vasiljevs dzimis 1990. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu, inženiera kvalifikāciju (2015) un maģistra grādu (2016) dzelzceļa elektrosistēmās. Kopš 2015. gada strādā VAS "Latvijas dzelzceļš", ieņemot elektromontiera, elektrotehnisko iekārtu inženiera amatus. Patlaban ir VAS "Latvijas dzelzceļš" Elektrotehniskās pārvaldes Tehnoloģisko sistēmu kontroles daļas vadītājs. Zinātniskās intereses saistītas ar radioviļņu izplatīšanās matemātisko modelēšanu, dzelzceļa mikroprocesoru vadības sistēmām, šķirošanas uzkalnu automatizāciju, industriālā lietu interneta izmantošanu transporta nozarē.