



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Guntis Ancāns

RADIOFREKVENČU SPEKTRA JOSLAS 694–790 MHz IZMANTOŠANAS IESPĒJU NOVĒRTĒJUMS BEZVADU PĀRRAIDES SISTĒMĀM

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2019

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Guntis Ancāns

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**RADIOFREKVENČU SPEKTRA JOSLAS
694–790 MHZ IZMANTOŠANAS IESPĒJU
NOVĒRTĒJUMS BEZVADU PĀRRAIDES
SISTĒMĀM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Ancāns, G. Radiofrekvenču spektra joslas 694–790 MHz izmantošanas iespēju novērtējums bezvadu pārraides sistēmām. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2019. gada 3. oktobra lēmumu, protokols Nr. 46.

ISBN 978-9934-22-403-4 (print)
978-9934-22-404-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 19. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Sandis Spolītis,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Pētnieks *Dr. sc. ing.* Aleksejs Udaļcovs,
RISE Research Institutes of Sweden AB, Kista, Zviedrija

Vecākā eksperte *Dr. sc. ing.* Jūlija Asmuss,
Valsts izglītības attīstības aģentūra, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Guntis Ancāns (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 65 attēli, 43 tabulas, viens pielikums, kopā 132 lappuses, neieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 128 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Šobrīd pasaulē strauji pieaug pārraidāmo datu apjoms, un tiek prognozēts, ka mobilo datu trafiks līdz 2022. gadam pieaugs vairāk nekā divas reizes, salīdzinot ar 2019. gadu, un sasniegs 77 eksabaitus (77×10^{18} baiti) mēnesī [12]. Lai apmierinātu mobilo sakaru pakalpojumu lietotāju pieaugošo pieprasījumu pēc lielākiem datu pārraides ātrumiem un attīstītu jaunus bezvadu pakalpojumus, kā arī jaunas radiosakaru tehnoloģijas, nākotnē būs nepieciešami papildu radiofrekvenču spektra resursi. Arī esošo radiosakaru sistēmu izvēršanai būs nepieciešamas papildu frekvences. Mobilo sakaru pakalpojumu nodrošināšanai nepieciešams vienmērīgs teritorijas radiopārklājums, ko var nodrošināt, izmantojot zemāka diapazona frekvenču joslas, it īpaši frekvences zem 1 GHz.

Promocijas darba galvenais mērķis ir novērtēt 694–790 MHz (700 MHz) frekvenču joslas piemērotību platjoslas bezvadu pārraides sistēmu izmantošanai. Promocijas darbā apskatīti radiofrekvenču spektra pārvaldes aspekti, analizētas elektromagnētiskās saderības novērtējuma metodes bezvadu pārraides sistēmām, sniegts elektromagnētiskās saderības novērtējums starp dažādām radiosakaru sistēmām 700 MHz joslā un blakusjoslās, analizēta radioviļņu izplatīšanās 700 MHz joslā, kā arī izstrādātas rekomendācijas frekvenču kanālu plānam. Radiofrekvenču spektrs ir ierobežots resurss, nacionālā bagātība, kas nākotnē kļūs arvien vērtīgāks.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	10
Tēmas aktualitāte.....	10
Darba mērķis un uzdevumi	12
Pētījumu metodika.....	12
Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte	13
Promocijas darba praktiskā vērtība	14
Promocijas darba aizstāvamās tēzes.....	14
Rezultātu aprobācija	15
Darba apjoms un struktūra	18
PIRMĀ NODAĻA	19
OTRĀ NODAĻA	21
TREŠĀ NODAĻA	26
CETURTĀ NODAĻA.....	33
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	34
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	35

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

2G (*Second Generation*) – otrās paaudzes mobilie sakari
3G (*Third Generation*) – trešās paaudzes mobilie sakari
4G (*Fourth Generation*) – ceturtās paaudzes mobilie sakari
5G (*Fifth Generation*) – piektās paaudzes mobilie sakari
3GPP (*Third Generation Partnership Project*) – trešās paaudzes sadarbības projekts
5G NR (*5G New Radio*) – 5G tehnoloģija NR

A

AAS (*Active Antenna Systems*) – aktīvās antenas sistēmas
APT (*Asia-Pacific Telecommunity*) – Āzijas-Klusā okeāna telesabiedrība
ARNS (*Aeronautical Radionavigation Service*) – gaisa kuģniecības radionavigācijas dienests
ASMG (*Arab Spectrum Management Group*) – Arābu spektra pārvaldes grupa
ATU (*African Telecommunications Union*) – Āfrikas telesakaru savienība

B

BB-PPDR (*Broadband Public Protection and Disaster Relief*) – platjoslas sabiedrības drošības un katastrofu seku novēršanas sistēmas
BS (*Base Station*) – bāzes stacija

C

CA (*Carrier Aggregation*) – frekvenču nesēju apvienošana
CDMA (*Code Division Multiple Access*) – koda dales daudzpiekļuve
CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) – Eiropas pasta un telekomunikāciju administrāciju konference
CITEL (*Interamerican Telecommunication Commission*) – Starpamerikas telesakaru komisija
CIoT (*Cellular Internet of Things*) – šūnu sistēmu lietu internets
CP (*Cyclic Prefix*) – cikliskais prefikss
CQI (*Channel Quality Indicator*) – kanāla kvalitātes indikators

D

DEC (*Decision*) – lēmums
DL (*Downlink*) – lejuplīnija
dRSS (*desired Received Signal Strength*) – vēlamā uztvertā signāla stiprums
DVB-T (*Terrestrial Digital Video Broadcasting*) – zemes ciparu televīzijas apraides sistēma
DVB-T2 (*Terrestrial Digital Video Broadcasting 2*) – otrās paaudzes zemes ciparu televīzijas apraides sistēma
DTTB (*Digital Terrestrial Television Broadcasting*) – zemes ciparu televīzijas apraide

E

EB (*Exabyte*) – eksabaiti (1×10^{18} baiti)
ECC (*Electronic Communications Committee*) – Elektronisko sakaru komiteja

e. i. r. p. (Equivalent Isotropically Radiated Power) – ekvivalentā izotropiski izstarotā jauda
EK – Eiropas Komisija
eMBMS (Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services) – uzlabotie multivides apraides multiraides pakalpojumi
EMS – elektromagnētiskā saderība
EML – elektromagnētiskais lauks
eNode-B (vai eNB) – LTE bāzes stacija
ES – Eiropas Savienība
ETF – Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
ETSI (European Telecommunications Standards Institute) – Eiropas telesakaru standartu institūts
E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) – uzlabotā universālā zemes radiopieklūve

F

FDD (Frequency Division Duplex) – frekvenčdales duplekss
FDDx – *FDD* frekvenču bloka numurs

G

gNode-B (vai gNB) – *NR* bāzes stacija
GSM (Global System for Mobile Communications) – globālā mobilo sakaru sistēma

I

ILR (Interfering Link Receiver) – traucējošā tīkla uztvērējs
ILT (Interfering Link Transmitter) – traucējošā tīkla raidītājs
iRSS (interfering Received Signal Strength) – interferējošā uztvertā signāla stiprums
IMT (International Mobile Telecommunications) – starptautiskie mobilie telesakari
IMT-2020 – starptautiskie mobilie telesakari 2020 (*ITU* termins, kas apzīmē 5G)
IoT (Internet of Things) – lietu internets
ITU (International Telecommunication Union) – Starptautiskā telekomunikāciju savienība
ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector) – Starptautiskās telekomunikāciju savienības radiosakaru sektors

J

JTG-4-5-6-7 (Joint Task Group 4-5-6-7) – *ITU-R* apvienotā darba grupa 4-5-6-7

L

LTE (Long Term Evolution) – starptautisko mobilo telekomunikāciju sistēma *LTE*
LTE-A (LTE-Advanced) – *LTE* sistēmas uzlabotā versija
LTE-MTC (LTE Machine Type Communication) – *LTE* mašīnu tipa radiosakari

M

M2M (Machine-to-Machine) – mašīnas-mašīnas sakari

MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) – multivides apraides multiraides pakalpojumi

MCL (Minimum Coupling Loss) – savienojuma minimālie zudumi

MFCN (Mobile/Fixed Communications Networks) – mobilie un fiksētie sakaru tīkli. Ietver *IMT* un citus mobilā un fiksētā dienesta sakaru tīklus

MP (Medium Power) – vidējas jaudas *DVB-T/T2* raidītājs

MPEG (Moving Picture Experts Group) – kustīgu attēlu ekspertu grupa

MPEG-2 – *MPEG-2* standarts

MPEG-4 – *MPEG-4* standarts

N

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) – šaurjoslas lietu internets

ne-AAS (non-Active Antenna Systems) – neaktīvās antenas sistēmas

NMT (Nordic Mobile Telephony) – Ziemeļu mobilā telefonija

O

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – ortogonālā frekvenčdales blīvēšana

R

RCC (Regional Commonwealth in the Field of Communications) – valstu reģionālā sadraudzība sakaru jomā

RLS2 (Secondary radar RLS2) – sekundārais radars *RLS2*

RRM (Radio Resource Management) – radio resursu vadība

RSBN (Radio System for Short Range) – radio sistēma nelielam attālumam (tuvai navigācijai)

RSPG (Radio Spectrum Policy Group) – Eiropas Komisijas Radio spektra politikas grupa

RSRP (Reference Signal Received Power) – references signāla uztvertā jauda

RSRQ (Reference Signal Received Quality) – references signāla uztvertā signāla kvalitāte

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – uztvertā signāla stipruma indikators

RTU – Rīgas Tehniskā universitāte

S

SCS (Subcarrier Spacing) – apakšnesēja solis

SDL (Supplemental Downlink) – papildu lejuplīnija

SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool) – radiofrekvenču spektra inženierijas uzlabotais Montekarlo analīzes rīks

SINR (Signal to Interference Noise Ratio) – signāla un traucējumu plus trokšņa attiecība

SM – Satiksmes ministrija

SPRK – Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija

T

T_x (*Transmitter*) – raidītājs

TS (*Technical Specification*) – tehniskā specifikācija

TV – televīzija

TVWS (*Television White Spaces*) – televīzijas “baltās vietas” (neizmantotā frekvenču josla televīzijas spektrā)

U

UE (*User Equipment*) – galiekārta

UHF (*Ultra High Frequency*) – ultra augstas frekvences (decimetru viļņu diapazons)

UL (*Uplink*) – augšuplīnija

V

VARAM – Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija

VAS ES – Valsts akciju sabiedrība “Elektroniskie sakari”

VLR (*Victim Link Receiver*) – ietekmējamā tīkla uztvērējs

VLT (*Victim Link Transmitter*) – ietekmējamā tīkla raidītājs

W

Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) – bezvadu lokālais tīkls

WP 5D (*Working Party 5D*) – ITU-R darba grupa 5D

WP 6A (*Working Party 6A*) – ITU-R darba grupa 6A

WRC (*World Radiocommunication Conference*) – Pasaules radiosakaru konference

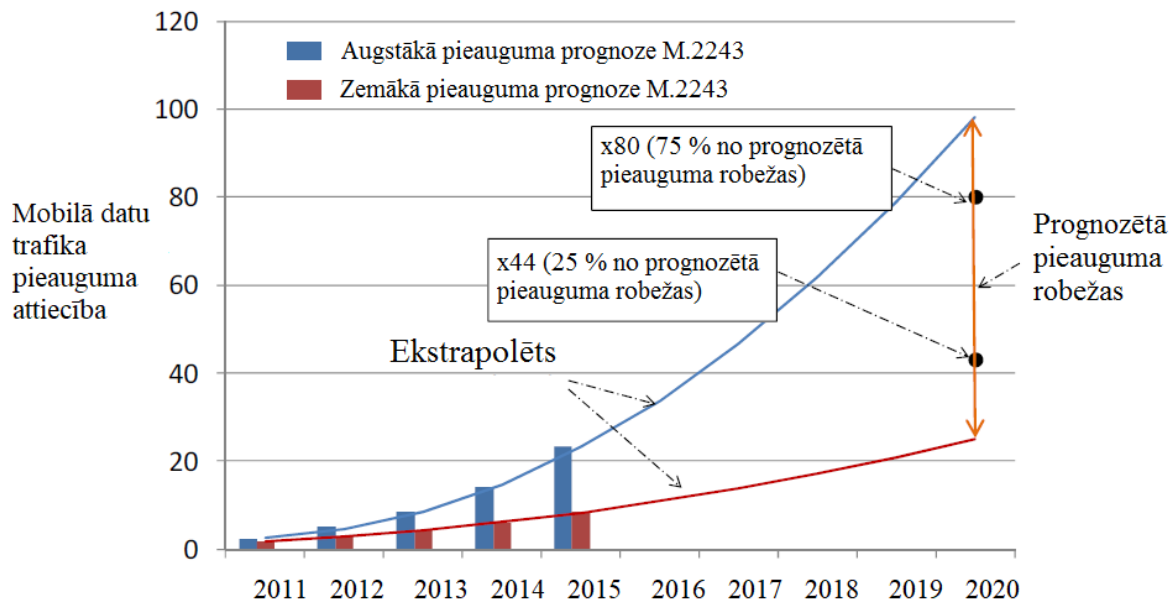
WRC-12 – 2012. gada Pasaules radiosakaru konference

WRC-15 – 2015. gada Pasaules radiosakaru konference

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Straujā informācijas aprite palielina arī datu pārraides apjomus. Saskaņā ar Starptautiskās telekomunikāciju savienības (angļ. val. *International Telecommunication Union – ITU*) pētījuma [26] datiem sagaidāms, ka datu pārraides apjoms līdz 2020. gadam būs palielinājies 25 reizes, salīdzinot ar 2010. gadu. Mūsdienās novērojama nemainīga tendence pieprasījumam pēc radiofrekvenču spektra pieejamības un pēc lielāka datu pārraides ātruma. Šāda datu pārraides apjoma nodrošināšanai starptautisko mobilo telekomunikāciju (*IMT*) sistēmām būs nepieciešams papildu radiofrekvenču spektrs, kas pēc *ITU* aprēķiniem tiek prognozēts no 1340 MHz līdz 1960 MHz. Abi šie skaitļi ietver spektru, ko jau izmanto vai plāno izmantot *IMT* sistēmām.



1. att. Mobilo datu trafika prognoze līdz 2020. gadam [26].

Ikvienu bezvadu sakaru tīkla izvēršanai ir nepieciešams radiofrekvenču spektrs, un tā nozīme mūsdienās arvien palielinās. Pietiekami spektra resursi veicina arī uz tehnoloģijām balstītu tirgus nozaru attīstību. Esošo sistēmu, kā arī jauno tehnoloģiju attīstībai būs nepieciešamas papildu frekvences. Patlaban *ITU* ir iedalījusi vairākas frekvenču joslas *IMT* sistēmām [24].

Novērots, ka mobilo sakaru jomā sistēmu paaudzes mainās ik pēc desmit gadiem. Pirmo praktiski lietojamo rokas mobilo telefonu, kas nebija paredzēts montēšanai automašīnās, izstrādāja uzņēmums *Motorola* inženiera Mārtina Kūpera vadībā (*DynaTAC 8000x*), un pirmo zvanu ar to Kūpers veica 1973. gada 3. aprīlī [28]. Tālāk sekoja *NMT* (1G) tīklu ieviešana 1981. gadā, *GSM900* sistēmas (2G) izstrāde 1990. gados, *UMTS* (3G) attīstīšana 2000. gadā, ap 2010. gadu parādījās *LTE* (4G) tīkli [10]. Šobrīd standartizācijas organizācijās norit darbs pie jaunas paaudzes mobilo sakaru tehnoloģijas 5G izstrādes, ko plāno nodot komerciālai lietošanā ap 2020. gadu.

Mobilajiem sakariem galvenokārt izmanto frekvences līdz 3 GHz. Nepieciešamā spektra pieaugums *IMT* sistēmām konkurē ar citu sistēmu un radiosakaru dienestu vajadzībām. Tādēļ nepieciešami papildu piešķirumi vai dažādu dienestu radiofrekvenču spektra pārplānošana par labu mobilajam dienestam, īpaši frekvenču diapazonos zem 1 GHz.

Esošajām 4G mobilo sakaru sistēmām, kā arī nākamās paaudzes bezvadu pārraides sistēmām (5G), nepieciešami papildu frekvenču resursi tīklu izvēršanai frekvenču joslās zem 6 GHz. Prognozējams, ka 5G sistēmas izmantos radiofrekvenču spektru gan zem 6 GHz, gan arī joslas virs 24 GHz. Mobilo sakaru tīklu kapacitātes uzlabošanu ar augstākiem datu pārraides ātrumiem šūnā iespējams panākt, zemās frekvences kombinējot ar augstākām frekvencēm.

2012. gada Pasaules radiosakaru konference (*WRC-12*) lēma par 694–790 MHz (700 MHz) joslas sadalījumu mobilajam dienestam un noteica šo joslu *IMT* sistēmām pirmajā *ITU* reģionā. Šis sadalījums stājās spēkā pēc *WRC-15* [24]. Decimetru viļņu diapazons *UHF* (470–862 MHz) vēsturiski ir lietots televīzijas apraidei. Latvijā 700 MHz joslu plānots turpināt izmantot zemes ciparu televīzijas apraidei līdz 2022. gadam. Šajā aspektā svarīgs ir arī Latvijas kaimiņvalstu lēmums par 700 MHz joslas perspektīvo izmantošanu.

Lai noteiktu 700 MHz joslas izmantošanas piemērotību platjoslas bezvadu pārraides sistēmām (*LTE* un nākamās paaudzes radiosakaru sistēmām) Latvijā, ir nepieciešams veikt elektromagnētiskās saderības novērtējumu ar 700 MHz joslā un blakusjoslās strādājošām radiosakaru sistēmām, kā arī nepieciešams novērtēt radiosignālu izplatīšanos šajā diapazonā, tajā skaitā izvērtēt starpvalstu frekvenču koordinācijas nepieciešamību.

Prognozējams, ka pirmie komerciālie 5G tīkli parādīsies 3,4–3,8 GHz joslā. Darbs pie 24,25–27,5 GHz un 700 MHz joslu perspektīvās izmantošanas bezvadu pārraides sistēmām Latvijā plānošanas turpinās [30].

5G raksturo augsti datu pārraides ātrumi, mazāka signāla laikaizture, kā arī uzlabotas iespējas dažādu vertikālo pakalpojumu (angl. val. *verticals*) attīstībai (e-veselība, autonomie automobiļi, viedās pilsētas, ražošanas procesu radio telemetrija un tālvadība, viedie skaitītāji u. c.). Prognozējams, ka līdzās 5G tīkliem darbosies arī esošie publisko mobilo sakaru tīkli (2G, 3G, 4G).

Frekvenču joslai 694–790 MHz ir šādas priekšrocības:

- frekvenču josla piemērota *ne-AAS* (pasīvajām antenām), līdz ar to bāzes staciju esošās mobilo sakaru antenas šim frekvenču diapazonam var tikt lietotas;
- 4G un 5G tehnoloģiju elektromagnētisko saderību ietekmējošo radioparametru līdzība šajā joslā;
- papildu frekvenču josla zem 1 GHz vienmērīgākam radiopārklājumam (gan lejuplīnijā, gan arī augšuplīnijā), kā arī radiopārklājuma uzlabošanai iekštelpās;
- radiotīkla plānošanai sākotnēji var tikt izvēlēti 800 MHz / 900 MHz joslu esošo bāzes staciju izvietojuma punkti;
- iespējas palielināt datu pārraides ātrumus lejuplīnijā, lietojot starpjoslu frekvenču nesēju apvienošanu (angl. val. *Carrier Aggregation – CA*);
- iespējas augšuplīnijas frekvenču kanālus kombinēt ar augstāku frekvenču diapazonu lejuplīnijas nesējiem, tādā veidā uzlabojot radiopārklājumu augstākajos frekvenču diapazonos (3,5 GHz, 26 GHz u. c.);

- iespējas dažādu jaunu pakalpojumu ieviešanai, tajā skaitā valsts funkciju nodrošināšanai, izmantojot 4G/5G tīklu platformu;
- zemāka diapazona radiofrekvenču joslas piešķiršana mobilo sakaru operatoriem var palīdzēt izvērst platjoslas interneta pakalpojumus lauku apvidos, kā arī dot iespēju uzlabot platjoslas pakalpojumu pieejamību iekštelpās, arī blīvāk apdzīvotās teritorijās.

Darba mērķis un uzdevumi

Pamatojoties uz bezvadu platjoslas sakaru sistēmu attīstības virzienu novērtējumu, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis** – novērtēt 694–790 MHz frekvenču joslas piemērotību platjoslas bezvadu pārraides sistēmu realizācijai.

Lai sasniegtu definēto mērķi, bija nepieciešams veikt vairākus **pamatuzdevumus**.

1. Novērtēt radiofrekvenču spektra pārvaldes galvenos principus, piemērojamus starptautiski un Latvijā, kā arī novērtēt 694–790 MHz radiofrekvenču spektra joslas un blakusjoslu pašreizējo regulējumu atbilstoši *ITU*, *CEPT*, ES un Latvijas tiesību aktiem.
2. Veikt esošo un perspektīvo radiosakaru sistēmu (*LTE*, *DVB-T/T2*, *ARNS RSBN*, *5G NR*, *M2M/IoT*) apskatu un analīzi, izmantojamu 700 MHz radiofrekvenču spektra joslā un/vai blakusjoslās.
3. Izmantojot matemātiskus aprēķinus, datorsimulācijas un eksperimentālos mērījumus, veikt elektromagnētiskās saderības novērtējumu starp platjoslas bezvadu pārraides sistēmām (*LTE*) un zemes ciparu televīzijas apraides sistēmu (*DVB-T*) 700 MHz joslā un blakusjoslā.
4. Izmantojot matemātiskus aprēķinus un datorsimulācijas, veikt elektromagnētiskās saderības novērtējumu starp *LTE* un gaisa kuģniecības radionavigācijas sistēmām (*ARNS RSBN*) 700 MHz joslā.
5. Izmantojot datorsimulācijas, veikt elektromagnētiskās saderības novērtējumu starp *LTE* sistēmām 700 MHz joslā.
6. Izmantojot datorsimulācijas un eksperimentālos mērījumus, veikt 700 MHz frekvenču joslas radiosignālu izplatīšanās novērtējumu *LTE* sistēmai Latvijas pierobežā.
7. Novērtēt iegūtos rezultātus un rekomendēt 700 MHz joslai frekvenču kanālu plānu platjoslas bezvadu pārraides sistēmu lietošanai Latvijā.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, datorsimulācijas un eksperimentālie mērījumi reālos apstākļos.

Elektromagnētiskās saderības novērtēšanai starp platjoslas bezvadu pārraides sistēmām (*LTE*) un zemes ciparu televīzijas apraides sistēmu (*DVB-T/DVB-T2*) 700 MHz joslā un blakusjoslā, starp *LTE* un gaisa kuģniecības radionavigācijas sistēmām (*ARNS RSBN*) 700 MHz joslā, starp *LTE* sistēmām 700 MHz joslā tika pielietoti matemātiskie aprēķini, datorsimulācijas ar *SEAMCAT* programmatūru.

Papildus elektromagnētiskās saderības novērtēšanai starp platjoslas bezvadu pārraides sistēmām (*LTE*) un zemes ciparu televīzijas apraides sistēmu (*DVB-T*) 700 MHz joslā un blakusjoslā tika veikti eksperimentālie mērījumi ar VAS “Elektroniskie sakari” mērlaboratoriju.

700 MHz radiofrekvenču joslas *LTE* signālu izplatīšanās analīzei atbilstoši Latvijas reljefam un *LTE* bāzes staciju radītā elektromagnētiskā lauka intensitātes novērtēšanai tika veiktas datorsimulācijas ar *Akis-R* programmatūru, kā arī veikti eksperimentāli mērījumi ar VAS “Elektroniskie sakari” mērlaboratoriju konkrētos mērījumu punktus.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāti analītiskie modeļi (scenāriji) promocijas darbā apskatīto radiosakaru sistēmu elektromagnētiskās saderības pētīšanai ar *MCL* un *SEAMCAT* Montekarlo metodēm, un noteikti elektromagnētiskās saderības kritēriji.
2. Iegūti jauni teorētiskie un eksperimentālie rezultāti *LTE* radiosignālu izplatīšanās 700 MHz frekvenču joslā novērtēšanai atbilstoši Latvijas reljefam pierobežā.
3. Izstrādāta metode bāzes stacijas signālu izplatīšanās novērtēšanai konkrētā sektorā. Iegūts apstiprinājums radioviļņu izplatīšanās prognozēšanas modeļa *ITU-R P.1546-5* piemērotībai 700 MHz joslai bezvadu sakaru sistēmām Latvijas reljefam pierobežā.
4. Izstrādāta rekomendācija 700 MHz joslas frekvenču kanālu plānam platjoslas bezvadu pārraides sistēmām Latvijā.

Promocijas darba galvenie secinājumi

1. Lai nodrošinātu EMS starp blakusjoslā strādājošo *DVB-T* lielas jaudas raidītāju un uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām (pie 9 MHz frekvenču atdalījuma), saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem minētās radioiekārtas jāuzstāda 13 km ($\pm 3,5$ km) attālumā.
2. Starp *LTE* bāzes stacijām un *ARNS RSBN* zemes uztverošajām radioiekārtām, strādājošām 700 MHz joslā kopkanālā, saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem ir iespējams nodrošināt EMS. Radioiekārtu atdalījumam apskatītajā scenārijā ir jābūt 112 km (± 9 km).
3. Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem EMS nodrošināšanai starp bezvadu pārraides tīkliem (*LTE*) nepieciešamais atdalījums kopēja frekvenču kanāla lietošanas gadījumā ir 26 km (± 4 km).
4. Bāzes stacijas signālu izplatīšanās novērtēšanai konkrētā sektorā ar mērķi savstarpēji salīdzināt EML intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātus, nepieciešami 3–4 mērījumu punkti, turklāt teorētisko aprēķinu rezultātu precizitāti ietekmē pieejamo topogrāfisko un zemes virsmas seguma karšu kvalitāte un izšķirtspēja. Radioviļņu izplatīšanās prognozēšanai 700 MHz joslā ir piemērojams modelis *ITU-R P.1546-5*.

5. Eksperimentālie mērījumi apstiprināja teorētiskos rezultātus par *DVB-T* stacijas ietekmi uz uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām kopkanālā, jo mērījumu laikā *LTE* bāzes stacijā tika novēroti radiotraucējumi no 94 km attālumā esošās zemes televīzijas apraides stacijas (*MP*). Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem nepieciešamais atdalījums starp raidošo *DVB-T* staciju (*MP*) un uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām kopkanālā ir 278 km.
6. Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem, piemērojot radiotraucējumus mazinošus paņēmienus, nepieciešamo atdalījumu starp raidošām *LTE700* bāzes stacijām un *DVB-T/T2* uztvērējiem kopkanālā var attiecīgi samazināt no 152 km un 159 km līdz 82 km un 88 km.
7. Saskaņā ar eksperimentālo mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātiem var secināt, ka 700 MHz frekvenču josla ir piemērota platjoslas bezvadu pārraides sistēmu realizācijai, tajā skaitā plaša radiopārklājuma nodrošināšanai.

Promocijas darba praktiskā vērtība

Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti tika ņemti vērā rekomendācijas izstrādē, plānojot 700 MHz joslas izmantošanu Latvijā, un priekšlikumu sagatavošanā Nacionālā radiofrekvenču plāna grozījumiem.

Promocijas darbā iegūto rezultātu izmantošana

1. Izstrādājot VAS “Elektroniskie sakari” dokumentu “700 MHz joslas izmantošanas iespējas mobiliem sakariem”, kas tika iesniegts Latvijas Republikas Satiksmes ministrijai.
2. Izstrādājot VAS “Elektroniskie sakari” dokumentu “Konceptija nākotnes platjoslas mobilo sakaru 5G ieviešanai”, sagatavojot rekomendācijas 700 MHz frekvenču kanālu plānam mobilajiem sakariem
3. Sagatavojot VAS “Elektroniskie sakari” priekšlikumus mobilo sakaru sistēmu lietošanas nosacījumiem 700 MHz joslā pierobežā (frekvenču koordinācijas vienošanās).
4. Izstrādājot VAS “Elektroniskie sakari” metodiku mobilo sakaru tīklu teorētiskā radiopārklājuma aprēķiniem, metodikas vadlīnijas publicētas *CEPT ECC* ziņojumā 231 “*Mobile coverage obligations*”.

Promocijas darba aizstāvamās tēzes

1. Minimālais nepieciešamais atdalījums starp blakusjoslā strādājošo *DVB-T* lielas jaudas raidītāju un uztverošo *LTE700* bāzes staciju pie 9 MHz frekvenču atdalījuma ir 13 km ($\pm 3,5$ km).
2. Elektromagnētiskās saderības nodrošināšanai nepieciešamais atdalījums starp *LTE* bāzes stacijām un *ARNS RSBN* zemes uztverošajām iekārtām, strādājošām 700 MHz joslā kopkanālā, ir 112 km (± 9 km).

3. Bezvadu sakaru tīklu elektromagnētiskās saderības nodrošināšanai nepieciešamais atdalījums starp *LTE700* bāzes stacijām kopēja frekvenču kanāla lietošanas gadījumā ir 26 km (± 4 km) pie *LTE* tīkla šūnas caurlaidspējas vidējiem zudumiem 5 %.
4. Bāzes stacijas signālu izplatīšanās novērtēšanai konkrētā sektorā ar mērķi savstarpēji salīdzināt EML intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātus nepieciešami 3–4 mērījumu punkti, turklāt teorētisko aprēķinu rezultātu precizitāti ietekmē pieejamo topogrāfisko un zemes virsmas seguma karšu kvalitāte un izšķirtspēja. Radioviļņu izplatīšanās prognozēšanai 700 MHz joslā ir piemērojams modelis *ITU-R P.1546-5*.

Šajā promocijas darbā norādītās vērtības (\pm km) atbilst mērījumu precizitātei ± 3 dB, kas iegūtas, veicot attiecīgu datorsimulāciju pārrēķinus (skatīt arī Kopsavilkuma trešo nodaļu).

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti 10 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti deviņās publikācijās zinātniskajos žurnālos, piecās publikācijās pilna teksta konferenču rakstu krājumos, vienā nodaļā zinātniskajā monogrāfijā.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Osis N. Analysis on Interference Impact of 4G/5G in 450 MHz on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Ķīna**, Ksiamena, 17.–20. decembris, 2019 (apstiprināta publicēšanai).
2. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Investigation of Electromagnetic Compatibility between DVB-T/T2 and LTE700 for Co-channel Case // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Singapūra**, Singapūra, 19.–22. novembris, 2017. (Scopus).
3. **Ancans G.**, Sharashidze T., Bobrovs V. Electromagnetic Compatibility Assessment of LTE700 Networks for Co-channel Case // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Krievija**, Sankt-Pēterburga, 22.–25. maijs, 2017. (Scopus).
4. **Ancans G.**, Bobrovs V. Evaluation of LTE Broadcast Use in the 470–694 MHz Band // *Riga Technical University 57th International Scientific Conference*. **Latvija**, Rīga, 14.–18. oktobris, 2016.
5. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Evaluation of LTE700 and DVB-T and DVB-T2 Electromagnetic Compatibility for Co-channel Case // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Ķīna**, Šanhaja, 8.–11. augusts, 2016. (Scopus).
6. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ivanovs G. Evaluation of LTE and Aeronautical Radionavigation Service Electromagnetic Compatibility in 694–790 MHz Frequency Band // *20th International Conference ELECTRONICS 2016*. **Lietuva**, Palanga, 13.–15. jūnijs, 2016. (Scopus, Web of Science).
7. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ancans A. Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Wireless*

- Telecommunications Symposium (WTS 2016). Global Wireless Communications: Europe and Beyond. Lielbritānija*, Londona, 18.–20. aprīlis, 2016. (Web of Science).
8. **Ancans G.**, Stankevicius, E., Bobrovs, V., Paulikas, S. Evaluation of LTE700 and DVB-T Electromagnetic Compatibility in Adjacent Frequency Bands // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Čehija*, Prāga, 6.–9. jūlijs, 2015. (Scopus).
 9. **Ancans G.**, Bobrovs V. Assessment of Spectrum Considerations for 5G Mobile Broadband Communication Systems // *Riga Technical University 56th International Scientific Conference. Latvija*, Rīga, 14.–16. oktobris, 2015.
 10. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Assessment of DVB-T Compatibility with LTE in Adjacent Channels in 700 MHz Band // *19th International Conference ELECTRONICS 2015. Lietuva*, Palanga, 15.–19. jūnijs, 2015. (Scopus, Web of Science).
 11. **Ancans G.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Evaluation of 700 MHz Band Use for Land Mobile Service // *Riga Technical University 55th International Scientific Conference. Latvija*, Rīga, 14.–16. oktobris, 2014.

Nodaļa zinātniskajā monogrāfijā

1. **Ancans G.**, Bobrovs V. Spectrum Usage for 5G Mobile Communication Systems and Electromagnetic Compatibility with Existent Technologies. In: *Broadband Communications Networks – Recent Advances and Lessons from Practice*. Haidine A., Aqqal A., ed. **London**: IntechOpen, 2018, pp. 27–41. ISBN 978-1-78923-742-9.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. Ancans A., Petersons E., **Ancans G.**, Stetjuha M., Ipatovs A., Stankevicius E. Technical and Economic Analysis of Transport Telecommunication Infrastructure // *Procedia Computer Science*. 2019, No. 149, pp. 206–214. (Scopus, Web of Science).
2. Ancans A., Bogdanovs N., Petersons E., **Ancans G.**, Umanskis A., Vishnevskiy V. Evaluation of Wi-Fi and LTE Integrated Channel Performance with Different Hardware Implementation for Moving Objects // *Procedia Computer Science*. 2017, Vol. 104, pp. 493–500. (Scopus, Web of Science).
3. **Ancans G.**, Stafecka A., Bobrovs V., Ancans A., Caiko J. Analysis of Characteristics and Requirements for 5G Mobile Communication Systems // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2017, Vol. 54, Iss. 4, pp. 69–78. (Scopus).
4. **Ancans G.**, Bobrovs V., Ancans A., Kalibatiene D. Spectrum Considerations for 5G Mobile Communication Systems // *Procedia Computer Science*. 2017, Vol. 104, pp. 509–516. (Scopus, Web of Science).
5. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ivanovs G. Evaluation of LTE and Aeronautical Radionavigation Service Electromagnetic Compatibility in 694–790 MHz Frequency Band // *Elektronika ir elektrotehnika*. 2016, Vol. 22, No. 6, pp. 99–103. (Scopus, Web of Science).

6. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ancans A. Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*. 2016, Vol. 8, Iss. 1, pp. 35–44. (Web of Science).
7. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Assessment of DVB-T Compatibility with LTE in Adjacent Channels in 700 MHz Band // *Elektronika ir elektrotechnika*. 2015, Vol. 21, No. 4, pp. 73–77. (Scopus, Web of Science).
8. **Ancans G.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Frequency Arrangement for 700 MHz Band // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2015, Vol. 52, Iss. 1, pp. 52–67. (Scopus).
9. **Ancans G.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Spectrum Usage in Mobile Broadband Communication Systems // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2013, Vol. 50, Iss. 3, pp. 49–58. (Scopus).
10. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ivanovs G. Estimation of Electromagnetic Compatibility Between DVB-T/DVB-T2 and 4G/5G in the 700 MHz band for Co-channel Case // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* (iesniegts publicēšanai).

Publikācijas pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Osis N. Analysis on Interference Impact of 4G/5G in 450 MHz on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Kīna**, Ksiamena, 17.–20. decembris, 2019 (apstiprināta publicēšanai).
2. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Investigation of Electromagnetic Compatibility between DVB-T/T2 and LTE700 for Co-channel Case // *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS - FALL 2017)*. Singapore, Singapore, 19–22 November, 2017, pp. 875–878. (Scopus).
3. **Ancans G.**, Sharashidze T., Bobrovs V. Electromagnetic Compatibility Assessment of LTE700 Networks for Co-channel Case // *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017)*. Russia, Saint Petersburg, 22–25 May, 2017, pp. 2511–2514. (Scopus, Web of Science).
4. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V. Evaluation of LTE700 and DVB-T and DVB-T2 Electromagnetic Compatibility for Co-channel Case // *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016 Shanghai)*. China, Shanghai, 8–11 August, 2016, pp. 4253–4257. (Scopus).
5. **Ancans G.**, Stankevicius E., Bobrovs V., Ancans A. Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Proceedings of Wireless Telecommunications Symposium (WTS 2016)*. *Global Wireless Communications: Europe and Beyond*. United Kingdom, London, 18–20 April, 2016, pp. 13. (Web of Science).
6. **Ancans G.**, Stankevicius, E., Bobrovs, V., Paulikas, S. Evaluation of LTE700 and DVB-T Electromagnetic Compatibility in Adjacent Frequency Bands // *Proceedings*

of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015). Czech Republic, Prague, 6–9 July, 2015, pp. 585–589. (Scopus).

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 132 lappuses. Darbā ir ievads, četras nodaļas, nobeigums, izmantotās literatūras saraksts un pielikums.

Darba pirmajā nodaļā veikta radiofrekvenču spektra pārvaldes aspektu analīze un dots mobilo sakaru attīstības virzienu novērtējums. Dots pārskats par 694–790 MHz joslas regulējumu starptautiski un Latvijā.

Darba otrā nodaļa ir veltīta elektromagnētiskās saderības novērtējuma metožu bezvadu pārraides sistēmām apskatam, ka arī esošo un perspektīvo radiosakaru sistēmu apskatam.

Darba trešajā nodaļā dots bezvadu pārraides sistēmu elektromagnētiskās saderības novērtējums starp dažādām radiosakaru sistēmām 700 MHz joslā un blakusjoslā, kā arī radiopārklājuma novērtējums 700 MHz joslā.

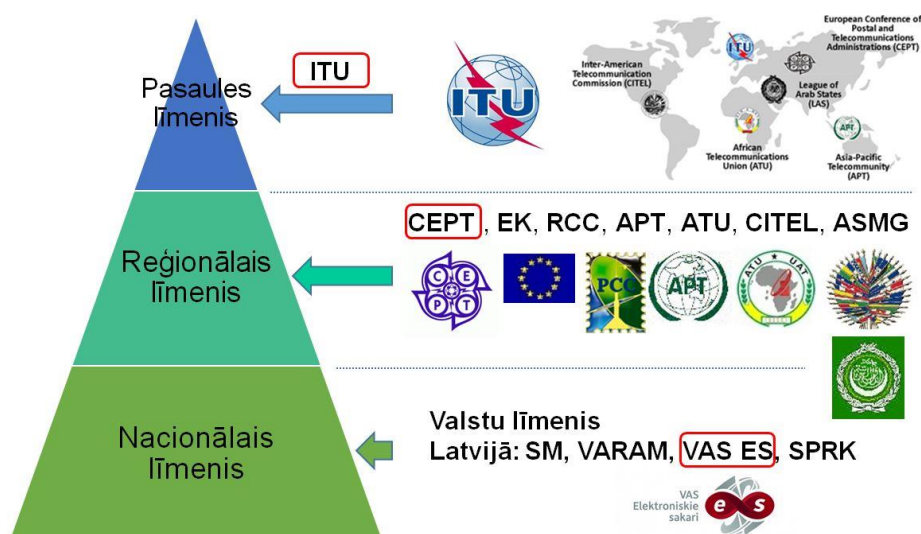
Darba ceturtajā nodaļā ir dota bezvadu pārraides sistēmu izmantošanas plānojuma 694–790 MHz joslai realizācija.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti. Nobeigumā apkopoti un pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumā ir pievienoti zinātnisko konferenču, publikāciju saraksti.

PIRMĀ NODAĻA

Promocijas darba **pirmajā nodaļā** ir dota radiofrekvenču spektra pārvaldes (starptautiski un Latvijā) aspektu analīze un mobilo sakaru attīstības virzienu novērtējums un tendences.

Pamatojoties uz **1.1. apakšnodaļā** veikto analīzi, ņemot vērā radiofrekvenču spektra resursa ierobežotību, piekļuvi radiofrekvenču spektram regulē gan nacionālā, gan arī starptautiskā līmenī (reģionālā un pasaules līmenī). Radiofrekvenču spektra pārvaldes organizēšanas ilustratīvs piemērs dots 1.1. att. Viens no radiofrekvenču spektra izmantošanas pārvaldes sistēmas elementiem, no kura veiksmīgas realizēšanas ir atkarīga visas pārvaldes sistēmas darbības efektivitāte, ir radiofrekvenču spektra plānošana [5], [14].



1.1. att. Radiofrekvenču spektra pārvaldes organizēšana.

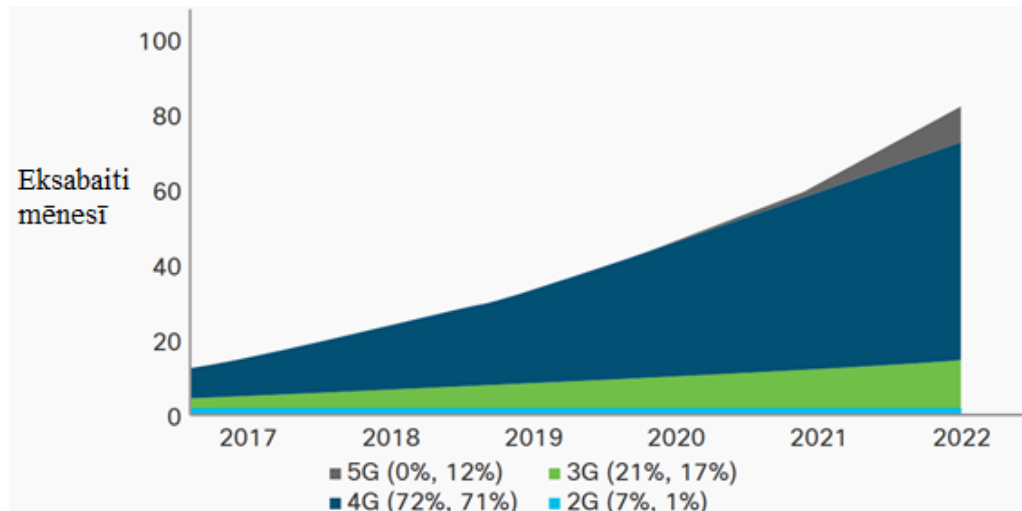
Radiofrekvenču spektra pārvalde ietver trīs svarīgas jomas: radiofrekvenču spektra sadalījuma (izmantošanas) plānošanu; radiofrekvenču spektra lietošanai nepieciešamo tehnisko nosacījumu izstrādi; radiofrekvences piešķirumu noteikšanu radioiekārtām. Pie radiofrekvenču spektra pārvaldes pieskaitāms arī radiofrekvenču spektra radiomonitorings, radiofrekvenču spektra uzraudzības un pārkāpumu novēršanas preventīvie pasākumi.

Pasaules mērogā būtiska loma radiofrekvenču spektra pārvaldē ir Starptautiskās telekomunikāciju savienības Radiosakaru sektoram (angl. val. *ITU Radiocommunication Sector – ITU-R*), tā misija ir nodrošināt racionālu, objektīvu, efektīvu un ekonomisku radiofrekvenču spektra izmantošanu starp visiem radiosakaru dienestiem, veikt pētījumus un apstiprināt rekomendācijas (ieteikumus) radiosakaru jomā. *ITU-R* primārais mērķis ir nodrošināt no radiotraucējumiem brīvu radiosakaru sistēmu darbību [33].

Reģionālā līmenī Eiropā radiofrekvenču pārvaldi veic Eiropas pasta un telekomunikāciju administrāciju konference (*CEPT*), kā arī Eiropas Savienības iestādes, kas atbild par radiofrekvenču spektra izmantošanas jautājumiem.

Radiofrekvenču spektra pārvaldi Eiropā valstu līmenī veic atbilstošās valsts institūcijas. Latvijā radiofrekvenču spektra pārvaldi elektronisko sakaru nozarē atbilstoši savai kompetencei nodrošina VAS “Elektroniskie sakari” (VAS ES).

Saskaņā ar **1.2. apakšnodaļā** doto *Cisco* prognozi [12] 4G tīkli turpinās strauju izaugsmi un tiks izvērsti ātrāk nekā citi tīkli, lai gan līdz 2022. gadam nedaudz samazināsies pārraidīto mobilo datu trafika procentuālā daļa no visa mobilo datu trafika, kas sastādīs 71%. 2022. gadā 12 % no visa mobilo datu trafika tiks pārraidīti 5G tīklos, 17 % – 3G tīklos un tikai 1 % trafika tiks pārraidīti ar 2G tīklu palīdzību (sk. 1.2. att.).



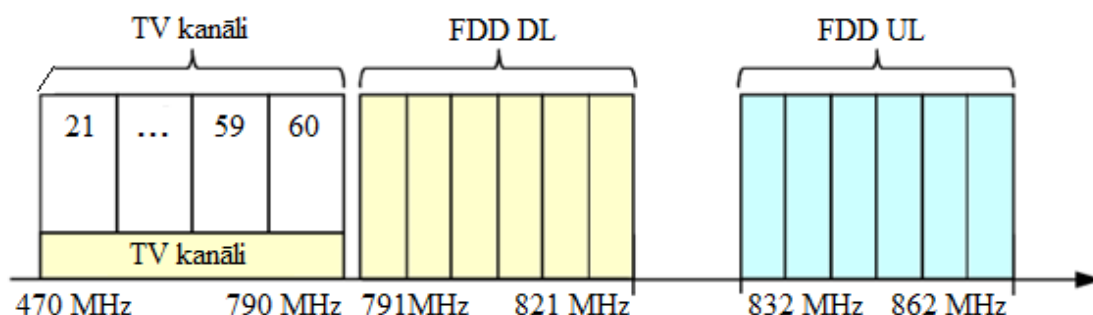
1.2. att. Mobilo datu trafika pārraides prognoze pēc tīkla tipa.

Saskaņā ar **1.3. apakšnodaļā** doto novērtējumu Pasaules radiosakaru konference (*WRC-12*) lēma par 694–790 MHz (700 MHz) joslas sadalījumu mobilajam dienestam *ITU* pirmajā reģionā, izņemot gaisa kuģniecības mobilo, uz primāra pamata, līdzās citiem dienestiem, kuriem šī josla jau ir sadalīta. Josla tika iedalīta arī *IMT* [5].

Ņemot vērā radioviļņu izplatīšanās īpatnības, lai samazinātu kaitīgos radiotraucējumus starp kaimiņvalstīm, nepieciešama frekvenču koordinēta izmantošana, it īpaši pierobežas zonās. Tādā veidā tiek uzlabota radiofrekvenču spektra izmantošanas efektivitāte.

Nosakot mobilā dienesta ieviešanas termiņus 700 MHz joslā Eiropas Savienībā, dalībvalstīm būtu jāņem vērā frekvenču koordinācijas iespējamie sarežģījumi starp mobilo un apraides dienestu un gaisa kuģniecības radionavigācijas sistēmām, kā arī valstu nacionālā situācija.

700 MHz josla Latvijas Nacionālajā radiofrekvenču plānā [23] pašlaik ir iedalīta zemes ciparu televīzijas apraidei, un līdz 2022. gadam nav paredzēta tās lietojuma maiņa (1.3. att.).



1.3. att. *UHF* radiofrekvenču spektra sadalījums Latvijā.

OTRĀ NODAĻA

Promocijas darba **otrajā nodaļā** apskatītas esošās un perspektīvās radiosakaru sistēmas 694–790 MHz joslā un blakusjoslās, kā arī dota elektromagnētiskās saderības novērtējuma metožu analīze radiosakaru sistēmām.

Promocijas darba **2.1. apakšnodaļā** analizētas esošās un perspektīvās radiosakaru sistēmas 694–790 MHz joslā un blakusjoslās.

LTE pēdējos gados ir kļuvusi par vienu no plašāk izmantotajām platjoslas tehnoloģijām mobilo šūnu sakaru tīklos. Salīdzinājumā ar pirmajiem mobilo ciparu šūnu sakaru tīkliem (*GSM*), kas pirms vairāk nekā 25 gadiem sākotnēji atbalstīja tikai balss sakarus, atšķirība pakalpojumu piedāvājumā ir ievērojama. *LTE* tehnoloģija ir tās ieviešanas attīstības stadijā, līdztekus *LTE* standarta papildinājumiem *3GPP* notiek darbs arī pie nākamās paaudzes 5G mobilo sakaru standartu izstrādes. *LTE* kopā ar jaunākajiem *3GPP* standartiem nākotnē nodrošinās 5G bezvadu piekļuvi [13].

LTE sistēmā ir četri pamata radio resursu vadības (*RRM*) mērījumu parametri – kanāla kvalitātes indikators (*CQI*), references signāla uztvertā jauda (*RSRP*), references signāla uztvertā signāla kvalitāte (*RSRQ*) un uztvertā signāla intensitātes indikators (*RSSI*). Kanāla kvalitātes mērījums, ko reprezentē signāla attiecība pret traucējumiem plus troksnis, tiek izmantoti minēto parametru mērījumi [29].

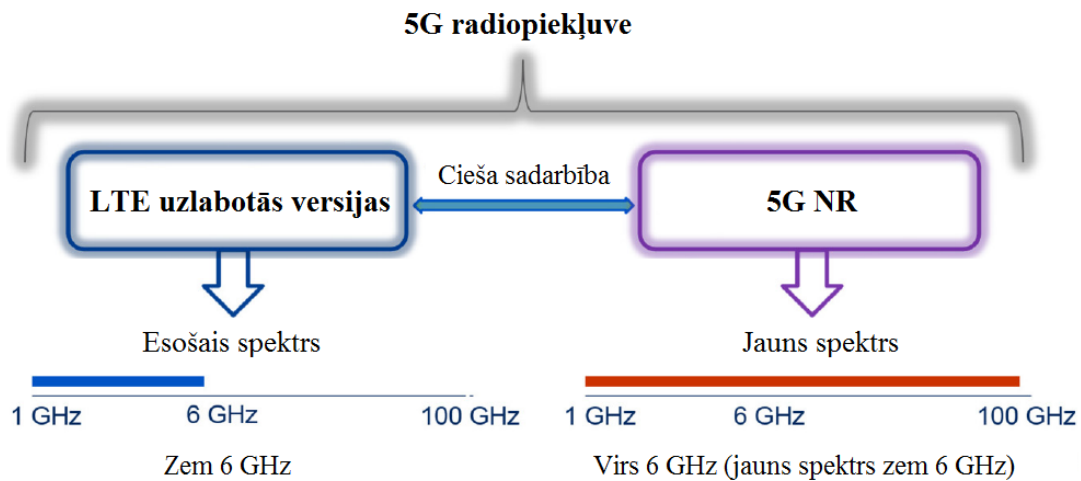
Ciparu jeb digitālajā televīzijā atšķirībā no analogās televīzijas video signālu pārraida *MPEG-2*, *MPEG-4* vai citādi kodētā datu veidā. Eiropā un Latvijā lietotais zemes ciparu televīzijas apraides standarts ir *DVB-T* (angl. val. *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) vai tās uzlabotās versijas. Pārējos pasaules reģionos izmanto arī citus televīzijas apraides standartus.

Gaisa kuģniecības radionavigācijas sistēmu (*ARNS*) saskaņā ar *ITU* Radionoteikumiem [24] drīkst izmantot 694–790 MHz joslā uz primāra pamata. Saskaņā ar *ITU* Radionoteikumu zemteksta piezīmi Nr. 5.312 [24] *ARNS* sistēmas frekvenču joslā 645-862 MHz uz primāra pamata drīkst lietot vairākās valstīs, tajā skaitā arī Baltkrievijā, Krievijas Federācijā un Ukrainā.

Mobilo sakaru šūnu *IoT* sistēmas ir pieskaitāmas pie perspektīvajām nākamās paaudzes bezvadu piekļuves sistēmām lietošanai 700 MHz joslā. Prognozējams, ka *NB-IoT* un *LTE-MTC* būs daļa no piektās paaudzes mobilo sakaru (5G) tīkliem [14], [22]. Kā *NB-IoT* tīklu lietojuma piemērus var minēt: viedās mājas (angl. val. *smart homes*), viedās pilsētas (angl. val. *smart cities*), viedais transports (angl. val. *smart transportation*) [31]. *IoT* tīklus var izmantot arī transporta satiksmes infrastruktūras vadībā (luksoforu, ceļa norāžu un zīmju vadībai, transporta novietošanai autostāvvietās u. c.).

Termins **5G** apzīmē ne tikai jaunu radiopiekļuves tehnoloģiju, to lieto arī daudz plašākā kontekstā, t. i., jaunu pakalpojumu kontekstā, ko sniegs nākotnes 5G mobilo sakaru tīkli. *ITU* terminoloģijā 5G apzīmē ar *IMT-2020*.

5G bezvadu piekļuve ietver gan 5G *NR*, gan arī *LTE* uzlabotās versijas (angl. val. *LTE Evolution*) [6]. *LTE* tehnoloģija un tās uzlabotās versijas paredzētas izmantošanai radiofrekvenču spektrā zem 6 GHz, 5G *NR* ietver spektru līdz pat 100 GHz (milimetru viļņi). Prognozējams, ka 5G radiotīklus veidos *NR* un uz *LTE* tehnoloģiju balstīti tīkli (2.1. att.) [14], [32]. Abas tehnoloģijas ir iesniegtas *ITU* kā kandidāttehnoloģijas *IMT-2020*.

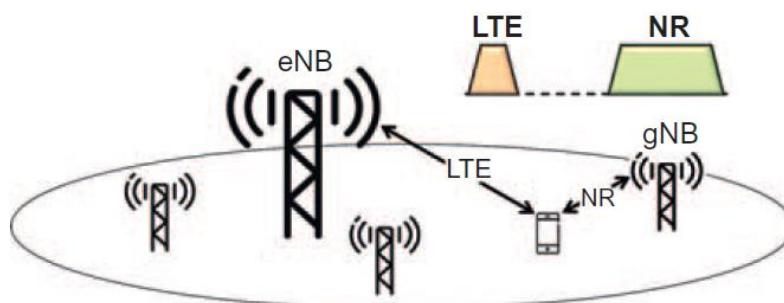


2.1. att. 5G radiopiekluves tehnoloģijas [32].

Saskaņā ar [19] aktīvo antenas sistēmu (angl. val. *Active Antenna Systems – AAS*) izmantošana frekvenču joslās zem 1 GHz nav plānota.

NR tīklus primāri paredzēts attīstīt augstākās frekvencēs (piemēram, 3,4–3,8 GHz un joslās virs 24 GHz). Šādus tīklus var papildināt ar *LTE* frekvenču nesējiem zemākajās frekvencēs (piemēram, zem 1 GHz) gan lejuplīnijā, gan arī augšuplīnijā.

Lietojot duālā savienojuma funkciju, var uzlabot radiopārklājumu augšuplīnijā, piemēram, kombinējot 700 MHz joslas frekvenču nesējus ar 3,5 GHz vai pat ar 24 GHz frekvenču joslas nesējiem.



2.2. att. *NR/LTE* duālā savienojuma piemērs vairāku bāzes staciju šūnu scenārijā [14].

LTE un *5G NR* tehnoloģiju parametru uzskaitījums 700 MHz joslai [1] dots 2.1. tabulā. Jāatzīmē, ka *LTE* un *5G NR* nodrošina frekvenču nesēju apvienošanas (*CA*) funkcionalitāti.

Daži LTE un 5G NR sistēmu parametri

Parametrs	4G/5G (LTE)	5G (NR)
Tehnoloģija	<i>Long Term Evolution (LTE)</i>	<i>New Radio (NR)</i>
Kanālu plānojums	<i>FDD</i>	<i>FDD</i>
Kanāla joslas platums	1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz	5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz
Modulācija (lejuplīnijā)	<i>OFDM</i>	<i>OFDM</i>
Radiokadra/apakškadra ilgums	10 ms / 1 ms	10 ms / 1 ms
Cikliskā prefiksa (CP) tips	Normāls CP, paplašināts CP	Normāls CP (SCS 15 kHz un 30 kHz)
Simbolu skaits vienā laika spraugā	7 simboli normālam CP, 6 simboli paplašinātam CP	14 simboli normālam CP; 2, 4 un 7 simboli minislotam
Resursu bloku skaits 5 MHz / 10 MHz platā kanālā	25/50	25/52
Izmantojamās antenas tips	<i>ne-AAS</i>	<i>ne-AAS</i>
Izstarojumu un filtra maska	Atbilst <i>3GPP TS 36.104, 36.101</i>	Atbilst <i>3GPP TS 38.104, 38.101</i>
Jutības sliekšnis 10 MHz platam kanālam (SCS 15 kHz)	-101,5 dBm	-101,7 dBm
Viena apakšnesēja solis	15 kHz	15 kHz, 30 kHz
<i>3GPP</i> tehniskās specifikācijas relīze	8–16	15, 16
Duālais savienojums	<i>3GPP Release 13</i>	<i>3GPP Release 15</i>

Ne viss radiofrekvenču spektrs *UHF* diapazonā tiek izmantots pilnībā. Radiofrekvenču spektra daļu, kas ir sadalīta zemes televīzijas apraides dienestam, bet lokāli netiek izmantota, sauc par televīzijas “baltajām vietām” (angļ. val. *Television White Space – TVWS*).

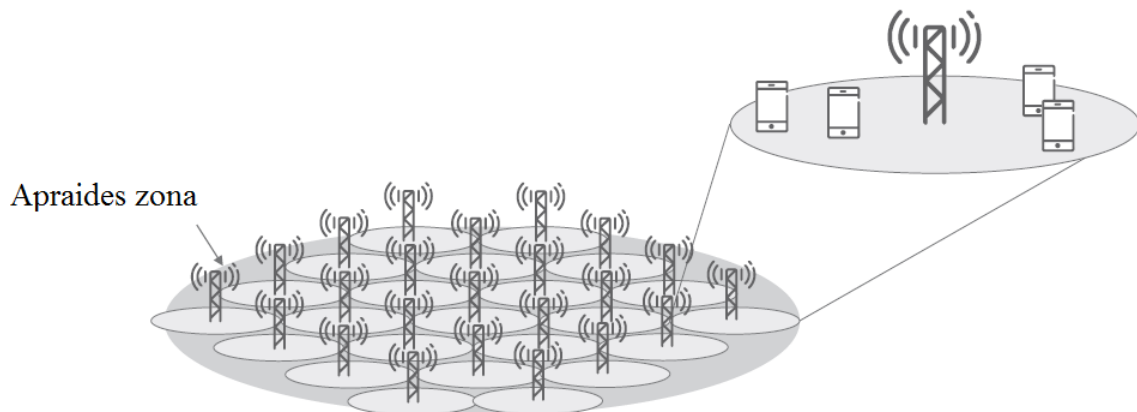
Televīzijas radiofrekvenču spektra efektīvākai izmantošanai, nodrošinot elektromagnētisko saderību ar pārējām radiosakaru sistēmām, var tikt lietota *TVWS* tehnoloģija [5], piemēram, reģionālā līmenī. Neizmantotās frekvenču joslas televīzijas spektrā var tikt lietotas, piemēram, bezvadu platjoslas sistēmām. Autora pētījumā [3] kā *TVWS* lietojums tika pieņemts *Wi-Fi*, kas atbilst 802.11af standartam.

Platjoslas sabiedrības drošības un katastrofu seku novēršanas sistēmas (***BB-PPDR***) ir radiosakari, ko saskaņā ar normatīvajiem tiesību aktiem izmanto atbildīgās iestādes, operatīvie dienesti, kas nodrošina sabiedrisko kārtību, dzīvības un īpašuma aizsardzību, katastrofu seku likvidēšanu u. tml. [23]. *BB-PPDR* sistēmu risinājumiem var izmantot bezvadu platjoslas sistēmu infrastruktūru (piemēram, 4G, 5G tīklus).

Tradicionālajiem zemes televīzijas apraides tīkliem ir iespējami alternatīvi vai arī kombinēti risinājumi. Telekomunikāciju nozarē ir vērojama pakāpeniska dažādu

telekomunikāciju tīklu konverģence un tendence koplietot gan infrastruktūru, gan arī radiofrekvenču resursus starp dažādiem elektronisko pakalpojumu sniedzējiem.

Teorētiski tradicionālos *DVB-T/T2* tīklus var aizstāt ar šūnu sakaru sistēmām, piemēram, standartizācijas organizācija *3GPP* ir izstrādājusi *eMBMS* (angl. val. *Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services*) tehnoloģiju televīzijas tīklu platformai, kas bāzēta uz *LTE* tehnoloģiju (sk. 2.3. att.).



2.3. att. *LTE MBMS* apraides scenārijs [13].

Promocijas darba **2.2. apakšnodaļā** dots elektromagnētiskās saderības metožu novērtējums.

Jaunu radiosakaru sistēmu ieviešanai nepieciešamas frekvences radiosakaru tīklu izvēršanai. Ieviešot jaunas radiosakaru sistēmas papildus esošajām sistēmām, palielinās radiofrekvenču spektra izmantošanas intensitāte, līdz ar to palielinās arī radiotraucējumu jeb interferences varbūtība.

Radiotraucējumi rodas, kad viena sistēma, pārraidot radiosignālus, izjauc signālu uztveršanu citā radiosakaru sistēmā. Šādi radiotraucējumi var notikt starp sistēmām, kas strādā kopkanālā vai arī blakuskanālos.

Radiotraucējumu novērtēšana ietver teorētiskos aprēķinus kopējā frekvenču kanālā (kopkanālā) vai arī blakuskanālos. Pētījumus, kas attiecas uz kopēja frekvenču kanāla novērtēšanu, parasti sauc par frekvenču koplietošanas pētījumiem, blakuskanālu pētījumus sauc par elektromagnētiskās saderības pētījumiem.

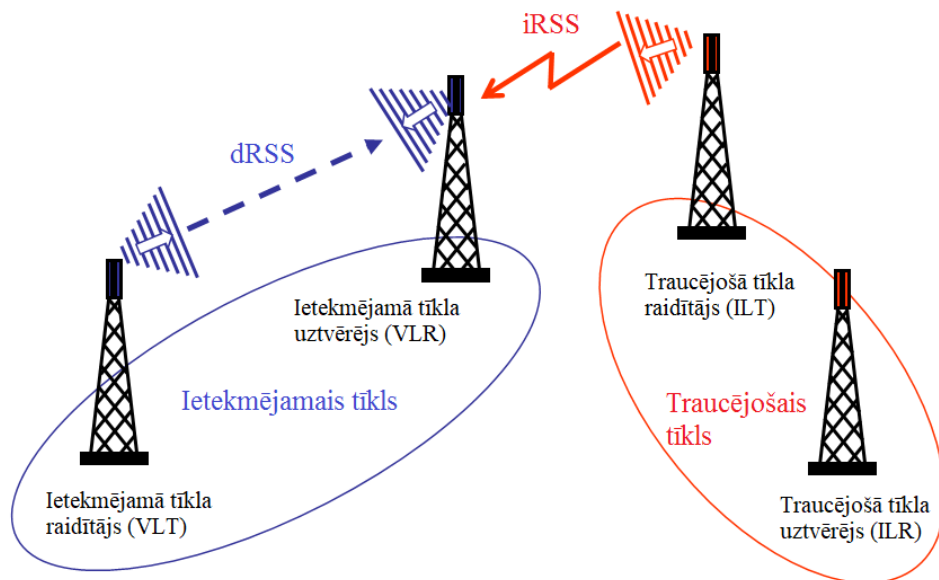
Teorētiskie aprēķini nepieciešami, jo ne vienmēr ir iespējams veikt mērījumus ar reālu aparatūru, īpaši gadījumos, kad jaunās radiosakaru sistēmas ir izstrādes procesā. Pastāv divi elektromagnētiskās saderības pētījuma veidi.

1. Deterministiskie pētījumi – balstīti uz fiksētiem parametriem, tiek pielietota t. s. savienojuma minimālo zudumu metode (angl. val. *Minimum Coupling Loss – MCL*). Ar šo metodi nosaka radiotraucējumu rašanās sliktāko iespējamo gadījumu. Aprēķinu rezultāts parasti tiek izteikts kā minimālais nepieciešamais atdalījums (telpā vai arī frekvenču apgabalā) starp divām radiosakaru sistēmām, lai nodrošinātu šo sistēmu darbību bez traucējumiem.

2. Statistiskie pētījumi – balstīti uz mainīgiem parametriem, izmantojot Montekarlo metodi (angļ. val. *Monte Carlo*). Šī metode ir reālistiskāka elektromagnētiskās saderības novērtējuma metode nekā *MCL*, jo ņem vērā vairāku parametru variācijas un to nejausīnāšanu, piemēram, sistēmu relatīvo izvietojumu. Novērtējuma rezultāts ir apskatāmā interferences scenārija radiotraucējumu rašanās varbūtība (%), kas var tikt salīdzināta ar attiecīgo sliekšņa vērtību, lai noteiktu, vai iegūtais rezultāts ir uzskatāms par kaitīgajiem traucējumiem.

Statistiskos pētījumus var veikt ar dažādiem programmatūras rīkiem, viens no šādiem rīkiem ir *SEAMCAT* (angļ. val. *Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*), kas ir atvērta pirmkoda programmatūra. Šo programmu izstrādāja *CEPT* [15], [18].

Ietekmējamā un traucējošā tīkla modelēšanas *SEAMCAT* programmā grafisks attēlojums dots 2.4. att.



2.4. att. Ietekmējamā un traucējošā tīkla modelēšana *SEAMCAT* programmā [18].

TREŠĀ NODAĻA

Promocijas darba **trešajā nodaļā** veikts bezvadu pārraides sistēmu elektromagnētiskās saderības novērtējums ar joslā un blakusjoslās strādājošām sistēmām, kā arī *LTE700* bāzes staciju teorētiskā radiopārklājuma un praktisko mērījumu analīze un novērtējums.

Promocijas darba **3.1. apakšnodaļā** apkopoti izstrādātie elektromagnētiskās saderības novērtējuma datorsimulāciju un eksperimentālo mērījumu scenāriji. 3.1. tabulā apkopoti iespējamo radiotraucējumu scenāriji, kas tika apskatīti promocijas darba izstrādes gaitā.

3.1. tabula

Iespējamie radiotraucējumu scenāriji

Nr.	Radiotraucējumu scenārijs	Kopkanālā/ blakuskanālā	Realizācija	Papildu informācija
1.	<i>DVB-T</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām bāzes stacijām	Kopkanālā	Jā	*
2.	<i>DVB-T</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām bāzes stacijām	Blakuskanālā	Jā	*
3.	<i>DVB-T</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām galiekārtām	Kopkanālā	–	**
4.	<i>DVB-T</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām galiekārtām	Blakuskanālā	–	**
5.	<i>LTE</i> bāzes stacijas ietekme uz <i>DVB-T</i> uztverošajām radioiekārtām	Kopkanālā	Jā	*
6.	<i>LTE</i> bāzes stacijas ietekme uz <i>DVB-T</i> uztverošajām radioiekārtām	Blakuskanālā	–	*
7.	<i>LTE</i> galiekārtas ietekme uz <i>DVB-T</i> uztverošajām radioiekārtām	Kopkanālā	–	**
8.	<i>LTE</i> galiekārtas ietekme uz <i>DVB-T</i> uztverošajām radioiekārtām	Blakuskanālā	Jā	*
9.	<i>LTE</i> bāzes stacijas ietekme uz <i>ARNS</i> uztverošajām radioiekārtām	Kopkanālā	Jā	*
10.	<i>LTE</i> bāzes stacijas ietekme uz <i>ARNS</i> uztverošajām radioiekārtām	Blakuskanālā	–	**
11.	<i>ARNS</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām bāzes stacijām	Kopkanālā	–	**
12.	<i>ARNS</i> stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām bāzes stacijām	Blakuskanālā	–	**
13.	<i>LTE</i> bāzes stacijas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām galiekārtām	Kopkanālā/ blakuskanālā	Jā	*
14.	<i>LTE</i> galiekārtas ietekme uz <i>LTE</i> uztverošajām bāzes stacijām	Kopkanālā/ blakuskanālā	–	**

* Kritisks scenārijs no EMS un frekvenču koordinācijas viedokļa.

** Nav kritisks scenārijs no EMS un frekvenču koordinācijas viedokļa.

Promocijas darba autors izstrādājis 1., 2., 5., 8., 9. un 13. iespējamo radiotraucējumu scenārijus, kas aprakstīti trešajā nodaļā.

3. un 4. scenārijs nav kritisks no elektromagnētiskās saderības (EMS) un frekvenču koordinācijas viedokļa, jo lielāki ierobežojumi sagaidāmi 5. un 6. scenārija gadījumā.

10. scenārijs nav kritisks no EMS un frekvenču koordinācijas viedokļa, jo lielāki ierobežojumi sagaidāmi 9. scenārija gadījumā.

11. un 12. scenārijs nav kritisks no EMS un frekvenču koordinācijas viedokļa (sk. arī 3.1.6. apakšnodaļu).

14. scenārijs nav kritisks no EMS un frekvenču koordinācijas viedokļa, jo lielāki ierobežojumi sagaidāmi 13. scenārija gadījumā.

Visos apskatītajos scenārijos ir pieņemts frekvenčdales duplexa (FDD) kanālu plānojums, kas satur 2×30 MHz frekvenču bloku un ir saskaņā ar 3GPP joslas Nr. 28 zemāko frekvenci: 703–733 MHz augšuplīnijai un 758–788 MHz lejuplīnijai ar frekvenču kanāla joslas platumu 10 MHz.

LTE/LTE-A parametri 3.1. apakšnodaļā ir saskaņā ar JTG 4-5-6-7 un WP 5D (IMT) darba grupu rekomendācijām [16] un ITU-R ziņojumu M.2292-0 [27].

DVB-T un DVB-T2 parametri 3.1. apakšnodaļā ir saskaņā ar JTG 4-5-6-7 un WP 6A (DTTB) darba grupu rekomendācijām [17].

ARNS tehniskie parametri 3.1. apakšnodaļā ir saskaņā ar ITU-R rekomendāciju M.1830 [21] un ITU-R rekomendāciju M.1461-1 [20].

Mērījumu kļūda

EML intensitātes mērījumus veic saskaņā ar CEPT/ERC rekomendāciju 74-02 [11]. Atbilstoši minētajai rekomendācijai un promocijas darbā izmantotās mēraparatūras specifikācijā norādītajai mērījumu precizitātei EML intensitātes mērījumu precizitāte ir ± 3 dB robežās, kas uzskatāma arī par mērījumu kļūdu.

Tālāk tekstā dots radiotraucējumu scenāriju apkopojums, kuriem ir sagatavotas promocijas darba aizstāvamās tēzes.

2. scenārijs. DVB-T stacijas ietekme uz LTE uztverošajām bāzes stacijām (blakuskanālā)

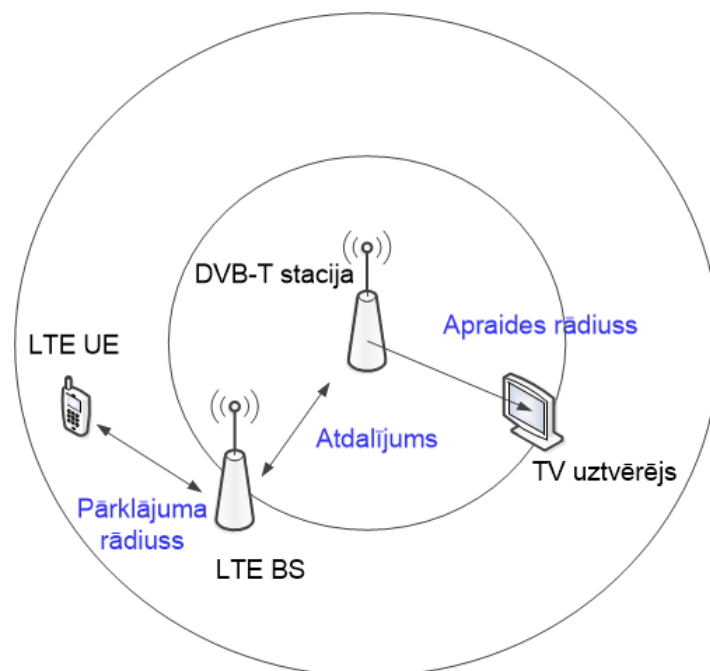
Otrā scenārija rezultāti publicēti rakstā “Assessment of DVB-T compatibility with LTE in adjacent channels in 700 MHz band” [8].

Šajā scenārijā pētīta elektromagnētiskā saderība starp DVB-T strādājošu TV kanālā Nr. 48 (686–694 MHz) un LTE700 strādājošu pirmajā kanālā (703–713 MHz) augšuplīnijā.

Scenārija apraksts

Šajā scenārijā tika pētīti iespējamie radiotraucējumi LTE700 bāzes staciju uztvērējos (augšuplīnijā) no blakusjoslā strādājošām DVB-T stacijām. Scenārijs atbilst gadījumam, kad kaimiņvalstīs vai valsts ietvaros ciparu televīzijas vajadzībām izmanto frekvences zem 694 MHz. Šajā scenārijā pieņemts, ka LTE tīkls darbojas DVB-T tīkla aptveršanas zonā.

Atbilstošs *SEAMCAT* simulācijas scenārijs dots 3.1. attēlā. Šajā gadījumā pieņemts, ka *LTE* tīklā ir septiņas bāzes stacijas.



3.1. att. *SEAMCAT* simulācijas scenārijs.

Kopsavilkums

Šajā scenārijā *DVB-T* un *LTE* sistēmu elektromagnētiskās saderības novērtēšanai lietota *MCL* un Montekarlo metode. Tiek uzskatīts, ka *MCL* metode sniedz piesardzīgākus elektromagnētiskās saderības aprēķinu rezultātus, salīdzinot ar *SEAMCAT* Montekarlo simulācijas metodi. Montekarlo metode dod realitātei tuvākus rezultātus, jo simulācijās tiek ņemti vērā vairāki sistēmu raksturojoši specifiski parametri.

MCL rezultāti parādīja, ka nepieciešamais ģeogrāfiskais atdalījums starp *DVB-T* raidītāju un uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām ir 26,15 km. Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo rezultātiem minimālais nepieciešamais atdalījums starp *DVB-T* raidītāju un *LTE* bāzes staciju uztvērējiem strādājošiem blakusjoslā ir 13 km.

9. scenārijs. *LTE* bāzes stacijas ietekme uz *ARNS* uztverošajām radioiekārtām (kopkanālā)

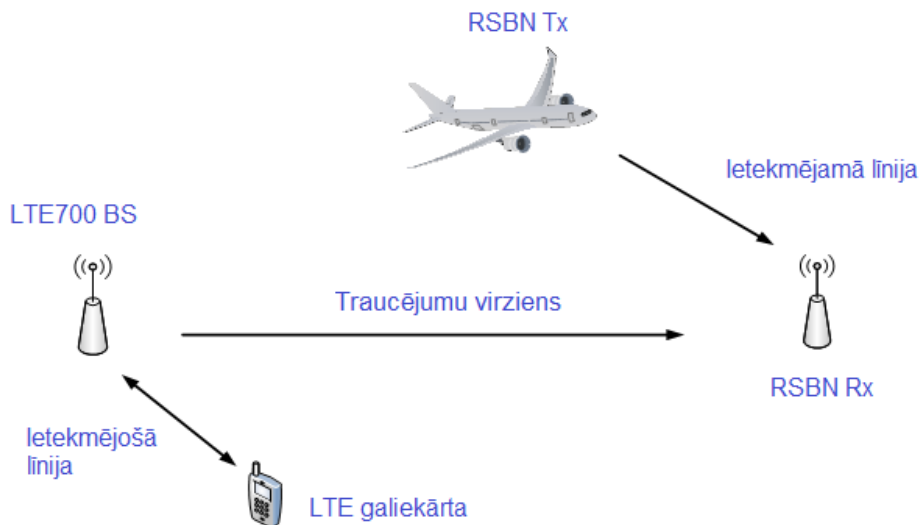
Devītā scenārija rezultāti publicēti rakstā “*Evaluation of LTE and Aeronautical Radionavigation Service Electromagnetic Compatibility in 694–790 MHz Frequency Band*” [9].

Scenārija apraksts

Šajā pētījumā apskatīta *LTE* bāzes staciju darbība 758–788 MHz (lejuplīnija) un 738–758 MHz (papildu lejuplīnija) joslās un šo staciju iespējamā ietekme uz *ARNS* sistēmām 694–790 MHz joslā. Saskaņā ar *ITU-R* rekomendāciju M.1830 tika pētīti divi *ARNS* staciju tipi: *RSBN* uztverošās zemes stacijas, kas darbojas 784 MHz, kā arī *RLS 2 Type 2* uztverošās

zemes stacijas, strādājošas 740 MHz frekvencē.

Pētījumā apskatīts *LTE* bāzes staciju (lejuplīnija) iespējamā ietekme uz *ARNS*. *SEAMCAT* simulāciju radiotraucējumu scenārijs dots 3.2. attēlā.



3.2. att. *SEAMCAT* simulāciju radiotraucējumu scenārijs.

Kopsavilkums

Šis pētījums sniedz *LTE* bāzes staciju un *ARNS* staciju 700 MHz joslā līdzāspastāvēšanas prasību novērtējuma rezultātus.

Saskaņā ar *MCL* aprēķinu rezultātiem nepieciešamais sistēmu atdalījums starp *LTE* bāzes staciju un *ARNS RSBN* uztverošo zemes staciju ir 132 km pie 10 m uztverošās antenas uzstādīšanas augstuma. Saskaņā ar *SEAMCAT* simulāciju rezultātiem sistēmu atdalījumam jābūt vismaz 112 km. Saskaņā ar *EML* intensitātes sliekšņa vērtību [21] aprēķiniem atdalījumam jābūt vismaz 15 km *RSBN* zemes radara gadījumā un 45 km *RLS 2 Type 2* zemes radara gadījumā. Rezultāti rāda, ka abas sistēmas var pastāvēt līdzās (piemēram, kaimiņvalstu gadījumā), taču nepieciešams ieviest frekvenču koordinācijas pasākumus, piemēram, nosakot minimālo nepieciešamo atdalījumu starp šādām radioiekārtām.

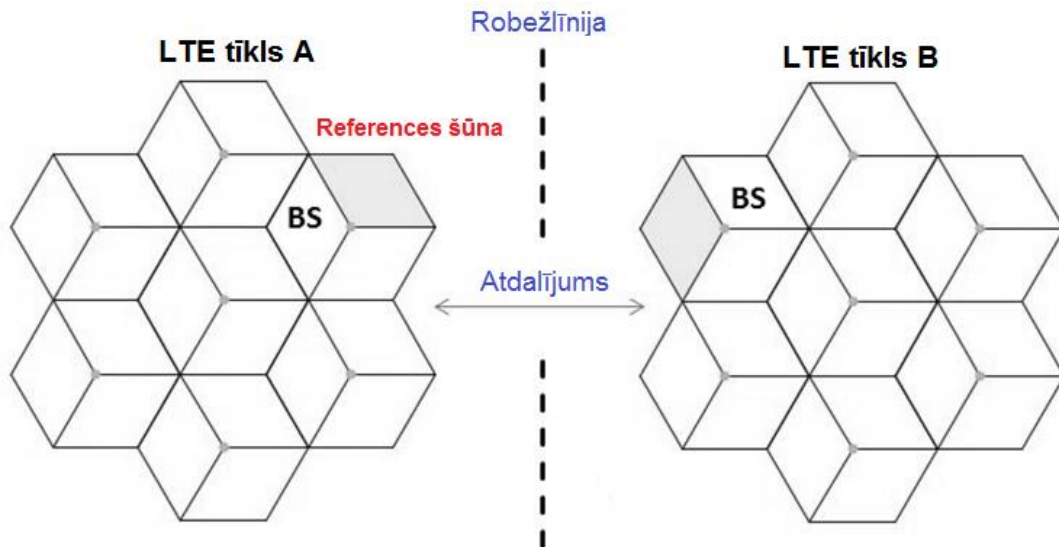
Elektromagnētiskās situācijas uzlabošanai var izmantot radiotraucējumus mazinošus papildu pasākumus, piemēram, antenu noliekšānu, *LTE* tīkla bāzes staciju antenu azimuta pielāgošanu, *LTE* bāzes staciju maksimālās *e. i. r. p.* samazināšanu, bāzes staciju antenu uzstādīšanas augstuma ierobežošanu.

13. scenārijs. *LTE* bāzes stacijas ietekme uz *LTE* uztverošajām galiekārtām (kopkanālā un blakuskanālos)

Trīspadsmitā scenārija rezultāti (kopkanāla gadījumam) publicēti rakstā “*Electromagnetic Compatibility Assessment of LTE700 networks for Co-channel Case*” [7]. Šis scenārijs blakuskanāla gadījumam nav kritisks no radiotraucējumu un frekvenču koordinācijas viedokļa, tāpēc tas promocijas darbā detalizēti apskatīts netika.

Scenārija apraksts

Šajā pētījumā apskatīta *LTE* bāzes staciju darbības 758–788 MHz (lejuplīnija) joslā iespējamā ietekme uz kaimiņtīkla uztverošajām radioiekārtām (*UE*) kopkanālā. *SEAMCAT* simulācijās lietots 20 000 notikumu skaits. *SEAMCAT* simulāciju radiotraucējumu scenārijs dots 3.3. attēlā.



3.3. att. *SEAMCAT* simulācijas radiotraucējumu scenārijs.

Šis scenārijs atbilst arī gadījumam, kad kaimiņvalstīs tiek ieviesti mobilo sakaru tīkli 700 MHz joslā, kur *LTE* tīkls A un *LTE* tīkls B ir izvietoti šo valstu pierobežā.

Kopsavilkums

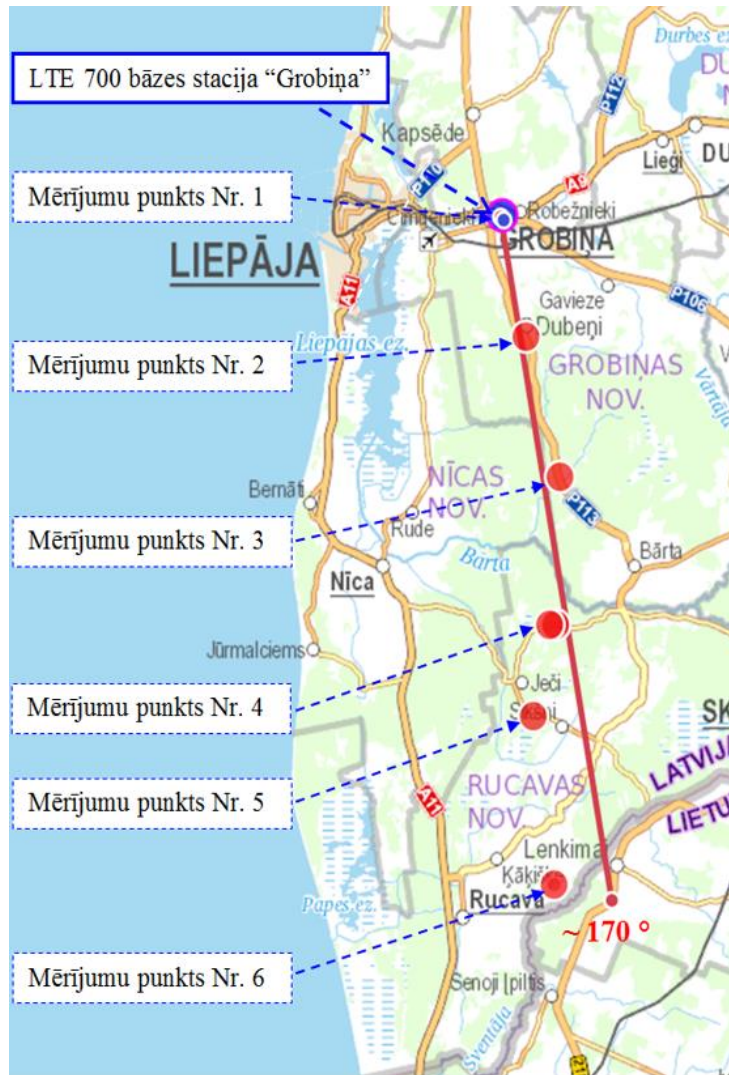
Šis pētījums sniedz elektromagnētiskās saderības novērtējumu starp mobilo sakaru tīkliem 700 MHz joslā kopēja kanāla gadījumā. EMS novērtējumam izmantota *SEAMCAT* Montekarlo metode. Saskaņā ar Montekarlo simulāciju rezultātiem atdalījumam starp sistēmām ir jābūt 26 km, lai kaimiņvalstu *LTE* tīkla etalonšūnā nodrošinātu vidējos caurlaidspējas zudumus, kas nav lielāki par 5 %.

Saskaņā ar pētījuma rezultātiem elektromagnētiskās situācijas uzlabošanai starp mobilo sakaru tīkliem 700 MHz joslā var izmantot traucējumus mazinošus papildu pasākumus, piemēram, antenu noliekšanu, *LTE* tīkla bāzes staciju antenu vēršanu virzienā prom no kaimiņvalstu tīkla, *LTE* bāzes staciju maksimālās *e. i. r. p.* samazināšanu, bāzes staciju antenu uzstādīšanas augstuma ierobežošanu, bāzes staciju konfigurēšanu ar šaurākām antenas diagrammām u. c.

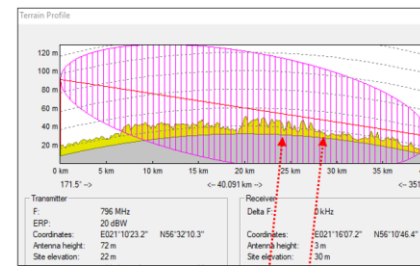
Promocijas darba **3.2. apakšnodaļā** veikts mobilo sakaru tīkla bāzes staciju signālu elektromagnētiskā lauka (EML) intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātu salīdzinājums, kā arī analizēta radioviļņu izplatīšanās 700 MHz joslā atbilstoši Latvijas apstākļiem (reljefam u. c.). Apakšnodaļā dota arī informācija par autora izstrādāto metodiku mobilo sakaru tīkla bāzes staciju signālu EML intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātu savstarpējai salīdzināšanai, kas izmantota iepriekšminētajos mērījumos un aprēķinos.

EML intensitātes eksperimentālo mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātu salīdzinājums

Eksperimentālo mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātu salīdzināšanas nolūkos tika veikti elektromagnētiskā lauka mērījumi LTE700 bāzes stacijai “Grobiņa” 170 ° sektorā. LTE bāzes staciju signālu mērījumu punkti doti 3.4. attēlā.



Zemes reljefs 170 ° sektorā:



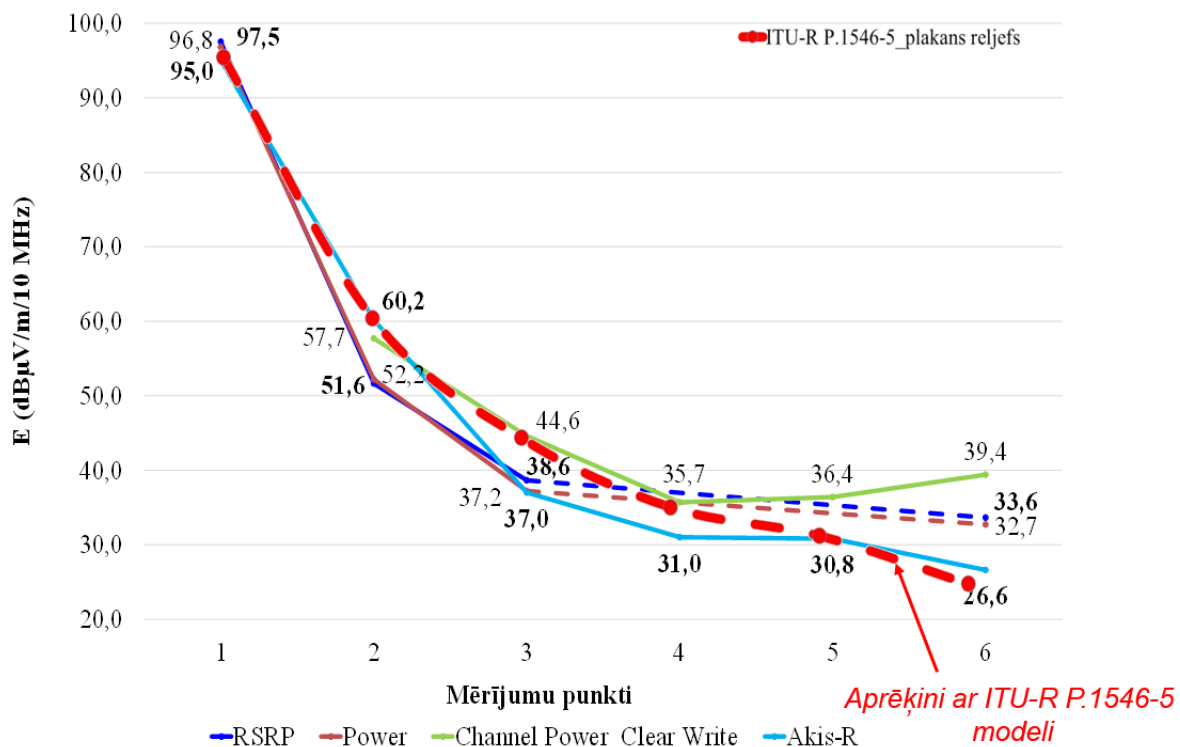
Mērījumu punktu attālums līdz BS:

1. punkts: 0,3 km
2. punkts: 7,4 km
3. punkts: 15,9 km
4. punkts: 24,8 km
5. punkts: 29,8 km
6. punkts: 40,1 km

3.4. att. LTE700 bāzes stacijas signālu mērījumu punkti kartē 170 ° sektorā.

Bāzes stacijas “Grobiņa” signālu elektromagnētiskā lauka intensitātes eksperimentālo mērījumu un teorētisko aprēķinu apkopojums dots 13. attēlā. Eksperimentālie mērījumi tika veikti sešos punktos. Jāatzīmē, ka 4. un 5. mērījumu punktā LTE signāls netika dekodēts, jo LTE signāla uztvertās jaudas līmenis bija mēraparatūras trokšņu līmenī. Šajos punktos kartē novērojami arī reljefa iekritumi. Mērījumi tika veikti ar antenas vertikālo polarizāciju.

Aprēķini ar programmu *Akis-R* veikti pie T: 50 %, L: 50 %. Kā redzams grafikos, teorētisko aprēķinu un eksperimentālo mērījumu rezultāti ir līdzīgi un mērījumu rezultātu tendence atbilst ITU-R P.1546-5 idealizētai līknei (ar līdzenu reljefu).



3.5. att. LTE700 bāzes stacijas “Grobiņa” signālu elektromagnētiskā lauka intensitātes mērījumu apkopojums, dBµV/m.

Kopsavilkums

Jāatzīmē, ka promocijas darba autors EML intensitātes teorētiskos aprēķinus veica arī ar citiem radioviļņu izplatīšanās prognozēšanas modeļiem, kas pieejami programmā *Akis-R*. Attiecīgi, izvērtējot teorētiskā radiopārklājuma aprēķinu rezultātus, par piemērotāko 700 MHz joslai tika atzīta *ITU-R* rekomendācija P.1546-5 [25].

Parametra *RSRP* un *Power* mērījumu rezultātu vērtības ir tuvas teorētisko aprēķinu rezultātiem (aprēķinos izmantota *ITU-R* rekomendācija P.1546-5). Šajā gadījumā *RSRP* un *Power* vērtības 2. mērījumu punktā ir mazākas par teorētisko aprēķinu rezultātiem, un tas ir izskaidrojams ar bāzes stacijas antenu salīdzinoši nelielo uzstādīšanas augstumu un mežaino apvidu, kas radiosignāliem rada papildu vājinājumu.

Teorētisko aprēķinu rezultātu precizitāti ietekmē pieejamo topogrāfisko un zemes virsmas seguma karšu kvalitāte un izšķirtspēja. Aprēķinos nav ņemts vērā zemes virsmas segums, kā arī apbūve. Teorētisko aprēķinu un eksperimentālo mērījumu rezultātu lielākā atšķirība bija novērojama mērījumu punktos, kas atrodas tālāk par 30 km no bāzes stacijas. Vietas augstumam virs jūras līmeņa ir liela ietekme uz uztvertā signāla līmeni konkrētā mērījumu punktā, un tas tika apstiprināts arī eksperimentālo mērījumu laikā. Secināms, ka signālu izplatīšanās novērtēšanai konkrētā sektorā ar mērķi savstarpēji salīdzināt EML intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātus nepieciešami 3–4 mērījumu punkti.

No iegūtajiem rezultātiem secināms, ka *Channel Power* mērījumu *Clear/write* režīms dod uztvertā signāla EML intensitātes pieaugumu 5. un 6. mērījumu punktā. Tas varētu būt izskaidrojams ar to, ka spektra analizators *FSH8* summē visus uztvertos signālus attiecīgajās frekvencēs (šajā gadījumā arī no kaimiņvalsts zemes televīzijas apraides stacijām).

CETURTĀ NODAĻA

Promocijas darba **ceturtajā nodaļā** doti priekšlikumi radiofrekvenču kanālu plānam bezvadu pārraides sistēmām 694–790 MHz joslā, veikta 700 MHz joslas turpmākās izmantošanas Latvijā scenāriju bezvadu pārraides sistēmām analīze.

Promocijas darba **4.1. apakšnodaļā** dota informācija par radiofrekvenču kanālu plāna izstrādi un iespējamie lietojuma scenāriji.

Publikācijā “*Frequency Arrangement for 700 MHz Band*” [4] analizēti iespējamie frekvenču kanālu plāna varianti 700 MHz joslai ar mērķi noteikt piemērotāko frekvenču kanālu plāna variantu izmantošanai Eiropā.

Saskaņā ar promocijas darba trešās nodaļas pētījumu rezultātiem un analīzes [4] rezultātiem 4.1. att. dots ieteicamais radiofrekvenču kanālu plāns 700 MHz joslas lietošanai bezvadu pārraides sistēmām Latvijā.

Aizsargjosla	FDD UL						Atdalījums	SDL				FDD DL						Aizsargjosla
	FDD1	FDD2	FDD3	FDD4	FDD5	FDD6		SDL1	SDL2	SDL3	SDL4	FDD1	FDD2	FDD3	FDD4	FDD5	FDD6	
694-703	703-708	708-713	713-718	718-723	723-728	728-733	733-738	738-743	743-748	748-753	753-758	758-763	763-768	768-773	773-778	778-783	783-788	788-791
9 MHz	30 MHz (6 x 5 MHz)						5 MHz	20 MHz (4 x 5 MHz)				30 MHz (6 x 5 MHz)						3 MHz

4.1. att. Ieteicamais radiofrekvenču kanālu plāns 700 MHz joslai.

Frekvenču kanālu plānā zemes ciparu televīzijas apraides aizsardzībai zem 694 MHz no mobilā dienesta stacijām paredzēta 9 MHz aizsargjosla. Bezvadu pārraides sistēmām paredzētas frekvenču joslas 703–733 MHz / 758–788 MHz (attiecīgi augšuplīnija un lejuplīnija). Papildu kapacitātes nodrošināšanai bezvadu pārraides sistēmām paredzēta 738–758 MHz josla (papildu lejuplīnija). Publikācijā [4] promocijas darba autors, balstoties uz veikto analīzi optimālai 700 MHz joslas izmantošanai, rekomendē izmantot frekvenču joslas 733–736 MHz un 788–791 MHz mašīnu tipa sakaru (*M2M*) sistēmām.

Promocijas darba **4.2. apakšnodaļā** dots radiofrekvenču lietošanas pierobežā nosacījumu novērtējums.

Saskaņā ar veikto novērtējumu radiofrekvenču spektra joslas 700 MHz izmantošana zemes televīzijas apraides nodrošināšanai un gaisa kuģniecības radionavigācijas sistēmām Krievijā un Baltkrievijā ievērojamā daļā Latvijas teritorijas neļautu izmantot šo frekvenču joslu platjoslas bezvadu pārraides sistēmām, kas savukārt nenodrošinātu šīs radiofrekvenču spektra joslas efektīvu izmantošanu. Ja kādā no ES dalībvalstīm tiktu turpināta zemes ciparu televīzijas apraides sistēmu izmantošana, tas varētu ietekmēt tās robežvalstu laicīgu pāreju uz mobilo sakaru sistēmu izmantošanu šajā joslā. Tāpēc starp kaimiņvalstīm ir svarīga koordinēta un maksimāli harmonizēta frekvenču izmantošana.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Veicot definēto uzdevumu izpildi, ir iegūti vairāki **galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi**.

1. Lai nodrošinātu EMS starp blakusjoslā strādājošo *DVB-T* lielas jaudas raidītāju un uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām (pie 9 MHz frekvenču atdalījuma), saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem minētās radioiekārtas jāuzstāda 13 km ($\pm 3,5$ km) attālumā.
2. Starp *LTE* bāzes stacijām un *ARNS RSBN* zemes uztverošajām radioiekārtām, strādājošām 700 MHz joslā kopkanālā, saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem ir iespējams nodrošināt EMS. Radioiekārtu atdalījumam apskatītā scenārijā ir jābūt 112 km (± 9 km).
3. Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem EMS nodrošināšanai starp bezvadu pārraides tīkliem (*LTE*) nepieciešamais atdalījums kopēja frekvenču kanāla lietošanas gadījumā ir 26 km (± 4 km).
4. Bāzes stacijas signālu izplatīšanās novērtēšanai konkrētā sektorā ar mērķi savstarpēji salīdzināt EML intensitātes mērījumu un teorētisko aprēķinu rezultātus nepieciešami 3–4 mērījumu punkti, turklāt teorētisko aprēķinu rezultātu precizitāti ietekmē pieejamo topogrāfisko un zemes virsmas seguma karšu kvalitāte un izšķirtspēja. Radioviļņu izplatīšanās prognozēšanai 700 MHz joslā ir piemērojams modelis *ITU-R P.1546-5*.
5. Eksperimentālie mērījumi apstiprināja teorētiskos rezultātus par *DVB-T* stacijas ietekmi uz uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām kopkanālā, jo mērījumu laikā *LTE* bāzes stacijā tika novēroti radiotraucējumi no 94 km attālumā esošās zemes televīzijas apraides stacijas (*MP*). Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem nepieciešamais atdalījums starp raidošo *DVB-T* staciju (*MP*) un uztverošajām *LTE700* bāzes stacijām kopkanālā ir 278 km.
6. Saskaņā ar *SEAMCAT* Montekarlo simulāciju rezultātiem, piemērojot radiotraucējumus mazinošus paņēmienu, nepieciešamo atdalījumu starp raidošām *LTE700* bāzes stacijām un *DVB-T/T2* uztvērējiem kopkanālā var attiecīgi samazināt no 152 km un 159 km līdz 82 km un 88 km.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti. Iegūtos elektromagnētiskās saderības novērtējuma rezultātus var izmantot radiofrekvenču spektru pārvaldošās iestādes, mobilo sakaru operatori, iekārtu ražotāji un citas ieinteresētās puses.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] 3GPP TS 36.104 V16.2.0 Technical Specification. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 16)// 3rd Generation Partnership Project. – June, 2019.
- [2] 3GPP TS 36.300 V15.6.0. Technical Specification. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall description; Stage 2 (Release 15)// 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. – June, 2019.
- [3] Ancans Guntis, Bobrovs Vjaceslavs, Ancans Arnis, Stankevicius Evaldas. Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting// International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking – 2016. – Vol. 8, Issue 1 – pp. 35–44.
- [4] Ancans G., Bobrovs V., Ivanovs G. Frequency Arrangement for 700 MHz Band// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2015. – Vol. 52, Iss. 1 – pp. 52–67.
- [5] Ancans G., Bobrovs V., Ivanovs G. Spectrum usage in mobile broadband communication systems// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2013., No. 3, – pp. 49–58.
- [6] Ancans G., Bobrovs V. Spectrum Usage for 5G Mobile Communication Systems and Electromagnetic Compatibility with Existent Technologies. In: Broadband Communications Networks – Recent Advances and Lessons from Practice// Haidine A., Aqqal A., ed. London: IntechOpen. – 2018. – pp. 27–41.
- [7] Ancans G., Sharashidze T., Bobrovs V. Electromagnetic Compatibility Assessment of LTE700 Networks for Co-channel Case// 2017 Progress In Electromagnetic Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia. – 2017. – pp. 2511–2514.
- [8] Ancans G., Stankevicius E., Bobrovs V. Assessment of DVB-T Compatibility with LTE in Adjacent Channels in 700 MHz Band// Elektronika ir Elektrotehnika. – 2015. – Vol. 21, No. 4. – pp. 73–77.
- [9] Ancans G., Stankevicius E., Bobrovs V., Ivanovs G. Evaluation of LTE and Aeronautical Radionavigation Service Electromagnetic Compatibility in 694–790 MHz Frequency Band// Elektronika ir Elektrotehnika. – 2016. – Vol. 22, No. 6 – pp. 99–1030.
- [10] Balodis G. Mobilie sakari. – Rīga: Radioiekārtu katedra, Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte, Rīgas Tehniskā universitāte, 2003. – lp. 111.
- [11] CEPT/ERC Recommendation 74-02. Method of measuring the field strength at fixed points in the frequency range 29.7–960 MHz// Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). – 1999. – p. 7.
- [12] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022. White paper// Cisco. – 2019. – pp. 15.
- [13] Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. Third Edition. – Elsevier Ltd., 2016. – pp. 590.

- [14] Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. – Academic Press. Elsevier Ltd., 2018. – p. 441.
- [15] Devendec M., Refik A. The Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool (SEAMCAT)// International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC 2002. – 2002.
- [16] Document 4-5-6-7/49-E. Sharing parameters for WRC-15 agenda item 1.2. Liaison statement to Joint Task Group 4-5-6-7// Working Party 5D International, Telecommunication Union (ITU). – 2012. – p. 7.
- [17] Document 4-5-6-7/55. Technical characteristics and other technical issues for terrestrial television broadcasting in connection with WRC-15 Agenda Item 1.2. Liaison statement to Joint Task Group 4-5-6-7// Working Party 6A, International Telecommunication Union (ITU). – 2012. – p. 31.
- [18] ECC Report 252. SEAMCAT Handbook. Edition 2// Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). – 2016. – p. 444.
- [19] ECC Report 297. Analysis of the suitability and update of the regulatory technical conditions for 5G MFCN and AAS operation in the 900 MHz and 1800 MHz bands// Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). – 2019. – p.72.
- [20] ITU-R M.1461-2. Procedures for determining the potential for interference between radars operating in the radiodetermination service and systems in other services// International Telecommunication Union (ITU). – 2018. – p. 11.
- [21] ITU-R M.1830. Technical characteristics and protection criteria of aeronautical radionavigation service systems in the 645–862 MHz frequency band// International Telecommunication Union (ITU). – 2007. – p. 10.
- [22] Mobile IoT in the 5G Future – NB-IoT and LTE-M in the Context of 5G// London: GSM Association – 2018. – p. 11.
- [23] Noteikumi par radiofrekvenču spektra joslu sadalījumu radiosakaru veidiem un iedalījumu radiosakaru sistēmām, kā arī par radiofrekvenču spektra joslu izmantošanas vispārīgajiem nosacījumiem (Nacionālais radiofrekvenču plāns). Latvijas Republikas Ministru kabineta noteikumi Nr. 1151. Pieņemti Latvijas Republikas Ministru kabinetā 06.10.2009.; stājās spēkā 10.10.2009.; ar grozījumiem, kas pieņemti līdz ar 18.12.2018. Latvijas Vēstnesis, 21.12.2018., Nr. 251 (6337).
- [24] Radio Regulations. Articles, Edition of 2016, Vol. 1. // International Telecommunication Union (ITU). – 2016. – p. 430.
- [25] Recommendation ITU-R P.1546-5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz// International Telecommunication Union (ITU). – 2013. – p. 58.
- [26] Report ITU-R M.2290-0. Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT// International Telecommunication Union. – 2013. – pp. 8–10.

- [27] Report ITU-R M.2292-0. Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/ interference analyses// International Telecommunication Union (ITU). – 2013. – p. 15.
- [28] Rowles D. Mobile Marketing – How Mobile Technology is Revolutionizing Marketing, Communications and Advertising. Second Edition. – Kogan Page Limited, 2017. – p. 33.
- [29] Schilbach J. LTE Drive Test – How to benefit from using a R&S®TSMW or R&S®TSME// Rohde & Schwarz, 2014. – p. 22.
- [30] Strategic spectrum roadmap towards 5G for Europe. RSPG Opinion on 5G implementation challenges (RSPG 3rd opinion on 5G)// Radio Spectrum Policy Group. – 2019. – p. 2.
- [31] Wu Yulei, Huang Haojun, Wang Cheng-Xiang, Pan Yi. 5G-Enabled Internet of Things. – CRC Press. Taylor & Francis Group, 2019. – p. 396.
- [32] Zaidi Ali, Athley Fredrik, Medbo Jonas, Gustavsson Ulf, Durisi Giuseppe, Chen Xiaoming. 5G Physical Layer Principles, Models and Technology Components. – Academic Press. Elsevier Ltd., 2018. – p. 302.
- [33] Radiocommunication Sector (ITU-R). International Telecommunication Union. / Internets. – <https://www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=itur-welcome&lang=en>, aplūkots 08.09.2019.