



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Aleksejs Vasiljevs**

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

Promocijas darba kopsavilkums



**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 darba kopsavilkums**

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

RTU Izdevniecība  
Rīga 2023

Vasiļjevs, A. Dzelzceļa transporta telemātikas sistēmu matemātiskie modeļi un algoritmi. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-22" 2022. gada 25. novembra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.16.1/9,.

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".



NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA  
Eiropas Sociālais  
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

<https://doi.org/10.7250/9789934229039>  
ISBN 978-9934-22-903-9 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (Ph. D.) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 21. aprīlī plkst. 13.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 513. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Pāvels Gavrilovs,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Igors Kabaškins,  
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Profesore *Dr. sc. ing.* Karina Trubčaninova,  
Ukrainas Valsts dzelzceļa transporta universitāte, Ukraina

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Aleksejs Vasiļjevs ..... (paraksts)

Datums: .....

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.

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

*3GPP* – trešās paaudzes partnerības projekts;  
*AI* – mākslīgais intelekts;  
*ATP* – automātiskā vilcienu aizsardzība;  
*BTS* – bāzes stacija;  
*COST* – Eiropas zinātnes un tehnoloģiju sadarbība;  
*CSV* – ar komatu atdalītas vērtības;  
*EDGE* – uzlabotais datu pārraides ātrums vispārējai attīstībai;  
*EIRENE* – Eiropas integrētais uzlabotais radiotīkls;  
*EML* – elektromagnētiskais lauks;  
*EMV* – elektromagnētiskais vilnis;  
*ERA* – Eiropas Dzelzceļa aģentūra;  
*ERTMS* – Eiropas dzelzceļa satiksmes vadības sistēma;  
*ES* – Eiropas savienība;  
*ETCS* – Eiropas vilcienu kontroles sistēma;  
*FDD* – frekvenčdales duplexs;  
*FRMCS* – nākotnes dzelzceļa mobilo sakaru sistēma;  
*GSM* – globālā mobilo sakaru sistēma;  
*HSPA* – ātrdarbīgā pakešpiekļuve;  
*HTML* – hiperteksta iezīmēšanas valoda;  
*IEEE* – Elektronikas un elektrotehnikas inženieru institūts;  
*IP* – interneta protokols;  
*ITU* – starptautiskā telekomunikāciju savienība;  
*KKSL* – koaksiālo kabeļu sakaru līnija;  
*KPI* – izpildes pamatrādītājs;  
*LAC* – lokālā apgabala kods;

*LAN* – lokālais tīkls;  
*LTE* – ilgtermiņa evolūcija;  
*MCC* – publiskā mobilā telefonu tīkla valsts kods;  
*MNC* – publiskā operatora publiskā mobilā telefonu tīkla kods;  
*MS* – mobilā stacija;  
*MST* – mobilo sakaru tīkls;  
*MUX* – multipleksors;  
*NLOS* – netiešā redzamība;  
*OTDR* – optiskais laika domēna reflektometrs;  
*PC* – personālais dators;  
*PDH* – plesiohronā ciparu hierarhija;  
*PIFA* – planāra invertējama mikrosloksnes antena;  
*PS* – polistirols;  
*PSTN* – publiskais komutējamais telefonu tīkls;  
*SDH* – sinhronā ciparu hierarhija;  
*SHF* – superaugsta frekvence;  
*SIM* – abonenta identifikācijas modulis;  
*SIP* – sesijas inicializācijas protokols;  
*SKSL* – simetrisko kabeļu sakaru līnija;  
*ŠOSL* – šķiedru optiskā sakaru līnija;  
*TCP* – pārraides vadības protokols;  
*TDD* – laukdales duplexs;  
*UDP* – lietotāja datogrammu protokols;  
*UE* – lietotāja iekārta;  
*UHF* – sevišķi augsta frekvence;  
*UIC* – Starptautiskā dzelzceļu savienība;  
*VC* – virtuālais konteineris.

# SATURS

|   |    |
|---|----|
| Darba vispārējs raksturojums .....  | 6  |
| Tēmas aktualitāte.....  | 6  |
| Darba mērķis un uzdevumi .....  | 6  |
| Pētījumu metodika.....  | 6  |
| Zinātniskā novitāte .....   | 7  |
| Praktiskā vērtība.....  | 7  |
| Publikācijas .....  | 8  |
| Darba struktūra .....   | 9  |
| 1. Kabeļu sakaru līniju matemātiskie modeļi dzelzceļa transportā .....            | 10 |
| Simetrisko kabeļu sakaru līnijas (SKSL) .....                                     | 10 |
| Koaksiālo kabeļu sakaru līnijas (KKSL).....                                       | 11 |
| Šķiedru optiskās sakaru līnijas (ŠOSL).....                                       | 13 |
| 2. Mobilo sakaru tīklu (MST) matemātiskie modeļi dzelzceļa transportā .....       | 14 |
| MST projektēšanas pamatprincipi.....  | 15 |
| MST radioviļņu izplatīšanās īpatnības .....                                       | 15 |
| MST apkalpošanas zonas aprēķināšanas principi .....                               | 16 |
| Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi .....                                 | 16 |
| 3. Telemātikas sistēmu sakaru līniju inženieraprēķinu algoritmi un pētījumi ..... | 18 |
| Kabeļu sakaru līniju automatizēto inženieraprēķinu algoritms.....                 | 19 |
| SKSL parametru aprēķināšanas algoritms .....                                      | 21 |
| KKSL parametru aprēķināšanas algoritms.....                                       | 22 |
| ŠOSL parametru aprēķināšanas algoritms .....                                      | 23 |
| ŠOSL eksperimentālie mērījumi .....   | 24 |
| MST šūnas radiopārklājuma zonas aprēķināšanas algoritms .....                     | 26 |
| MST radiopārklājuma eksperimentālie mērījumi.....                                 | 28 |
| MST parametru mērījumu veikšanas un apstrādes metodoloģija .....                  | 29 |
| MST radiopārklājuma mērījumu rezultāti.....                                       | 29 |
| Heterogēna tīkla simulācijas modeļi .....   | 31 |
| Heterogēnā tīkla monitoringa un mērījumu metodes.....                             | 32 |
| Heterogēnā tīkla modelēšanas rezultāti.....                                       | 35 |
| Secinājumi .....  | 36 |
| Literatūras saraksts .....  | 39 |

# DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Telemātikas sistēmas, attīstoties tehnoloģijām, tiek izmantotas arvien vairāku dzelzceļa transporta uzdevumu risināšanā: dzelzceļa iekārtu tālsignalizācijā un tāl vadībā; 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 darbības 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 multiplexori *SURPASS hiT 7020*, komutatori *ALOE Systems MVTS Softswitch* un *Digium Asterisk Softswitch*, maršrutētājs *HUAWEI B535-232*, telefonu adapteris *Cisco ATA 186*, *VoIP* programmtelefoni *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 (KKSĻ) un šķiedru optiskajām (ŠOSĻ) 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

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 vilnis, 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.

Atkarībā no izmantotā frekvenču diapazona un virzošās sistēmas konstrukcijas, caur kuru izplatās elektromagnētiskie viļņi, izmanto kādu no divām aprēķinu metodēm [50]: ķēžu teorijas vai elektrodinamikas lauku vienādojumus (Maksvela vienādojumus).

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 [49].

## **Simetrisko kabeļu sakaru līnijas (SKSL)**

Simetriskais kabelis – sakaru kabelis, kas sastāv no diviem vai vairākiem savītiem vai paralēliem vadiem. Vadi ir savstarpēji izolēti. Simetrisko kabeļu sakaru līnija (SKSL) ir elektriska ķēde ar izkļiedētiem 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 [36], [37].

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

Līnijas pretestība nosaka enerģijas zudumus vados un kabeļa metāliskajos elementos. Induktivitāte raksturo vadītāja spēju uzglabāt elektroenerģiju. Simetriskā kabeļa garuma kapacitāte raksturo vadītāju spēju uzglabāt lādiņu un nav atkarīga no signāla frekvences. Sakaru līnijas garuma vadītspēja atspoguļo enerģijas zudumus kabeļa izolācijā.

Sakaru līnijas sekundāros parametrus (viļņu pretestību  $Z_v$ , garuma rimšanas koeficientu  $\alpha$ , fāzes koeficients  $\beta$ , signāla izplatīšanās ātrumu  $v$ , saīsinājuma koeficients  $K_s$ , signāla

izplatīšanās laiks  $T_{iz}$ ) aprēķina pēc vispārējām formulām, ņemot vērā primāro parametru vērtības. Līnijas kopējā darba rīšana tiek aprēķināta kā visu zudumu summa.

Simetriskās sakaru līnijas primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība un attiecīgas parametru noteikšanas formulas ir apkopotas 1.1. tabulā.

1.1. tabula

SKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība

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

### Koaksiālo kabeļu sakaru līnijas (KKSL)

Koaksiālo kabeļu sakaru līniju (KKSL) veido divi metāliski vadītāji: viens – caurules formā (ekrāns), otrs – ievietots caurulē. Starp ekrānu un centrālo vadu atrodas izolējošs materiāls. 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 [36], [37].

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.

Sakaru līnijas sekundāros parametrus (viļņu pretestību, garuma rimšanas koeficientu, fāzes koeficientu, signāla izplatīšanās ātrumu, saīsinājuma koeficientu, signāla izplatīšanās laiku) aprēķina, izmantojot primāro parametru vērtības. Koaksiālās sakaru līnijas primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība un attiecīgas parametru noteikšanas formulas ir apkopotas 1.2. tabulā.

1.2. tabula

KKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas secība

| N. p. k. | Parametrs                   | Formula, mērvienība  | Mainīgie, mērvienības   |
|----------|-----------------------------|--|---|
| 1.       | Garuma pretestība           | $R = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_a \cdot d} + \frac{1}{\sigma_b \cdot D} \right) \cdot 10^6, \frac{\Omega}{\text{km}}$                                      | $R_0, \Omega/\text{km}$<br>$d, \text{mm}$<br>$a, \text{mm}$                       |
| 2.       | Garuma induktivitāte        | $L = \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\sigma_a \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_b \cdot D}} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{H}}{\text{km}}$ | $d, \text{mm}$<br>$a, \text{mm}$  |
| 3.       | Garuma kapacitāte           | $C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln(D/d)}, \frac{\text{F}}{\text{km}}$   | $d, \text{mm}$<br>$a, \text{mm}$  |
| 4.       | Garuma vadītspēja           | $G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \text{tg } \delta, \frac{\text{S}}{\text{km}}$   | $f, \text{Hz}$<br>$C, \text{F/km}$  |
| 5.       | Viļņu pretestība            | $Z_v = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{D}{d} \right), \Omega$  | $d, \text{mm}$<br>$a, \text{mm}$  |
| 6.       | Garuma rimšanas koeficients | $\alpha = 8,69 \cdot \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{km}}$  | $R, \Omega/\text{km}$<br>$L, \text{H/km}$<br>$C, \text{F/km}$<br>$G, \text{S/km}$ |
| 7.       | Fāzes koeficients           | $\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{\text{rad}}{\text{km}}$  | $f, \text{Hz}$<br>$L, \text{H/km}$<br>$C, \text{F/km}$                            |
| 8.       | Signāla izplatīšanās ātrums | $v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{\text{km}}{\text{s}}$   | $L, \text{H/km}$<br>$C, \text{F/km}$  |
| 9.       | Saīsinājuma koeficients     | $K_s = \frac{c}{v}$  | $c, \text{km/s}$<br>$v, \text{km/s}$  |
| 10.      | Signāla izplatīšanās laiks  | $T_z = \frac{L_g}{v}, \text{s}$  | $L_g, \text{km}$<br>$v, \text{km/s}$  |

### Šķiedru optiskās sakaru līnijas (ŠOSL)

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

Būtiskākie no ŠOSL parametriem [39] ir skaitliskā apertūra  $NA$ , laušanas rādītāju relatīvā starpība  $\Delta$ , normētā frekvence  $V$ , modu kritiskais viļņa garums  $\lambda_{kr}$  un kritiskā frekvence  $f_{kr}$ . Optiskā signāla jaudas zudumu lielums tiek novērtēts ar garuma rimšanas koeficientu  $\alpha$ , kas ir atkarīgs no zudumiem optiskajā viļņvadā un kabelī. Signālu impulsu paplašinājums optiskajā šķiedrā tiek saukts par dispersiju  $\tau$ , un tā ietekmē caurlaides joslas platumu  $\Delta F$ .

ŠOSL parametru aprēķināšanas secība un parametru formulas ir apkopotas 1.3. tabulā.

1.3. 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        | $V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda}$   | $d$ , $\mu\text{m}$<br>$\lambda$ , $\mu\text{m}$   |
| 4.       | Kritiskā viļņa garums         | $\lambda_{kr} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2,405}$ , $\mu\text{m}$  | $d$ , $\mu\text{m}$  |
| 5.       | Kritiskā frekvence            | $f_{kr} = \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3$ , MHz   | $\lambda_{kr}$ , $\mu\text{m}$   |
| 6.       | Fāžu ātrums                   | $v_\varphi \leq \frac{c}{n_1} \cdot 10^3$ , $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  | $c$ , km/s   |
| 7.       | Garuma rimšanas koeficients   | $\alpha = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot \text{tg } \delta}{\lambda} \cdot 8,69 \cdot 10^8 + \frac{K_R}{\lambda^4}$ , $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$         | $\lambda$ , $\mu\text{m}$<br>$K_R$ , $\mu\text{m}^4 \cdot \text{dB}/\text{km}$               |
| 8.       | Kopējā dispersija             | $\tau = \Delta\lambda \cdot \left( M(\lambda) + \frac{2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9 \right)$ , $\frac{\text{ps}}{\text{km}}$ | $\Delta\lambda$ , nm<br>$M(\lambda)$ , ps/(nm·km)<br>$c$ , km/s<br>$\lambda$ , $\mu\text{m}$ |
| 9.       | Kanāla caurlaides josla       | $\Delta F = \frac{k_f}{\tau} \cdot 10^{12}$ , Hz   | $\tau$ , ps  |
| 10.      | Reģenerācijas iecirkņa garums | $L_m = \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha + (a_{ns}/L_b)}$ , dB       | $P_r, P_u$ , dBm<br>$\alpha_r, \alpha_s, \alpha_{ns}, \alpha_{saz}$ , dB<br>$a$ , dB/km      |

## 2. MOBILO SAKARU TĪKLU (MST) MATEMĀTISKIE MODELI DZELZCEĻA TRANSPORTĀ

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*). *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.

*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 vilciena aprīkojumu un lauka iekārtu elementus, kas veido sistēmu, kas uzrauga vilciena satiksmi. Otrais *ERTMS* elements ir *GSM-R* – dzelzceļam optimizēts mobilo sakaru tīkls, kurā tiek realizēti dzelzceļam specifiski balss un datu pārraides pakalpojumi. *GSM-R* nodrošina bezvadu sakarus otrā un trešā *ETCS* līmenī.

*GSM-R* izstrāde tika veikta, balstoties publiskajā mobilo sakaru standartā – *GSM*, un tā tika pabeigta 2000. gadā. *GSM-R* izstrādes izmaksas bija ievērojami zemākas, jo vajadzēja tikai papildināt [6] esošā standarta funkcionālās prasības un nebija nepieciešams projektēt visu sistēmu no nulles. *GSM-R* sistēmai ir nepieciešama ātrdarbīga un uzticama MST infrastruktūra dzelzceļa sakaru nodrošināšanai. Standarts izmanto 876–880 MHz frekvenču diapazonu augšpusaitei un 921–925 MHz lejpusaitei [27], [52]. Šie diapazoni ir rezervēti dzelzceļiem visā Eiropas Savienībā.

*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 [9], [27]. Mūsdienās *GSM-R* sistēmas tiek uzskatītas par morāli novecojošām [42] – funkcionāli tās vairs neatbilst dzelzceļa operatoru pieprasījumam, 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.) [20], 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.

Eiropas Savienības Komisijas 2021. gada 28. septembra Īstenošanas lēmumā (ES) 2021/1730 noteikts, ka Eiropā *FRMCS* sistēmai tiks izmantotas: 874,4–880,0 MHz frekvenčdales duplexa režīma (*FDD*) augšpusaites pārraidei (no *MS* uz *BTS*); 919,4–

925,0 MHz frekvenčdales duplexa režīmā (*FDD*) lejupsaites pārraidei (no *BTS* uz *MS*); 1900–1910 MHz laikdales duplexa režīmā (*TDD*).

### 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.

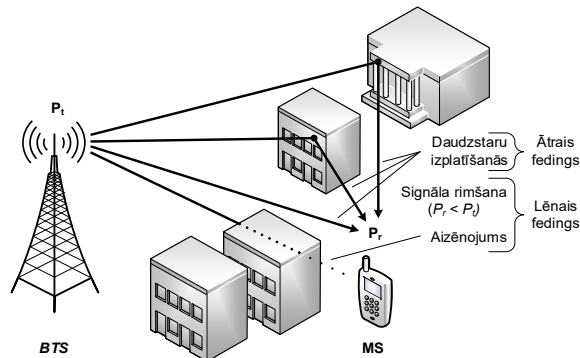
Trešais mobilā tīkla uzbūves princips – mobilo sakaru tīklam ir jābūt mērogojamam. Mobilā tīkla operatoram nepieciešamības gadījumos jābūt iespējai paplašināt MST pārklājuma zonas laukumu, mainīt tīkla infrastruktūras, ieviest jaunus standartus – nodrošināt jaunāko paaudžu aparatūras un tehnoloģiju atbalstu.

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.

### MST radioviļņu izplatīšanās īpatnības

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 izplatās galvenokārt Zemes viļņu veidā (to difrakcija ir vāji izteikta), lielākos attālumos – pateicoties troposfēras izkliedei, un troposfēras viļņvadu virzošās iedarbības ietekmē.

Reālajā vidē uz Zemes radiosignālus neizbēgami ietekmē fedings (*fading*) – uztveramā signāla vājināšana un līmeņu svārstības, kas notiek daudzceļu izplatīšanās, aizēnojumā vai vides un laikapstākļu dēļ [23]. Fedingsam ir divas sastāvdaļas: ātrā un lēnā (2.1. att.).



2.1. att. Fedinga sastāvdaļas un to avoti.



Lēnais fedings rodas, pārvietojot mobilo staciju lielā distancē, kas izraisa izplatīšanās vides nosacījumu un raksturlielumu izmaiņas, rezultātā tiek novērots radiosignālā vājinājums [26], [35], kura lielums atkarīgs no attāluma starp *BTS* un *MS*.

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 [47].

### **MST apkalpošanas zonas aprēķināšanas principi**

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.

Lietojot apkalpošanas zonas radiopārklājuma determinēto metodi [27], [31], bāzes stacijas var izvietot tā, lai minimizētu radiokanāla izmantošanas intervāla vidējo lielumu (šūnu skaitu vienā klasterī) 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.

### **Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi**

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 [4], [44], kas apraksta elektromagnētisku viļņu izplatīšanās nosacījumus, nosaka dažādu šķēršļu, atstarošanas, izkliedes un difrakcijas avotu esamību vai tās varbūtību un elektromagnētiskās enerģijas zudumus traktā [45]. Lai sasniegtu augstu aprēķinu precizitāti, teorētiski modeļus var uzlabot, izmantojot eksperimentālu mērījumu un braukšanas testu (*drive tests*) rezultātus.

Inženieraprēķinos izmantojamie 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.

2.1. tabulā apkopoti matemātiskie modeļi [31], ar kuru palīdzību var noteikt elektromagnētisko viļņu jaudu, ko izstaro sakaru tīkla bāzes stacija un kas tiek uztverta ar mobilo staciju pie šādiem parametriem:  $P_t$  – *BTS* antenas raidītāja jauda, dBm;  $f$  – darba diapazona vidējā frekvence, MHz;  $\lambda$  – darba viļņa garums, m;  $G_t$ ,  $G_r$  – *BTS*, *MS* antenu pastiprinājuma koeficienti;  $h_t$ ,  $h_r$  – *BTS*, *MS* antenu pacelšanas augstumi, m;  $r$  – attālums no *BTS* raidītāja līdz *MS* uztvērējam, km;  $f_0$  – normējošā frekvence,  $f_0 = 1$  MHz;  $\lambda_0$  – normējošais viļņa garums,  $\lambda_0 = 1$  m;  $h_0$  – normējošais augstums,  $h_0 = 1$  m;  $r_0$  – normējošais attālums starp *BTS* un *MS*,  $r_0 = 1$  km.

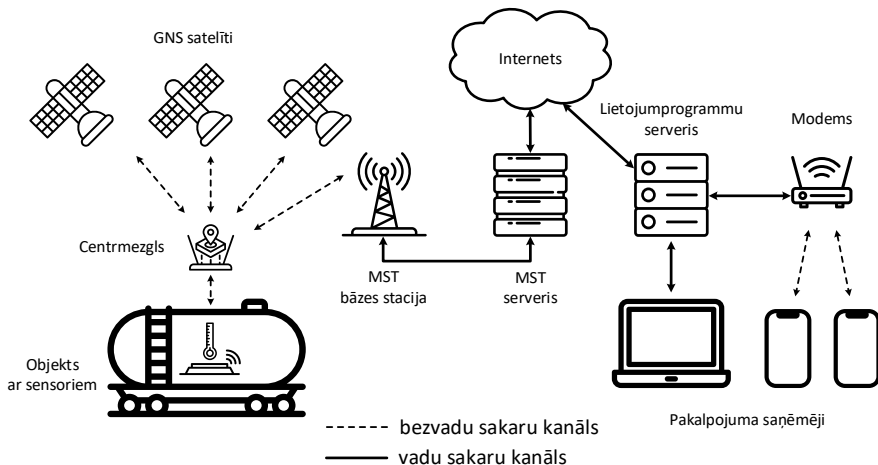
## MST radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi

| N. p. k. | Modelis                                | Galvenās raksturojošās formulas   |
|----------|--|---|
| 1.       | Vienstaru [16]                         | $P_{rLOS} = P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) < 0,$ <p>kur <math>P_r</math> – vidējais jaudas līmenis signāla uztveršanas punktā tiešās redzamības apstākļos, dBm.</p>  |
| 2.       | Divstaru [15]                          | $P_r \approx P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r + 20 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + 20 \lg\left(\frac{h_r}{h_0}\right) - 40 \lg\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right),$ <p>kur <math>P_r</math> – vidējais jaudas līmenis signāla uztveršanas punktā, dBm.</p>   |
| 3.       | Daudzstaru [14], [15]                  | $P_r = P_{rLOS} - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - X_g,$ <p>kur <math>n</math> – rimšanas eksponenta; <math>X_g</math> – gadījuma lielums pie Gausa normālsadalījuma, kurš norāda uz signāla vājinājumu fedinga dēļ.</p>  |
| 4.       | Lee [18], [19]                         | $P_r = P_{r0} - 10\gamma \cdot \lg\left(\frac{r}{r_{n0}}\right) - 10n \cdot \lg\left(\frac{f}{f_{n0}}\right) + 10 \lg(\alpha_0),$ <p>kur <math>P_{r0}</math> – nominālie zudumi nominālajā attālumā <math>r_0</math>, dBm; <math>\gamma</math> – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma; <math>r_{n0}</math> – nominālais attālums starp <i>BTS</i> un <i>MS</i>, <math>r_{n0} = 1,6</math> km; <math>n</math> – frekvences korekcija koeficients, atkarībā no vides, <math>2 \leq n \leq 3</math>; <math>f</math> – darba diapazona vidējā frekvence, MHz; <math>f_{n0}</math> – nominālā darba frekvence, <math>f_{n0} = 900</math> MHz; <math>\alpha_0</math> – parametru korekcijas faktors, dBm.</p> |
| 5.       | Okumura [45]                           | $P_r = P_{rLOS} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area},$ <p>kur <math>A_{mu}(f, r)</math> – rimšanas komponente pilsētai pie uzdotas frekvences <math>f</math> un attāluma <math>r</math> starp <i>BTS</i> un <i>MS</i>, dB; <math>H(h_t)</math> – <i>BTS</i> antenas pastiprinājuma koeficients, dB; <math>h_{m0}</math> – nominālais <i>BTS</i> antenas pacelšanas augstums, <math>h_{m0} = 200</math> m; <math>H(h_r)</math> – <i>MS</i> antenas pastiprinājuma koeficients, dB; <math>h_{r0}</math> – nominālais <i>MS</i> antenas pacelšanas augstums, <math>h_{r0} = 3</math> m; <math>G_{area}</math> – signāla rimšanas korekcijas faktors atkarībā no vides, dB.</p>                                    |
| 6.       | Okumura–Hata [11]                      | $P_{rHata} = P_t - 69,55 - 26,16 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - \left[44,9 - 6,55 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right] \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 13,82 \lg\left(\frac{h_r}{h_0}\right) + a(f, h_r) + K(f),$ <p>kur <math>a(f, h_r)</math> – labojuma koeficients <i>MS</i> antenas pacelšanas augstumam, dB; <math>K(f)</math> – zudumu komponente, atkarībā no vides, dB; <math>f_0</math> – normējošā frekvence, <math>f_0 = 1</math> MHz.</p>   |
| 7.       | COST231 Hata [5]                       | $P_r = P_t - A - B \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 13,82 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) - \left[44,9 - 6,55 \lg\left(\frac{h_r}{h_0}\right)\right] \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - C,$ <p>kur <math>A</math> – zudumu pastāvīgā komponente, dB; <math>B</math> – frekvences korekcijas faktors; <math>a(f, h_r)</math> – <i>MS</i> antenas augstuma labojuma koeficients, dB; <math>C</math> – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no apkārtējās vides, dB.</p>   |
| 8.       | COST231 Walfish–Ikegami (WI) [5], [13] | $P_{rLOS} = P_t + L_{LOS} = P_t - 42,6 - 26 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right),$ $P_{rNLOS} = P_t + L_{rt},$ <p>kur <math>L_{LOS}</math> – zudumi trasē tiešredzamības nosacījumos, dB; <math>L_{rt}</math> – summārie zudumi trasē <i>NLOS</i> režīmā, dB.</p>   |
| 9.       | Hata–Davidson [45]                     | $P_r = P_{rHata} - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r),$  |

| N. p. k. | Modelis  | Galvenās raksturojošās formulas   |
|----------|--|---|
|          |  | kur $P_{r\ Hata}$ – signāla jauda uztveršanas punktā pēc <i>Okumura–Hata</i> modeļa, dBm; $A(h_b, r)$ , $S_1(r)$ – korekcijas faktori atkarībā no attāluma starp <i>BTS</i> un MS, dB; $S_2(h_b, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no <i>BTS</i> antenas pacelšanas augstuma un attāluma starp <i>BTS</i> un MS, dB; $S_3(f)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona, dB; $S_4(f, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp <i>BTS</i> un MS, dB.   |
| 10.      | Radioviļņu izplatīšanās mežā [53]  | $P_r \approx P_{r\ LOS} - \alpha_{mF} \cdot r + 10 \lg[\zeta(r)],$ kur $\alpha_{mF}$ – garuma rimšanas koeficients, dB/km; $\zeta(r)$ – korekcijas faktors (virsmas viļņa ietekmē).   |
| 11.      | Radioviļņu izplatīšanās brīvajā telpā pie atstarošanas no mežu masīva [53] | $P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{V_F} \frac{F_t(\theta)^2 \cdot \sigma(\phi)}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot V_0} dV,$ kur $P_r$ – signāla jauda uztveršanas punktā, W; $F_t(\theta)$ – raidītāja antenas vērsuma diagramma, $F_t(\theta) = 1$ visvirzienu antenām; $V_F$ – meža masīva tilpums, m <sup>3</sup> ; $V_0$ – tilpuma normējošais parametrs, $V_0 = 1$ m <sup>3</sup> ; $\phi$ – leņķis starp radioviļņa krišanas virzienu uz meža virsmas un no tās atstarotā stara virzienu, °; $\sigma(\phi)$ – tilpuma vienības izkliedes īpatnējais efektīvais laukums, m <sup>2</sup> ; $r_1$ – attālums no <i>BTS</i> raidītāja līdz meža masīvam, km; $r_2$ – attālums no meža masīva līdz MS uztvērējam, km. |

### 3. TELEMĀTIKAS SISTĒMU SAKARU LĪNIJU INŽENIERAPRĒĶINU ALGORITMI UN PĒTĪJUMI

Dzelzceļa infrastruktūras elementu savstarpējās mijiedarbības organizācija ir viena no galvenajām telemātikas sistēmu projektēšanas problēmām. Tipiskā telemātikas sistēma iekļauj aparāturu, kas ir savstarpēji savienota ar vairākiem sakaru kanāliem (3.1. att.).



3.1. att. Telemātikas sistēmas un tās iekārtu piemērs.

Heterogēna telekomunikācijas tīkla, ko veido telemātikas sistēmu nevienādabīgi 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 inženierisinājumus.

### 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.

Kabeļu sakaru līniju parametru aprēķināšanas formulas, kas ir aprakstītas šī darba 1. nodaļā, 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 mainīgos SI mērvienībās;
- 2) izmantot vienādus SI mērvienību daudzkārtņus vieniem un tiem pašiem mainīgajiem 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, un 1. nodaļā piedāvātās formulas jau atbilst šiem kritērijiem.

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

|   |  |
|---|--|
| $\lambda_t := (0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1 \ 1.1 \ 1.2 \ 1.3 \ 1.4 \ 1.5 \ 1.6 \ 1.7 \ 1.8 \ 1.9 \ 2 \ 2.1 \ 2.2)^T \mu\text{m}$      |  |
| $M_t := (189.6 \ 114.9 \ 73.9 \ 46.6 \ 26.7 \ 12.2 \ 0.46 \ -9 \ -16.7 \ -23 \ -29 \ -35 \ -39.5 \ -45 \ -49 \ -54)^T$        | $\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$      |
| $B_t := (3.46 \ 3.97 \ 4.58 \ 5.18 \ 5.75 \ 6.32 \ 7.01 \ 7.5 \ 8.2 \ 8.78 \ 9.79 \ 11.62 \ 14.15 \ 17.43 \ 21.56 \ 26.55)^T$ | $\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$      |
| $M(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, M_t), \lambda_t, M_t, \lambda_f)$                                    | $\text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ |
| $B(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, B_t), \lambda_t, B_t, \lambda_f)$                                    | $\text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ |

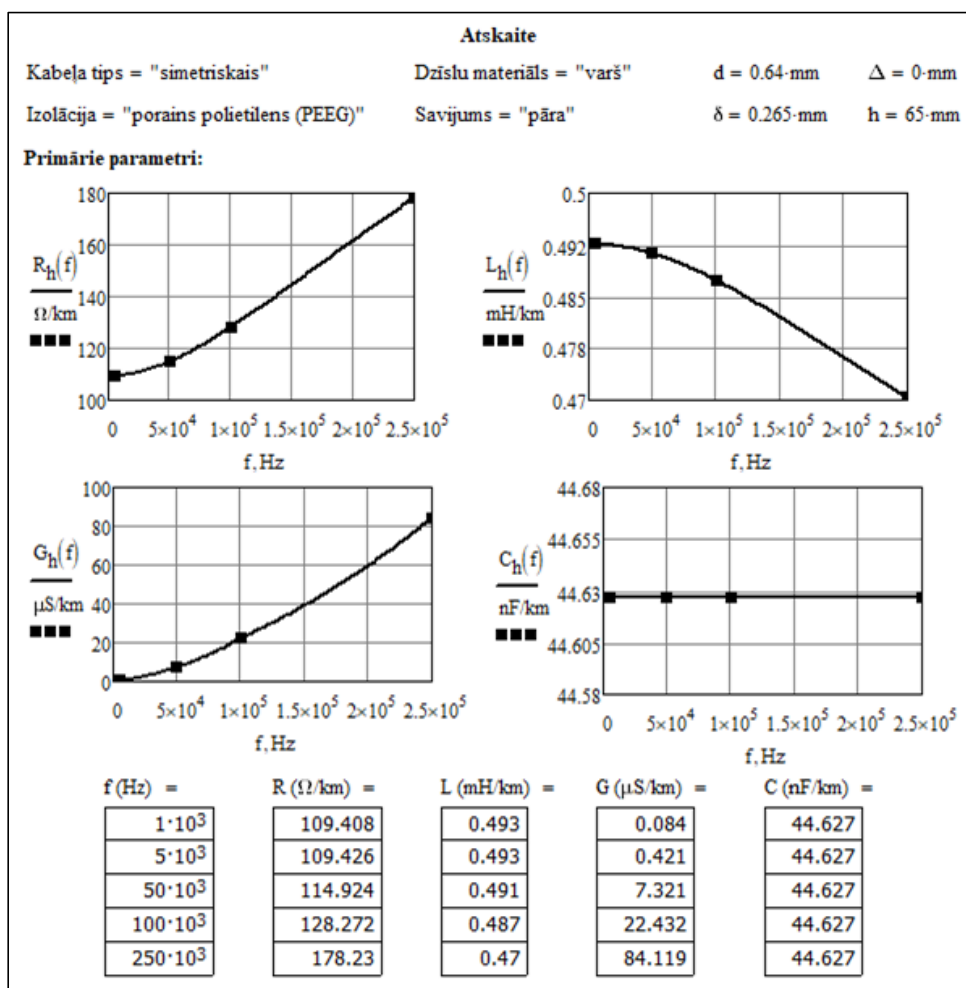
3.2. att. Īpatnējās materiālās un viļņvada dispersijas izteikšana funkciju veidā *Mathcad* vidē.

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):  $a, D, \psi - a(k_{st.}), D(k_{st.}), \psi(k_{st.}); \rho, \sigma - \rho(k_{vm.}), \sigma(k_{vm.}); F(x),$

$G(x), H(x), Q(x) - F(\sigma, d, f), G(\sigma, d, f), H(\sigma, d, f), Q(\sigma, d, f); P_S - P_S(k_{st}); \varepsilon_r, \text{tg}\delta - \varepsilon_r(k_{im}, f), \text{tg}\delta(k_{im}, f).$

Simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas kabeļu parametru aprēķinu automatizēšanai, balstoties izstrādātajos algoritmos, tika piedāvātas 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 raksturlielnes.

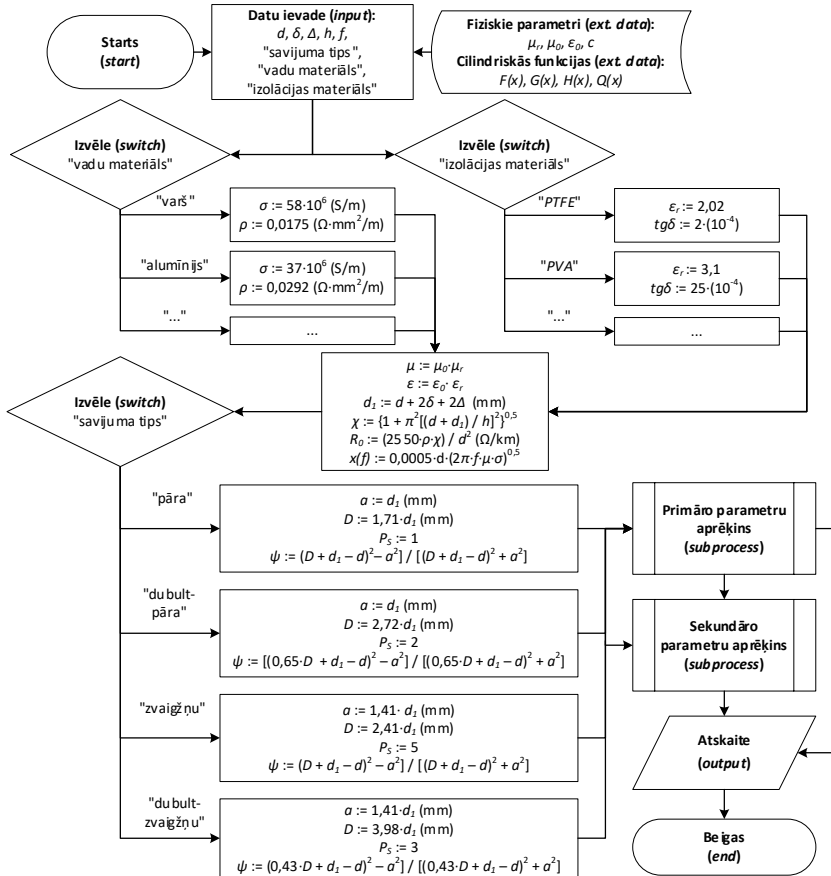
Visi līnijas parametru lielumi un grafiki *Mathcad* programmā tiek aprēķināti un konstruēti automātiski. Kabeļu sakaru līnijas matemātiskās modelēšanas rezultāti tiek apkopoti atskaitēs (3.3. att.) attiecīgās *Mathcad* programmas beigās.



3.3. att. SKSL matemātiskās modelēšanas *Mathcad* programmas atskaites fragments.

### SKSL parametru aprēķināšanas algoritms

Simetrisku sakaru līniju parametru aprēķināšanas programmas izstrādei *Mathcad* vidē, balstoties aprēķināšanas secībā (1.1. tab.), tika izveidots algoritms (3.4. att.). Šajā algoritmā primāro un sekundāro SKSL parametru aprēķini ir doti apakšprogrammu veidā.



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

Piedāvātā SKSL matemātiskā modeļa inženieraprēķinu precizitātes noteikšanai tika apskatīts *Belden 7701 NH* simetriskais kabelis ar zināmiem primāriem un sekundāriem parametriem. Kabeļa tehniskajā aprakstā, neskaitot informāciju par kabeļa konstrukciju un mehāniskajām īpašībām, ražotājs norāda kabeļa sertifikācijas procesā eksperimentāli iegūtus kabeļa elektriskos parametrus noteiktajās frekvencēs.

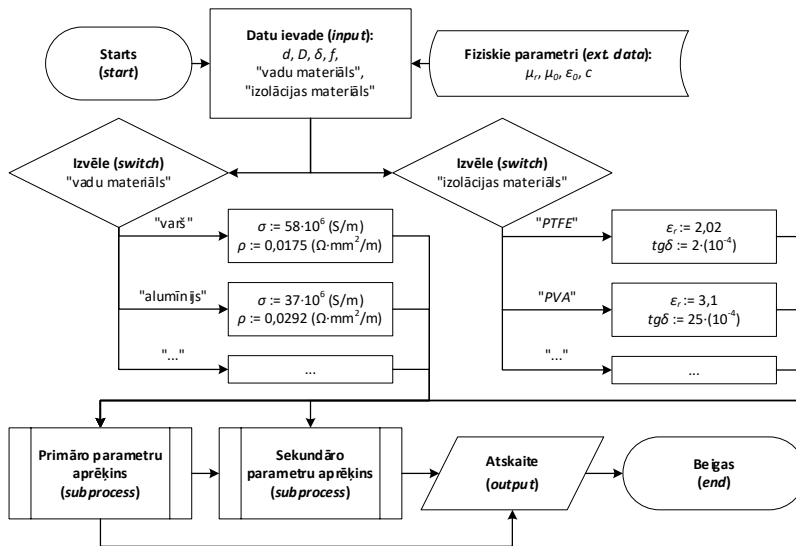
Sakaru līnijas aprēķinātie parametri un parametri no kabeļa datu lapas tiek salīdzināti 3.1. tabulā. Kā ir redzams, viļņu pretestības, garuma pretestības, kapacitātes un rimšanas koeficienta aprēķinātās vērtības nepārsniedz šo parametru standarta lielumus. Kopumā kabeļa *Belden 7701 NH* aprēķinātie un standarta parametri savstarpēji atšķirās ne vairāk par 5 %, kas liecina par izmantoto matemātisko modeļu piemērotību izmantošanai simetrisko sakaru kabeļu līniju projektēšanas inženierpraksē.

SKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

| Parametrs                     | Frekvence, MHz | Aprēķinātā vērtība | Standarta vērtība | Mērvienība         |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Viļņu pretestība              | –              | 99,793             | 100               | $\Omega$           |
| Garuma pretestība līdzstrāvai | –              | 54,67              | 55                | $\Omega/\text{km}$ |
| Garuma kapacitāte             | –              | 44,627             | 46                | pF/m               |
| Garuma rimšanas 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               |                    |

### KKSL parametru aprēķināšanas algoritms

Koaksiāla kabeļa sakaru līnijas parametru aprēķināšanas kārtība nebūtiski atšķiras no simetriska kabeļa līnijas inženieraprēķiniem. Attiecīgi, balstoties SKSL aprēķināšanas algoritmā (3.4. att.) un KKSL parametru noteikšanas secībā (1.2. tab.), tika realizēts KKSL primāro un sekundāro parametru aprēķināšanas algoritms *Mathcad* programmas izstrādei.

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

KKSL inženieraprēķinu precizitātes noteikšanai tika izvēlēts *Belden CX3C1* koaksiālais kabelis, kas paredzēts izmantošanai augstfrekvenču (līdz 2,15 GHz) signālu pārraides sistēmās.

*Belden CX3C1* kabeļa aprēķinātie parametri apkopoti 3.2. tabulā, kur tie tiek salīdzināti ar parametriem no šī kabeļa datu lapas.

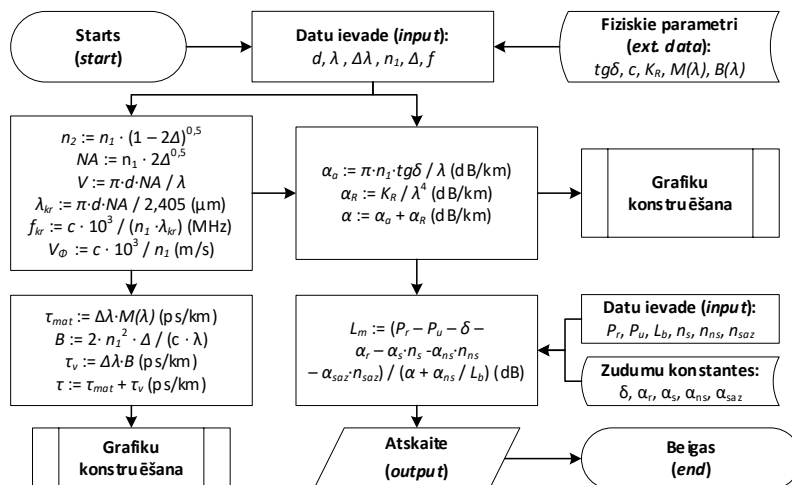
KKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

| Parametrs                   | Frekvence, MHz | Aprēķinātā vērtība | Standarta vērtība | Mērvienība |
|-----------------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------|
| Viļņu pretestība            | –              | 74,959             | 75                | $\Omega$   |
| 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 CX3CI* kabeļa standarta parametru lielumiem ne vairāk par 5 %, kas ļauj izmantot aprēķinos izmantotos modeļus koaksiālo kabeļlīniju projektēšanas inženierpraksē.

### ŠOSL 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 (3.6. att.). Baltoties piedāvātajā algoritmā, tika izstrādāta ŠOSL parametru automatizēto aprēķinu programma *Mathcad* vidē.

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

Šķiedru optikas sakaru līnijas parametru aprēķina analīzei tika izmantots *Belden LT096FM* vienmodu optiskais kabelis. Kabelim ir 96 optiskās šķiedras, katras šķiedras diametrs ir 8,6  $\mu\text{m}$ .



*Belden LT096FM* kabelis 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.

3.3. tabula

ŠOSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

| Parametrs  | Aprēķinātā vērtība | Standarta vērtība | Mērvienība |
|--|--------------------|-------------------|------------|
| Kritiskā viļņa garums                            | 1,232              | 1,26              | μm         |
| Garuma rimšanas koeficients, $\lambda = 1310$ nm | 0,357              | 0,35              | dB/km      |
| Garuma rimšanas koeficients, $\lambda = 1550$ 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 %. 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.

### ŠOSL eksperimentālie mērījumi

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

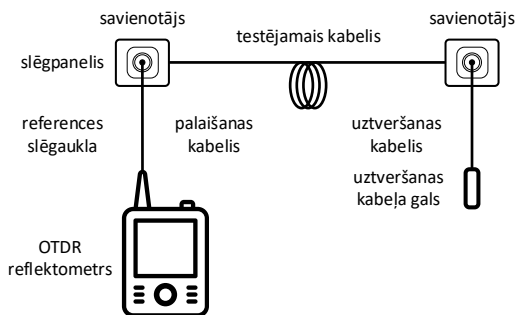
Optiskās šķiedras zudumu mērījumi, izmantojot laika domēna optisko reflektometru (*Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR*) ir viena no svarīgākajām ŠOSL pārbaudēm. *OTDR* ir optoelektriskais mērījumu instruments, kas paredzēts optiskās šķiedras parametru raksturošanai. Reflektometrs no līnijas viena gala ievada šķiedrā optisku impulsu virkni un uztver to līnijas otrajā galā. Signāls šķiedras izejā var būt slāpēts, izkļiedēts vai vairākkārt atstarots kabeļa materiāla nevienmērīgumu dēļ, un šo parādību analīze ļauj iegūt detalizētu informāciju par optiskā kabeļa stāvokli un līnijas parametriem kopumā.

Lai pārbaudītu piedāvāto ŠOSL garuma rimšanas koeficienta un kopējo zudumu aprēķināšanas precizitāti, tika veikti 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* (3.7.a. att.) un *FTB-1-S2-8G*.

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 3.7. b attēlā.



a)



b)

3.7. att. EXFO AXS-100 OTDR reflektometra ārējais izskats (a) un pieslēgšanas shēma (b).

Mērījumu rezultātā tika iegūtas atsevišķu kabeļa šķiedru zudumu vērtības katrā no četriem apakšposmiem: Rīga–Šķirotava; Šķirotava–Dole; Šķirotava–Salaspils; Dole–Salaspils. Mērījumi tika apkopoti, papildināti ar tehniskās dokumentācijas informāciju par līnijās esošām šķiedras metinājuma vietām un citiem savienojumiem, kas ietekmē zudumus, un izanalizēti. 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, metinājumu un savienojumu skaitu, kā arī citus signāla jaudu ietekmējošos faktoros. Parametru noteikšanai izmantota ŠOSL aprēķinu programma *Mathcad* vidē. Pārstrādātais mērījumu apkopojums, salīdzinot ar inženieraprēķinu rezultātā iegūtām teorētiskām zudumu vērtībām, apkopots 3.4. tabulā.

3.4. 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                   |

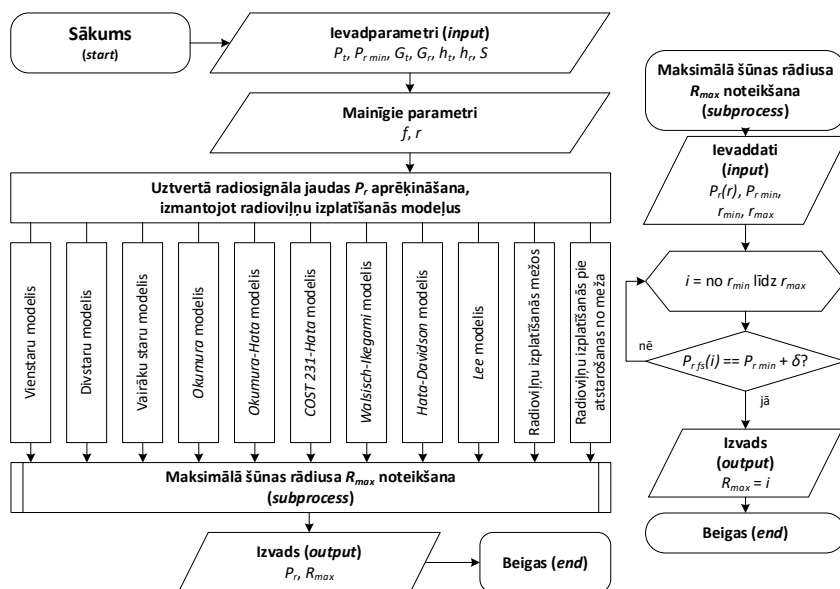
Aprēķinātie kopējie zudumi šķiedru optiskajā līnijā, izmantojot zināmos kabeļu parametrus un sakaru tīkla elementu pieslēgšanas shēmas, atšķirās no vidējiem eksperimentāliem aprēķiniem ne vairāk par 5 %. Var secināt, ka piecus gadus veciem optiskās šķiedras kabeļiem, kas tika pārbaudīti, nav novērojama degradācija un visi pārraidī raksturojošie parametri ir normas robežās; 1. nodaļā apskatītie ŠOSL matemātiskie modeļi sniedz diezgan precīzu parametru prognozi 1310 nm un 1550 nm viļņu garumos.

### MST šūnas radiopārkļājuma zonas aprēķināšanas algoritms

MST šūnas radiopārkļājuma 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 nozīme sakaru organizēšanā, un radiopārkļājuma vienmērīguma nodrošināšana un tās pastāvīga kontrole ir obligāti uzdevumi.

Šūnas radiopārkļājuma 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 radiopārkļājuma rādiusa noteikšanai tika sastādīts algoritms, kas ir redzams 3.8. attēlā.



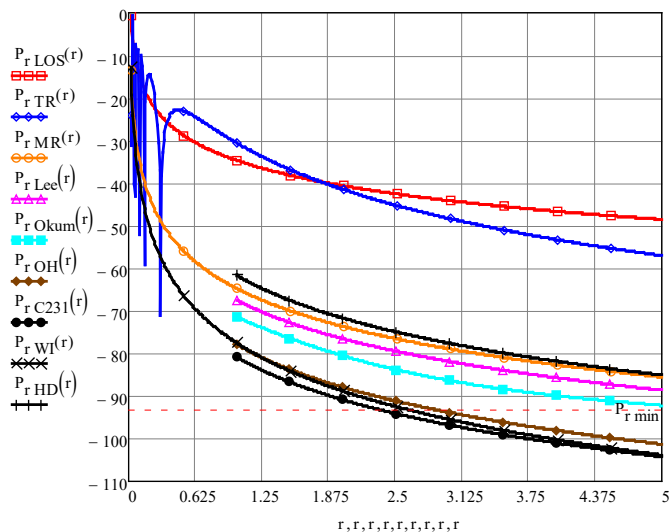
3.8. att. MST šūnas maksimālā rādiusa aprēķināšanas algoritms.

No blokshēmas (3.8. 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 loģiku var attēlot arī grafiski. Piemēram, konstruējot MS uztvertā signāla jaudas līmeņa izmaiņu līkni  $P_r(r)$  (3.9. att.) un atzīmējot MS uztvērēju jutību horizontālās līnijas veidā, šīs līnijas un līknes krustojuma punktā uz horizontālās ass būs nolasāma  $R_{max}$  vērtība lejupsaitei (downlink) režīmam.

Apkārtējās vides ietekmes faktoru radioviļņu izplatīšanās novērtēšanai, kā arī rezultātu, kas tika iegūti, izmantojot 2. nodaļā aprakstītos matemātiskus modeļus un algoritmu (3.8. att.), salīdzināšanai Mathcad datorprogrammā realizēts uztvertā radiosignāla jaudas  $P_r$  skaitliskais

aprēķins. Uztvertā signāla jauda ir noteikta kā funkcija  $P_r(r)$  (3.9. 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:  $G_t = 10$ ,  $G_r = 1$ .

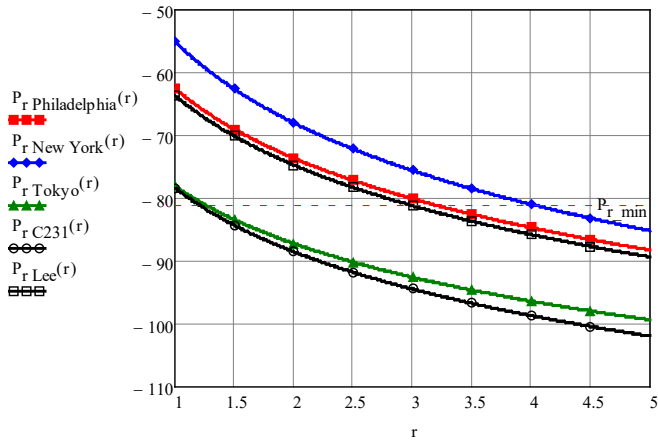


3.9. att. Radiosignāla jaudas uztveršanas punktā  $P_r$  (dBm) kā funkcijas no attāluma starp *BTS* un *MS* (*downlink* režīmā) matemātisko modeļu salīdzinājums.

Kā izriet no grafika (3.9. 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 blīvās apbūves nosacījumos (*Walfisch-Ikegami* modelis) būs  $P_r = -95$  dBm.

Modeļu (3.9. att.) salīdzināšanai tika apskatītas radiosignālu izplatīšanās eksperimentāli iegūtās atkarības Filadelfijas, Ņujorkas un Tokio [40], kas ir pilsētas ar diezgan blīvu apbūvi.

No grafika (3.10. att.) izriet, ka  $P_r(r)$  atkarība Filadelfijas pilsētā ir aptuveni aprakstīta ar *Lee* modeli, savukārt 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.



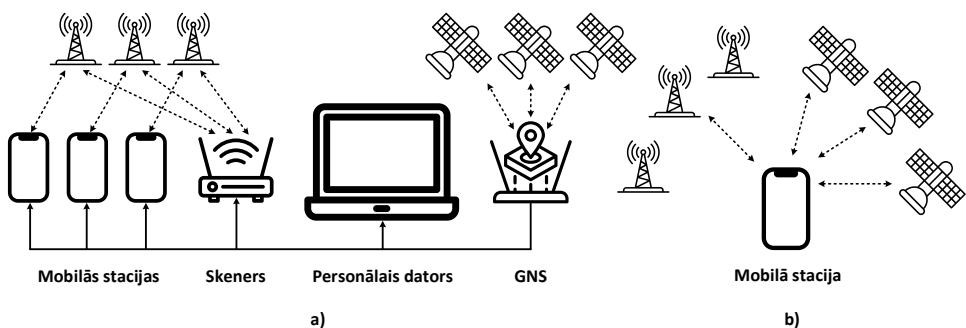
3.10. att. MS uztvertā signāla jaudas teorētiskās un eksperimentālās vērtībās.

### 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 radiosignālus. MST ir divas galvenās mērīšanas metodes: pasīvā un aktīvā (3.11. att.). 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.



3.11. 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*).

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 veikšanai 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**

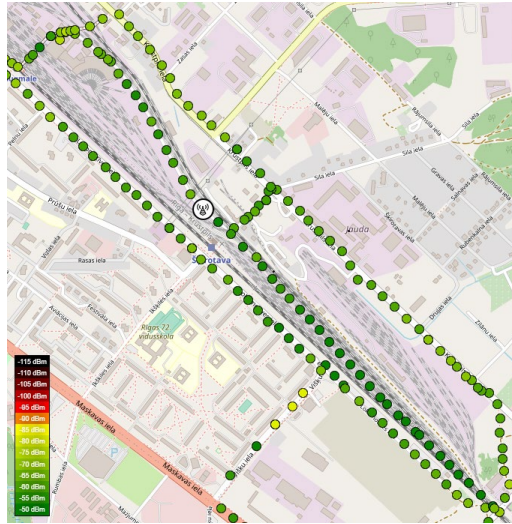
Mobilo sakaru pakalpojumus VAS “Latvijas dzelzceļš” koncerna darbiniekiem nodrošina sakaru operators *Tele2*, kura 2G mobilais tīkls tika izvēlēts radiopārklājuma eksperimentāliem pētījumiem. Mērījumi tika veikti Rīgā, Šķīrotavas dzelzceļa stacijas pieņemšanas un nosūtīšanas parkos. Mobilās stacijas uztvertā radiosignāla jaudas mērījumu rezultāti parādīti kartē (3.12. att.).

Katrs kartētais aplis atbilst vienam mērījumam konkrētajā ģeogrāfiskajā lokācijā, apla 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 Šķīrotavas stacijas teritorijā, un to aptuvenās atrašanās vietas (pēc triangulācijas principa). Vienai *BTS* (*MCC 247*, *MNC 2*, *LAC 421*, *ID 820–822*) Šķīrotavas stacijas ēkas tuvumā tika atrasta konkrētā uzstādīšanas vieta (56,90580, 24,21051).

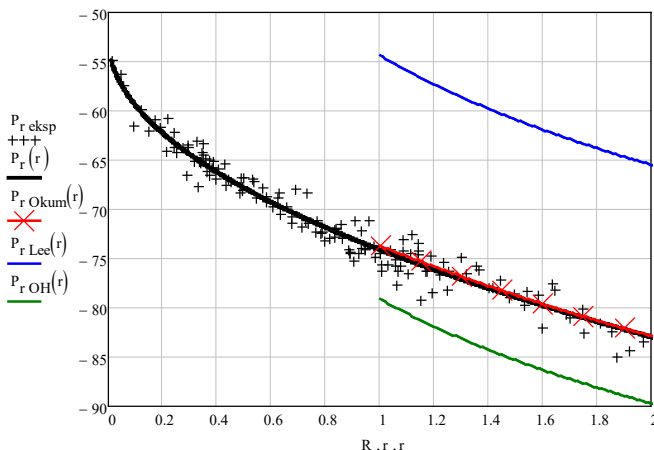
Balstoties veiktajos MST mērījumos norādītajai *BTS* un zinot MS ģeogrāfiskās koordinātes katrā mērījuma punktā, eksperimentāli iegūtie dati tika attēloti punktu veidā grafikā (3.13. att., *P<sub>r eksp</sub>*), kur uz vertikālās ass tika atliktas signāla jaudas vērtības, uz horizontālās ass – attālums starp *BTS* un MS mērījumu vietās.

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



3.12. att. Tele2 2G MST radiopārklājuma mērījumi Šķīrotavas stacijā.

Iegūtā signālu jaudas izmaiņu likumsakarība mobilās stacijas uztveršanas punktā tika salīdzināta ar *Okumura*, *Lee*, *Okumura–Hata* radioviļņu izplatīšanās matemātiskajiem modeļiem, kuriem, izmantojot apskatīto algoritmu (3.8. att.) 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.



3.13. att. Eksperimentāli iegūtā MS uztvērās jaudas līkne  $P_r(r)$ , salīdzinot ar radioviļņu izplatīšanās matemātiskajiem modeļiem (*Okumura*, *Lee*, *Okumura–Hata*).

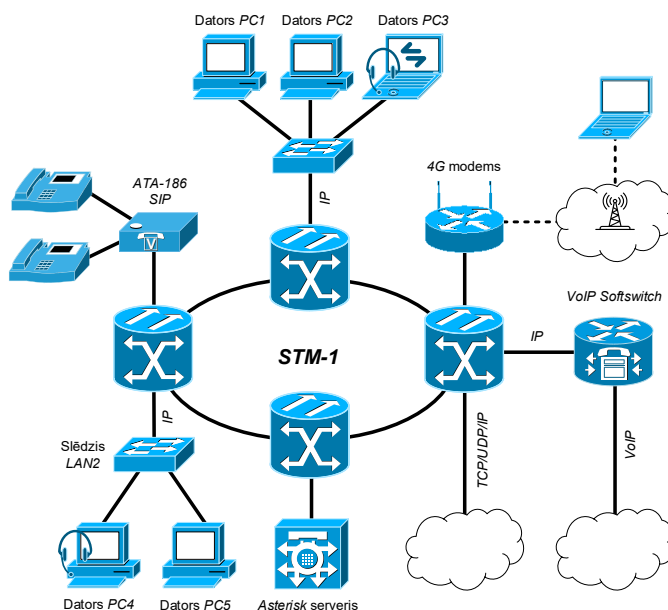
Kā ir redzams 3.13. attēlā, *Okumura* modeļa līkne ( $P_r Okum(r)$ ) ir gandrīz identiska eksperimenta rezultātā iegūtajiem datiem posmā  $r = [1; 2]$  km. Nepieciešams minēt, ka

*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.

### Heterogēna tīkla simulācijas modeļi

Heterogēnu tīklu primāras projektēšanas posmā parasti rodas nepieciešamība pēc tīklu modeļiem ar modernām, perspektīvām tehnoloģijām. Tāpēc tika formulēts uzdevums eksperimentāla heterogēna tīkla modeļa izveidei ar šādām prasībām: tīkla ribas – šķiedru optikas un simetriskās kabeļu sakaru līnijas; tīkla mezgli – elektriskie un optiskie multiplexori, komutatori, modemi; tīkla galiekārtas – ciparu telefona aparāti, personālie datori, mobilās ierīces; informācijas tehnoloģijas – *SDH*, *TCP/IP*, *VoIP*.

Organizētais heterogēnais tīkls (3.14. 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.



3.14. att. Heterogēnā tīkla shēma.

Uzbūvētā heterogēna pamattīkla 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: analoģu telefonu adapteris *Cisco ATA 186*, VoIP programmtelefoni *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 multipleksoru *SFP* moduļu savienojumam, *FC* savienotāji savienojumam ar *SDH* analizatoru un testerī, *BNC* savienotāji koaksiāliem kabeļiem, *8P8C* un *6P6C* savienotāji vītā pāra kabeļim.

*STM-1* tīklam ir dubultā gredzena topoloģija, katrs *SURPASS hiT 7020* multipleksors ir savienots ar diviem blakus esošajiem multipleksoriem. Multipleksoros ir instalēti optiskie raidzuvērēji – *STM-1 SFP* moduļi *Fiberxon FTM-3101C-L15-A* ar *LC* savienotāju.

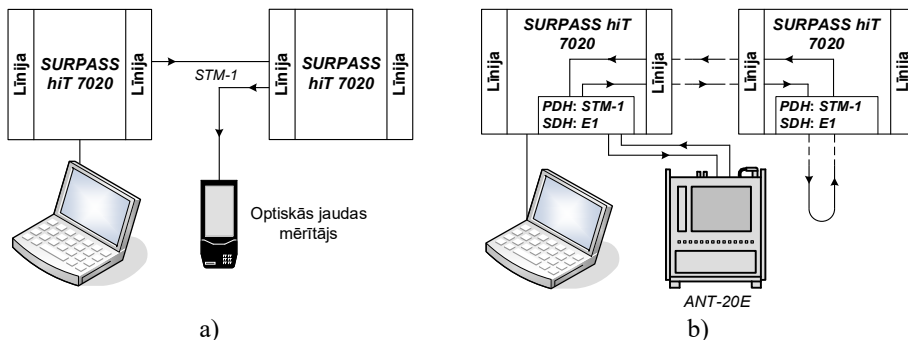
*VoIP* (*Voice-over-IP*) tehnoloģijas nodrošināšanai kalpo *Asterisk* un *MVTS* serveri. *VoIP* ir balss sakaru ciparu sistēma, kas spēj pārraidīt skaņas informāciju bez ievērojamiem zudumiem un ir balstīta *IP* pakešu komutācijas principā.

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 *SDH* tīklam, izmantojot *Ethernet* saskarni.

### 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*, kas sniedz informāciju par datu multipleksēšanu virtuālajos konteineros (*VC-4*, *VC-12* u. c.).

Optiskā raidītāja jaudas līmenis nosaka kabeļa līnijas maksimālo garumu. Šim parametram ir diezgan liela nozīme, un to var izmērīt, izmantojot optiskās jaudas mērītāju (3.15. a. att.). Tīkla kopējās darbības noteikšanai tika izmantots tīkla testeris – *Wandel & Goltermann ANT-20E* analizators. Analizatora pieslēgšanas shēma redzama 3.15. b. attēlā.



3.15. att. Pieslēgšanas shēmas: a) optiskās jaudas mērīšanai; b) *PDH/SDH* analīzei.

Šāda tipa mērinstrumenti ļauj ģenerēt un analizēt trafiku, apskatīt *PDH* un *SDH* freimu struktūru un saturu, mērīt zudumus, dispersiju un signāla aizkavi pārraides līnijā.

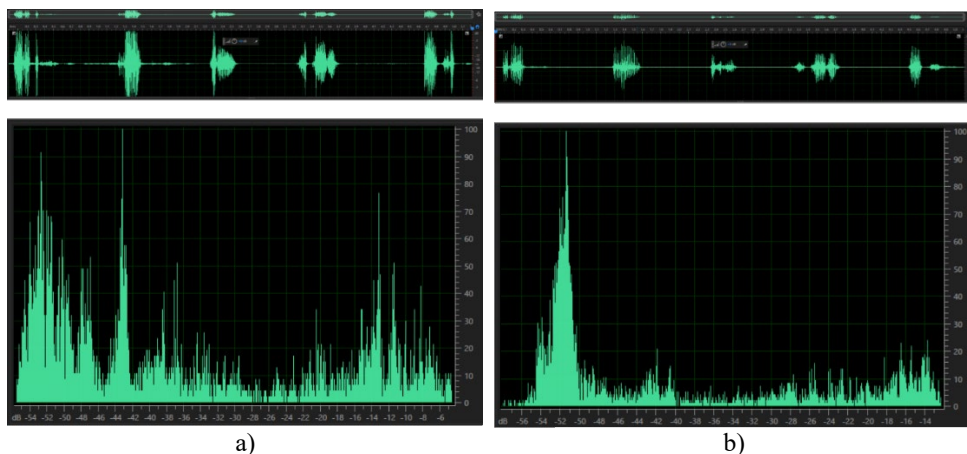
Heterogēnā tīkla modelim aprakstīti un īstenoti divi darbības scenāriji: runas signālu pārraide un datu pārraide [34].

Runas signālu cauriešanas analīzei tika izmantota daļa no heterogēnā tīkla aparatūras (3.14. 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 šādos 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*. Balss signāla spektrālās analīzes veikšanai tika izmantota *Adobe Audition* programmatūra.

Pirmajā maršrutā analogā signāla pārraide sākās 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 3.16. attēlā.



3.16. att. Balss testa signāla spektrs: a) ieejā; b) izejā.

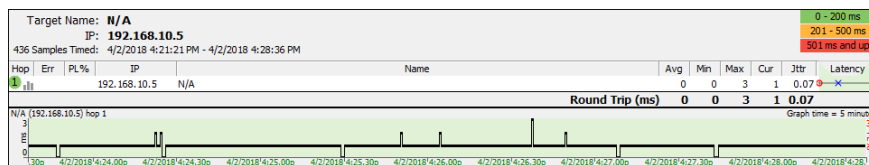
Datu pārraides analīzei tika īstenota lokālā LANI tīkla datoru PCI-PC3 pieslēgšanās mobilā operatora sakaru tīklam, izmantojot STM-1 multipleksorus un 4G radio modemu maršrutā: PCI/PC2/PC3 → LANI → MUX1 → MUX2 → 4G modems → MST.

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 LANI 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. 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 heterogenu pamattīklu (3.14. att.), uz attālināto mediju klientu (datoru PC6) caur 2G-4G mobilo sakaru tīklu.

Laika aizkaves mērījumu rezultāti pirmajam eksperimentam redzami 3.17. attēlā. Signāla pārraides laikā no testa avota PCI uz uztvērēju PC5 (3.17. att.) maksimālā aizture (max) bija 3 ms, vidējā aizture (cur) — 1 ms, trīce (jitr) — 0,07 ms, kas ir tuvu ideāliem pārraides apstākļiem.



3.17. att. Datu pārraides laika aizkaves mērījumu rezultāti pirmajam eksperimentam.

Laika aizkaves mērījumu rezultāti, kad testa signāls tiek raidīts no mediju servera (raidītāja) uz mediju klientu (uztvērēju), redzami 3.18. attēlā. Maksimālā aizture (max) svārstās no 402 ms līdz 2800 ms. Vidējā aiztures vērtība (cur) ir no 2 ms līdz 444 ms, trīces vērtība – no 8,23 ms līdz 340 ms.

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 mērījumu programma rāda, ka ir IP pakešu zudumi 2G savienojumiem (EDGE) LMT (3.18. a. att.) un Tele2 (3.18. b. 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.

Līdzīgi eksperimenti tika veikti, pārraidot multimediju testa datus publisko operatoru LMT, *Tele2* 3G un 4G mobilo sakaru tīklos. Konstatēts, ka plūsmas sākotnējās buferizēšanas aiztures laiks, pārraidot augstas izšķirtspējas video formātu (*H.264/AVC*) reālajā laikā un salīdzinot ar 2G MST, samazinās un veido 2–3 sekundes. Video un audio testu plūsmas tiek pārraidītas praktiski bez kvalitātes zudumiem, taču tiek 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 *VoIP*.



3.18. att. Laika aizkaves mērījumu rezultāti otrajam eksperimentam LMT (a) un *Tele2* (b) MST: 1) 2G (*EDGE*); 2) 3G (*HSPA*); 3) 4G (*LTE-A*).

### Heterogēnā tīkla modelēšanas 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 tīkla elementiem, iespēja paplašināt tīklu, mainīt tā konfigurāciju;
- veikspējas monitorings tiek veikts saskaņā ar *ITU-T Y.1731* standartu, izmantojot tīkla pārvaldības sistēmu (*OAM&P*);
- 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*;
  - ātrgaitas datplūsmas pārraide, izmantojot *TCP/UDP/IP* protokolus;
  - *STM-1* tīkla savienošana ar citiem *SDH* tīkliem;
- savienojums ar ārējiem *MST* caur radiomodemu;
- *VoIP* protokola (*H.323/SIP*) izmantošana heterogēnā tīkla iekārtās, kas ļauj savienot fiksēto un mobilo telefonu tīklus, izmantojot internetu;
- tīkla konfigurācija ir piemērota augstas izšķirtspējas multimediju datu [33], datorsistēmu ciparu informācijas, tālkontroles un tālvadības 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 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 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 izveidotās 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 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 pieļaujamais 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 optiskās sakaru līnijas maksimālā garuma noteikšanas uzdevums, dots reģenerācijas iecirkņa skaitliskā aprēķina piemērs. Piemērā 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, 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 vidējās 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 šīm 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 datu, datorsistēmu ciparu informācijas, 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](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, 169.–175. lpp. ISSN 1822-296X. E-ISSN 2351-7034 (SCOPUS).
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.



**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.