

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TAIKOMOSIOS ELEKTRODINAMIKOS IR TELEKOMUNIKACIJŲ INSTITUTAS

Mantas Barcys

PALYDOVINIŲ ŽEMĖS STOČIŲ BEI PENKTOS KARTOS JUDRIOJO RADIJO RYŠIO STOČIŲ ELEKTROMAGNETINIO SUDERINAMUMO ANALIZĖ SU FIKSUOTOJO RADIJO RYŠIO STOTIMIS, RADIJO DAŽNIUOSE: 28 GHz IR 1,5 GHz.

Magistro kursinis darbas

(studijų programa – Telekomunikacijų fizika ir elektronika)

Studentas

Vadovas

Instituto direktorius

Mantas Barcys

dr. Mindaugas Žilinskas

dr. Robertas Grigalaitis

Vilnius

2022

Turinys

Turinys.....	2
1. Sąvokos	3
2. Įvadas	4
3. Literatūros apžvalga	5
3.1 Radijo bangų sklidimas	5
3.2 Tiesioginis matomumas	5
3.3 Difrakcija.....	6
3.4 ITU-R P.1546 rekomendacija.....	9
3.5 ITU-R P.452 rekomendacija.....	10
3.6 ITU-R P.2001 rekomendacija.....	12
3.7 Sklidimo modelių palyginimas.....	13
4. Technologijų apžvalga.....	15
4.1 „Starlink“	15
4.2 Radijo relinės linijos.....	17
4.3 ESIM charakteristikos	18
4.5 Papildomas žemynkryptinis ryšis (SDL).....	23
5. Tyrimo metodika	25
5.1 Monte-Carlo metodas	25
5.2 Interferencijos įvertinimas	25
5.3 ITU-R F.699-8 rekomendacija	26
5.4 ITU-R F.1245-3 rekomendacija	27
5.5 Pradinės sąlygos elektromagnetinio suderinamumo „Starlink“ sistemos ir radijo relinių linijų Vilniaus mieste įvertinimui.	28
5.5 pradinės sąlygos ESIM elektromagnetinio suderinamumas su RRL įvertinimui.....	30
5.6 ESIM scenarijus SEAMCAT programine įranga	31
5.7 SDL scenarijus.....	31
6. Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas	34
6.1 „Starlink“ sistemos EMS su RRL.....	34
6.2 ESIM sistemos EMS su RRL (I)	35
6.3 ESIM sistemos EMS su RRL (II).....	37
6.4 SDL sistemos EMS su RRL	39
7. Išvados.....	43
9. Literatūra	44
10. Santrauka	46

11. Summary.....	47
12. Priedas	48

1. Sąvokos

1. MSS – Palydovinė sausumos judrioji tarnyba (angl. *Mobile-satellite service*)
2. FS – fiksuotosios tarnybos (angl. *Fixed Service*)
3. RRL – radijo relinė linija (angl. *Radio Relay Link*)
4. TRRL – taktinė radijo relinė linija (angl. *Tactical Radio Relay Link*)
5. DL – žemynkryptinis ryšys (angl. *Downlink*)
6. UL – aukštykryptinis ryšys (angl. *Uplink*)
7. ESIM - Sausumos judrioji žemės stotis (angl. *Earth Station In Motion*), kartais vadinama ESOMP (angl. *Earth Stations on Mobile Platforms*)
8. FSS ES – Geostacionarioji žemės stotis (angl. *Fixed-Satellite Service Earth Station*)
9. BS – bazinė stotis (angl. *Base Station*)
10. UE – vartotojo įranga (angl. *User Equipment*)
11. MFCN – Mobilus/fiksuotas komunikacijų tinklas (angl. *Mobile/Fixed Communications Networks*)
12. SDL – Papildomas žemynkryptinis ryšis (angl. *Supplemental Downlink*)
13. GSMA – angl. *Global System for Mobile Communications* (mobiliojo ryšio operatorių asociacija)
14. ITU – Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (angl. *The International Telecommunication Union*)
15. ECC –Europos elektroninių ryšių komitetas (angl. *Electronic Communications Committee*)
16. CEPT – - Europos pašto ir telekomunikacijų administracijų konferencija (angl. *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*)
17. PDF – tikimybės tankio funkcija (angl. *Probability density function*)
18. CDF – kumuliatyvinė pasiskirstymo funkcija (angl. *Cumulative distribution function*)

2. Įvadas

Didėjant vis daugiau įrenginių, kuriems reikia prieigos prie tinklo, užduotis yra tinkamai ir efektyviai panaudoti ribotą radijo ryšio spektrą. Tai galima įgyvendinti leidžiant ta pačia dažnių juosta naudotis kelioms ryšio sistemoms, tačiau tam reikalinga elektromagnetinio suderinamumo analizė.

Palydovinė tarnyba yra puikus sprendimas užtikrinti ryšį, tose vietose, kur šviesolaidis ar judriosios tarnybos neužtikrins pakankamai kokybiško ryšio, arba tai užtikrinti būtų per brangu arba iš vis neįmanoma. Viena iš palydovinio ryšio technologijų yra ESIM, veikianti 17,7-19,7 GHz ir 27,5-30,5 GHz dažnių juostoje. Pagal WRC-19 rezoliuciją 169 yra nutartą leisti naudoti ESIM technologiją, jeigu tai nekenks kitoms tarnyboms [1]. ECC sprendimas 18(04) nutarta leisti veikti ESIM terminalams 10,7-12,75 GHz ir 14,0- 14,5 GHz juostose be individualaus licencijavimo[2], tačiau tiek spektro neužtektų tenkinti vartotojų poreikiams.

Kita technologija, kuri išspręstų vartotojų ryšio poreikį atokiose vietovėse, užtikrinant norimą spartą priimant duomenis pav. iki 200 Mbit/s ar net 400 Mbit/s ir siunčiant duomenis iki 50 Mbit/s yra „Starlink“, veikianti toje pačioje 27,5-29,5 GHz dažnių juostoje.

Taip pat auga vartotojų poreikis judriajam ryšiui. „Ericsson“ atliktame tyrime [3] duomenų suvartojimas mobiliojo ryšio telefonais kas du metus padvigubėja ir prognozuojama, kad po 2027 m. sieks vidutiniškai 30 GB vienam vartotojui centrinėje ir rytų Europoje. 1427-1518 MHz juosta puikiai papildytų spektro poreikį mobiliajam ryšiui, plėtojant 5G tinklą.

Visos šios technologijos veiktų tais pačiais dažniais kaip Lietuvoje plačiai naudojami fiksuotos tarnybos tinklai, todėl šio darbo tikslas yra atlikti elektromagnetinio suderinamumo analizę tarp „Starlink“ ir FS RRL, ESIM ir FS RRL, bei IMT BS ir FS RRL sistemų.

3. Literatūros apžvalga

3.1 Radijo bangų sklidimas

Radijo bangos yra elektromagnetinės bangos iki 3000 GHz, kurios laisvai sklisdamos sąveikauja su aplinka. Norint išsamiau nagrinėti kaip radijo bangos sklis pasirinktoje terpėje, būtina žinoti apie pagrindinius sklidimo reiškinius:

Absorbcija yra reiškinys, kuomet atmosferoje esančios medžiagos kaip deguonis ar vandens garai sugeria tam tikrą kiekį bangos energijos. Absorbcijos metu deguonies ir vandens dalelės gauna energijos, tuo tarpu radijo banga- praranda. Taip pat banga kritus ant deguonies ar vandens garų nežymiai pakeičia savo sklidimo kryptį, kas vadinama sklaida.

Refrakcija yra radijo bangos sklidimo krypties bei greičio pasikeitimas, pereinant iš vienos terpės į kitą, dėl skirtingų lūžio rodiklių:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Kur α yra , β yra , n_1 ir n_2 yra terpės absoliutūs lūžio rodikliai, v_1 ir v_2 faziniai greičiai terpėje.

Difrakcija yra bangos sklidimo nukrypimas, bangai susiduriant su kliūtimi ir už jos užlinkstant. Difrakcija daugiausiai pasireiškia žemo dažnio radijo bangoms.

Interferencija yra reiškinys, kai priklausomai nuo kelių bangų fazių skirtumo, bangos viena kitą silpnina(destruktyvi) arba stiprina(konstruktyvi). Destruktyvi interferencija- dėl skirtingų fazių bangos viena kita silpnina ir dėl to mažėja amplitudė, tuo tarpu konstruktyvi interferencija- dėl vienodų fazių bangos yra sustiprinamos, amplitudė didėja.

3.2 Tiesioginis matomumas

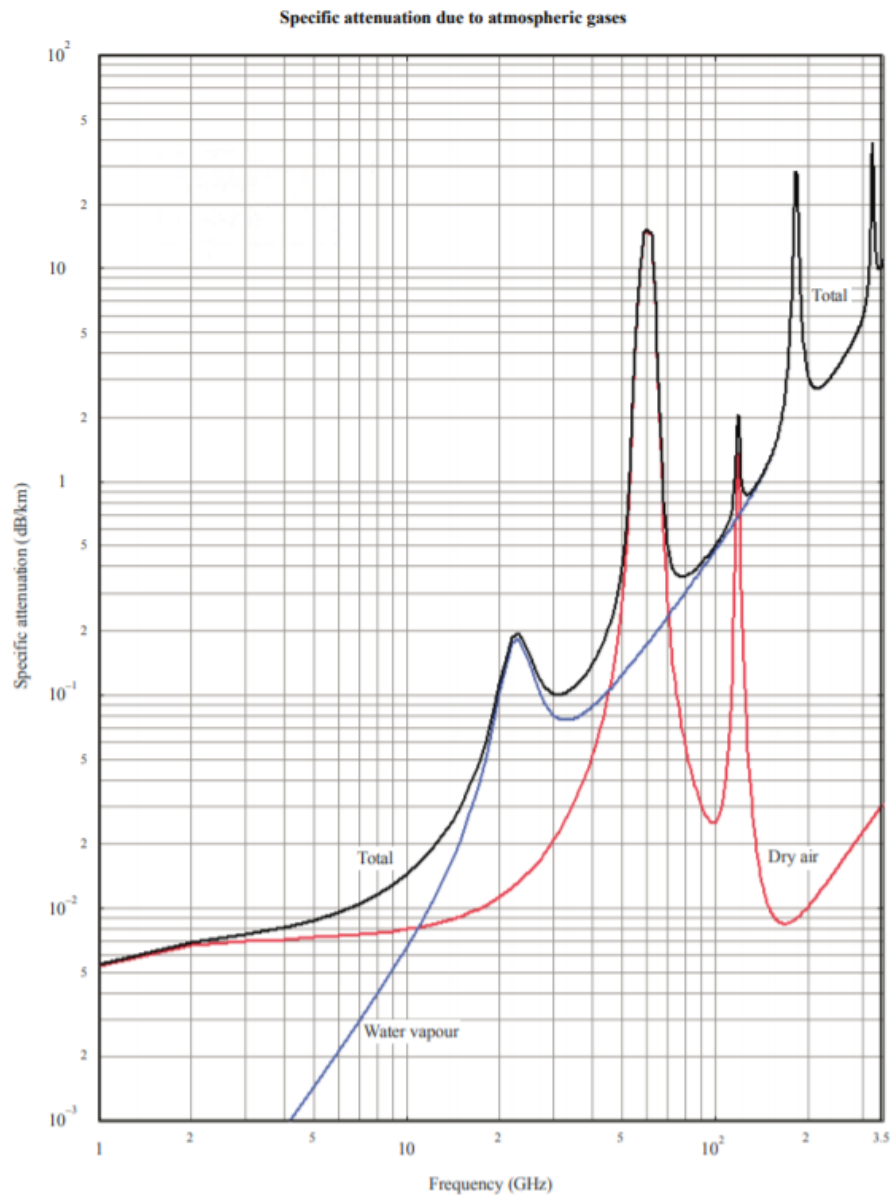
Tiesioginis matomumas yra pats paprasčiausias sklidimo modelis, kai bangų sklidimas vyksta tarp siųstuvo ir imtuvo tiesioje linijoje. Tiesioginio matomumo sklidimo modelyje atsižvelgiama į trumpalaikius efektus (besikeičiančias oro sąlygas). Pagrindinius nuostolius sudaro laisvosios erdvės nuostoliai ir atmosferos dujų slopinimas:

$$L_{\text{bfsg}} = 92.5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g \text{ [dB]} \quad (2)$$

Kur A_g suminė dujų sugertis, f – bangos dažnis, d – atstumas kilometrais.

Iš 1 pav. matome vandens garų ir deguonis dedamąsias bendram radijo bangų slopinimui. Vandens garų poveikis bendram bangos sklidimo slopinimui yra reikšmingas, tačiau pati vandens garų

koncentracija ore priklauso nuo klimato ar meteorologinių sąlygų. Dėl šios priežasties, oro slopinimą radijo bangų sklidimui labai sunku įvertinti. Tam pasitelkiama laiko procento sąvoka – tam tikras elektromagnetinio lauko lygis, užtikrinamas tam tikrą laiko dalį, laikant jog signalas transliuojamas visus metus. Kaip pavyzdys, dažnai naudojama 50 % laiko riba iš esmės yra per visus metus fiksuotų lauko lygio medianos vertė.

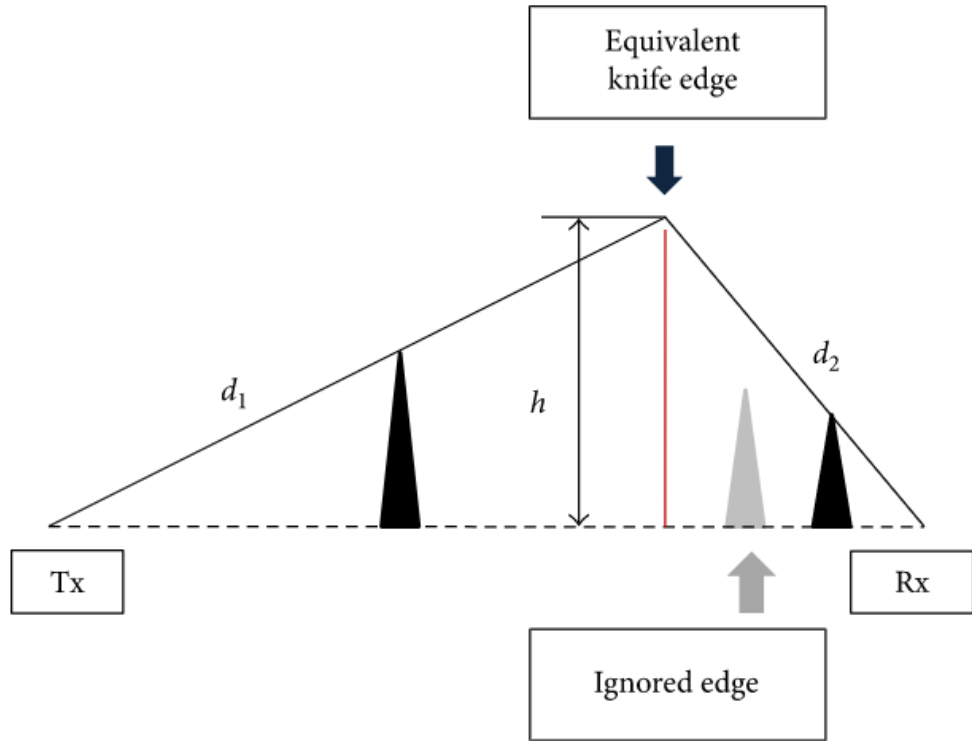


1 pav. Radijo bangų slopinimas dėl atmosferų dujų priklausomai nuo dažnio.[4]

3.3 Difrakcija

Difrakcija taikoma tokiuose scenarijuose, kai tiesioginio matomumo nėra arba pirma Frenelio zona liečia kliūtį. Šiuo modeliu siekiama įvertinti kliūtis kelyje, reljefo nelygumus. Difrakcijos nuostoliai yra skaičiuojami naudojant Bulingtono ir sferinės-žemės difrakcijos nuostolius.

Bullington metodas laiko, kad reljefas yra smaili viršūnė (Bullington taškas), kuri randama brėžiant tieses tarp siųstuvo ir imtuvo per didžiausią kelyje kliūtį, kaip pavaizduota 2 pav. Šis metodas dažnai taikomas dėl savo paprastumo, tačiau neįvertina kliūčių žemiau d_1 ir d_2 tiesių, todėl nėra visiškai tikslus. Supaprastinti difrakcijos koef. Bullington metodu:



2 pav. Bullington metodo schema [5]

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (3)$$

Kur h yra pagrindinės kliūties aukštis, d_1 ir d_2 atstumas nuo siųstuvo, imtuvo iki kliūties.

Apskaičiuojame tikslų difrakcijos koef. v :

$$v = \max \left\{ h + 500C_e d - \frac{h_{ts}d + h_{rs}d}{d} \right\} \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d}} \quad (4)$$

Kur d atstumas tarp imtuvo ir siųstuvo kilometrais, h Bullington taško aukštis metrais, C_e žemės kreivumas km^{-1} , tai atvirkščias dydis efektyviam žemės spinduliui, h_{ts} ir h_{rs} yra siųstuvo ir imtuvo aukštis virš jūros lygio, λ yra bangos ilgis. Apskaičiuojame nuostolius Bullington taške:

$$L_{uc} = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \text{ [dB]} \quad (5)$$

Tada apskaičiuojame pilnus difrakcijos nuostolius:

$$L_{bulla} = L_{uc} + \left[1 - \exp\left(-\frac{L_{uc}}{6}\right) \right] (10 + 0.02 d) [dB] \quad (6)$$

Kur L_{bulla} nuostoliai atsižvelgiant į profilį tarp siųstuvo ir imtuvo, L_{uc} . Skaičiuojame nuostolius dar kartą, tačiau neatsižvelgiant į reljefą ($h=0$) ir antenų aukščius pakeitę efektiniu aukščiu, t.y. suvidurkintu antenos aukščiu virš reljefo imtuvo atžvilgiu. Gauname

$$v = \max \left\{ 500 C_e d - \frac{h'_{ts}d + h'_{rs}d}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d}} \quad (7)$$

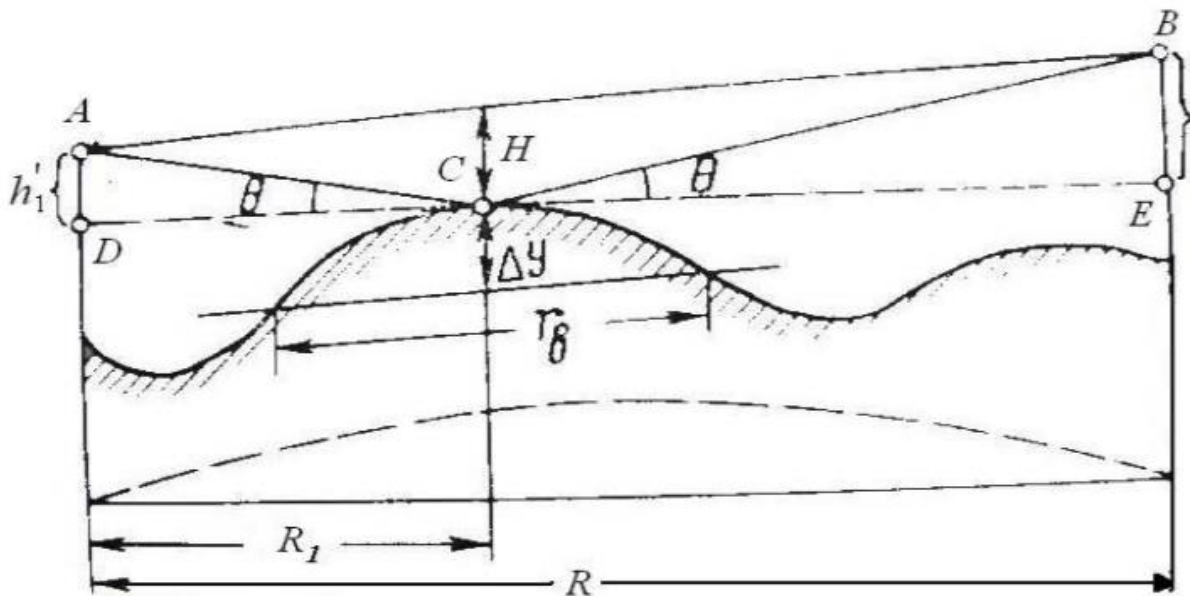
Kur $h'_{ts}d$ ir $h'_{rs}d$ yra sferinės-žemės siųstuvo ir imtuvo aukščiai (aukštis skaičiuojamas nuo kliūtis liestinės)

Pagal (5) ir (6) formulę gauname L_{bulls}

$$L_{bulls} = L_{uc} + [1 - \exp(-\frac{L_{uc}}{6})] (10 + 0,02) [dB] \quad (8)$$

Kur L_{bulls} nuostoliai atsižvelgiant tik į antenų efektyviusius aukščius. Efektyvusis aukštis apibrėžiamas kaip suvidurkintas aukštis 3-15 km atstumu nuo pasirinkto taško.

Paskaičiuojame Bullington nuostolius, neatsižvelgiant į reljefą ir antenų aukščius pakeitę efektiniu aukščiu, t.y. suvidurkintu antenos aukščiu virš reljefo imtuvo atžvilgiu.



3 pav. Sklidimo profilio su užapvalinta kliūtimi schema[6]

Skaičiuojami nuostoliai dėl sferinės-žemės:

$$L_{dsph} = H L_{dft} [dB] \quad (9)$$

Kur H prošvaisa, L_{dft} sferinės-žemės nuostolių koef.

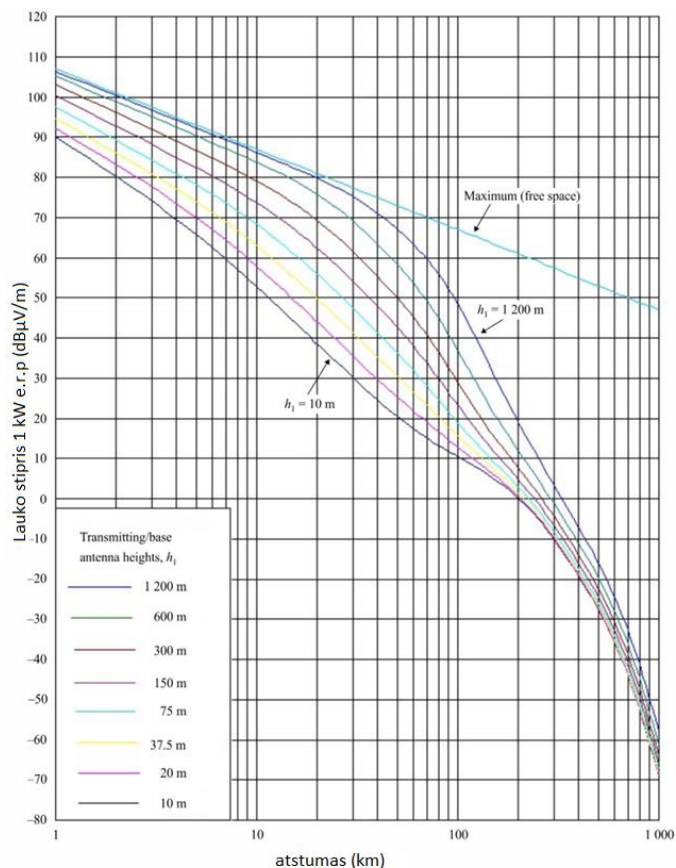
Susumavus visus nuostolius gauname pilnus „delta-Bullington“ nuostolius:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \text{ [dB]} \quad (10)$$

Bullington nuostoliai vieni iš daugelio nuostolių aprašyti ITU-R P.452 rekomendacijoje, kurie yra sudėtingi, kadangi įvertina apvalios kliūtis įtaka slopinimui.

3.4 ITU-R P.1546 rekomendacija

Šis modelis buvo sukurtas remiantis ITU-R P.370 rekomendacija, tinka skaičiuoti radijo bangų sklidimą taškas-plotas, dažnai naudojamas transliavimų, jautriųjų žemės ir jautriųjų jūrinių tarnybų skaičiavimams. ITU-R P.1546 rekomendacija galima skaičiuoti dažnių režiuose nuo 30 iki 4000 MHz ir iki 1000 km atstumu. Metodas yra interpoliacija ir ekstrapoliacija iš empiriškai nustatytų lauko stiprio lygių kaip funkcija nuo atstumo, antenos aukščio, dažnio ir laiko procento[7]. Svarbu paminėti tai, kad rekomendacija nėra simetrinio pobūdžio, todėl nuostoliai iš terminalo A į B gali skirtis nuo nuostolių negu skaičiuojant priešingai, sklidimą nuo terminalo B į A. 4 pav. pavaizduota pavyzdinė kreivė pagal ITU-R P.1546 rekomendaciją pagal kurią vykdomos ekstrapoliacijos. Rekomendacijose nustatytos kreivės pagal dažnį, laiko procentą, atstumą.



4 pav. ITU-R P.1546 rekomendacijos kreivės pavyzdys: 100 MHz, sausumos kelias, 50% laiko procentas.[7]

Modelio algoritmas atrodo taip:

Interpoliuojamas laukas pasirinktam lauko procentui:

$$E = E_{sup}(Q_{inf} - Q_t)/(Q_{inf} - Q_{sup}) + E_{inf}(Q_t - Q_{sup})/(Q_{inf} - Q_{sup}) \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \quad (11)$$

t – reikalingas laiko procentas, t_{inf} – apatinis laiko procentas, t_{sup} – viršutinis laiko procentas, $Q_t = Q_i(t/100)$, $Q_{inf} = Q_i(t_{inf}/100)$, $Q_{sup} = Q_i(t_{sup}/100)$, E_{inf} – lauko stipris laiko procentui t_{inf} , E_{sup} – lauko stipris laiko procentui t_{sup} .

Interpoliuojamas laukas pasirinktam dažniui:

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log\left(\frac{f}{f_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}}\right)} \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \quad (12)$$

f – reikalingas dažnis, f_{inf} – apatinis dažnis, f_{sup} – viršutinis dažnis, E_{inf} – lauko stipris dažniui f_{inf} , E_{sup} – lauko stipris dažniui f_{sup} .

Interpoliuojamas laukas pasirinktam atstumui:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log\left(\frac{d}{d_{inf}}\right) / \log\left(\frac{d_{sup}}{d_{inf}}\right) \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \quad (13)$$

d – reikalingas atstumas, d_{inf} – apatinis atstumas, d_{sup} – viršutinis atstumas, E_{inf} – lauko stipris atstumui d_{inf} , E_{sup} – lauko stipris atstumui d_{sup} .

Ekvivalentiniai nuostoliai:

$$L_b = 139,3 - E + 20 \log f \text{ [dB]} \quad (14)$$

Korekcija dėl pastatų sluoksnio:

$$C = 6,03 - J(v) \text{ [dB]} \quad (15)$$

$$J(v) = (6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,2)^2 + 1} + v - 0,1)) \quad (16)$$

$$v = K_v \theta$$

Kur θ yra efektyvusis prošvaisos kampas, K_v koeficientas priklausantis nuo dažnio.

3.5 ITU-R P.452 rekomendacija

Šis modelis apibūdinamas kaip suminis įvairių radijo bangų sklaidimo mechanizmų darinys. Didžiausia problema dėl sklaidimo modelių, kurie aprašo atmosferos reiškinių įtaką bangų sklaidimui yra tai, kad sunku tai suformuluoti į vieningą sklaidimo metodą kaip funkciją nuo atstumo, laiko procento, dažnio kaip vieningą modelį. Reali atmosfera nėra vieningas darinys, jos savybės keičiasi tiek nuo aukščio, paros laiko, bei klimato zonos, skirtingi mechanizmai pasireiškia tokiuose scenarijuose, kiekvienas mechanizmas turintis didesnę arba mažesnę dedamąją galutiniam nuostoliams. ITU-R P.452 rekomendacija bandoma įvertinti kuo daugiau įmanomų nuostolių pasirinktai situacijai.[8]

Modelio algoritmas:

Skaičiuojami nuostoliai tiesioginiam matomumui ir difrakcijai:

$$L_b(p) = L_{b0}(p) + A_{ht} + A_{hr} + L_{ds}(p) \text{ [dB]} \quad (17)$$

Kur $L_{b0}(p)$ yra pagrindiniai perdavimo nuostoliai nuo pasirinkto laiko procento p , $L_{ds}(p)$ yra difrakcijos nuostoliai nuo pasirinkto laiko procento p , A_{ht} ir A_{hr} yra papildomi nuostoliai dėl pastatų sluoksnių siųstuvui ir imtuvui atitinkamai.

Įvertiname transhorizontinis sklaidimo nuostolius:

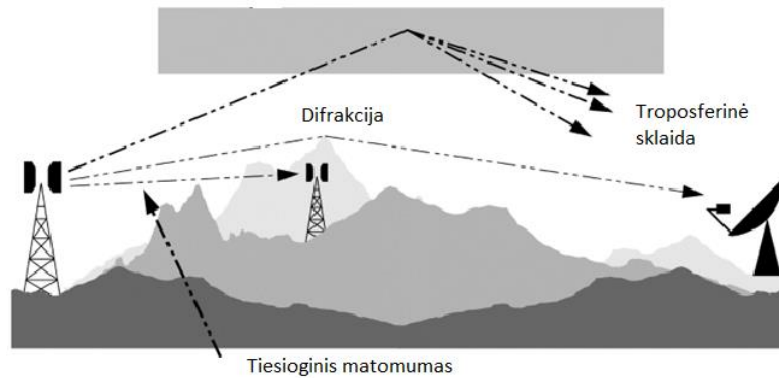
$$L_b(p) = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bd}} + 10^{-0,2L_{ba}}) + A_{ht} + A_{hr} \text{ [dB]} \quad (18)$$

Kur L_{bs} yra troposferinės sklaidos nuostoliai, L_{bd} yra atmosferos difrakcijos nuostoliai, L_{ba} yra atspindžių nuostoliai.

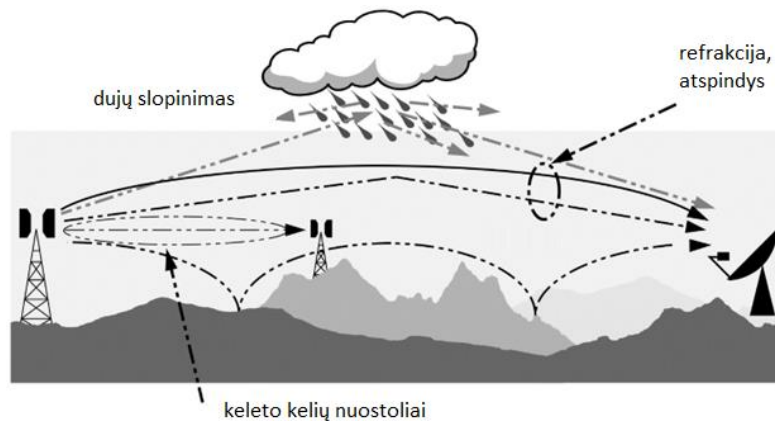
Įvertiname papildomi nuostoliai dėl pastatų sluoksnių:

$$A_h = 10,25e^{-d_k} \left(1 - \tanh \left(6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right) \right) - 0,33 \text{ [dB]} \quad (19)$$

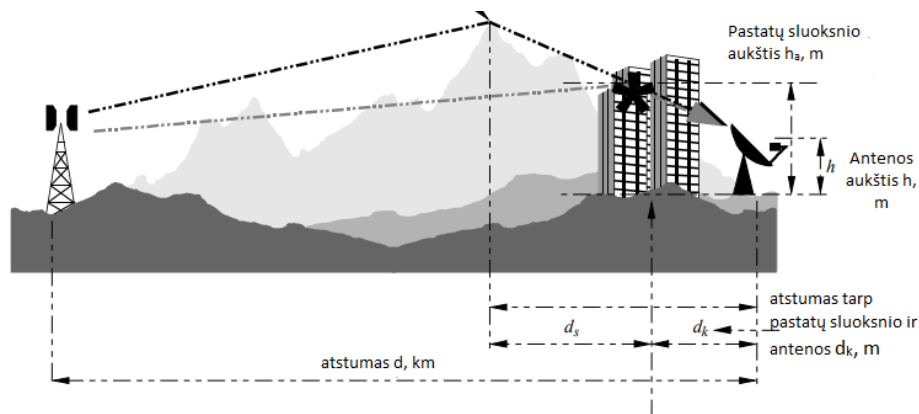
Kur d_k yra atstumas tarp pastatų sluoksnių ir antenos, h yra antenos aukštis, h_a yra pastatų sluoksnių aukštis.



5 Pav. Ilgalaikiai nuostoliai pagal ITU-R P.452 rekomendaciją[8]



6 Pav. Trumpalaikiai nuostoliai pagal ITU-R P.452 rekomendaciją[8]



7 pav. Pastatų sluoksnis ITU-R P.452 rekomendacijoje[8]

1 lentelė. ITU-R P.452-16 Rekomendacijoje pateikti paviršiaus sluoksnių parametrai. [8]

Žemės danga (užstatymas)	Nominalus aukštis, h_a [m]	Nominalus atstumas, d_k [km]	Nuostoliai [dB]
Pasėlių laukas Parkas Sodas Retai apgyvendintas kaimas Pavieniai medžiai	4	0,1	18,193
Kaimas	5	0,07	20,271
Lapuočių miškas Mišrus miškas	15	0,05	21,162
Spigliuočių miškas	20	0,05	21,186
Priemestis	9	0,025	20,523
Tankus priemestis	12	0,02	20,499
Miestas	20	0,02	20,545
Tankus miestas	25	0,02	20,554
Industrinė zona	20	0,05	21,181

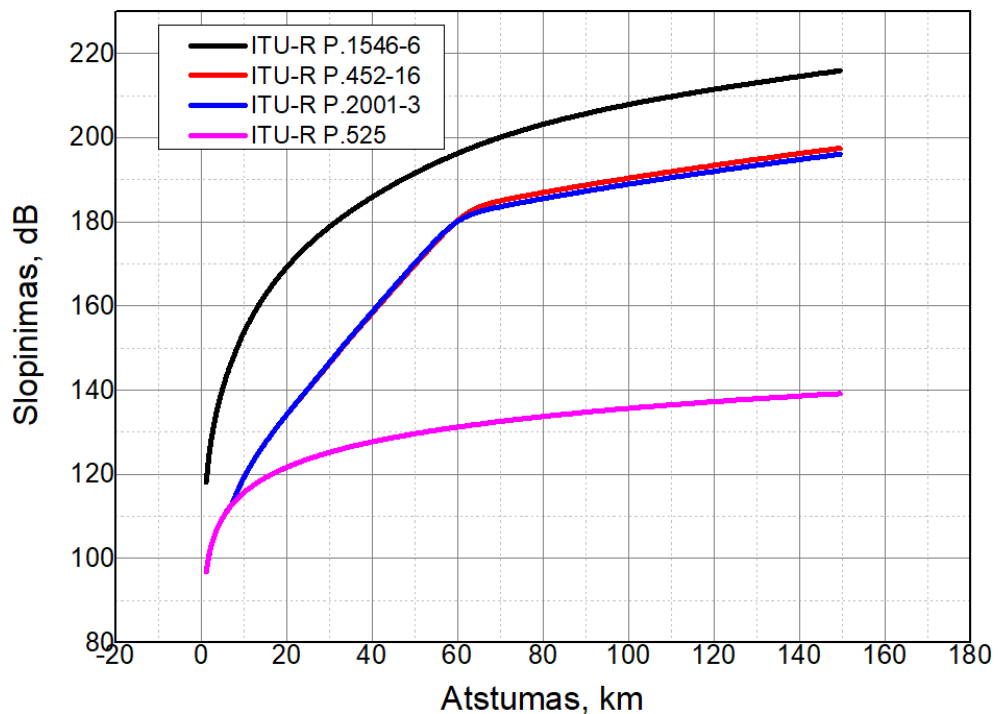
3.6 ITU-R P.2001 rekomendacija

ITU-R P.2001 rekomendacija yra bendro naudojimo įvairių tarnybų veiklai ir scenarijams skirtas bangų sklidimo modelis, kuriuo galima apskaičiuoti perdavimo nuostolius nuo 0% iki 100% laiko statistiniams metams. Ši rekomendacija plačiai naudojama Monte-Carlo statistiniams skaičiavimams, kadangi ITU-R P.2001 rekomendacija galima modeliuoti labai įvairiai, patogiu naudoti tą patį modelį ir norimiems ir interferuojantiems signalams. Modelį galima taikyti nuo 30 MHz iki 50 GHz,

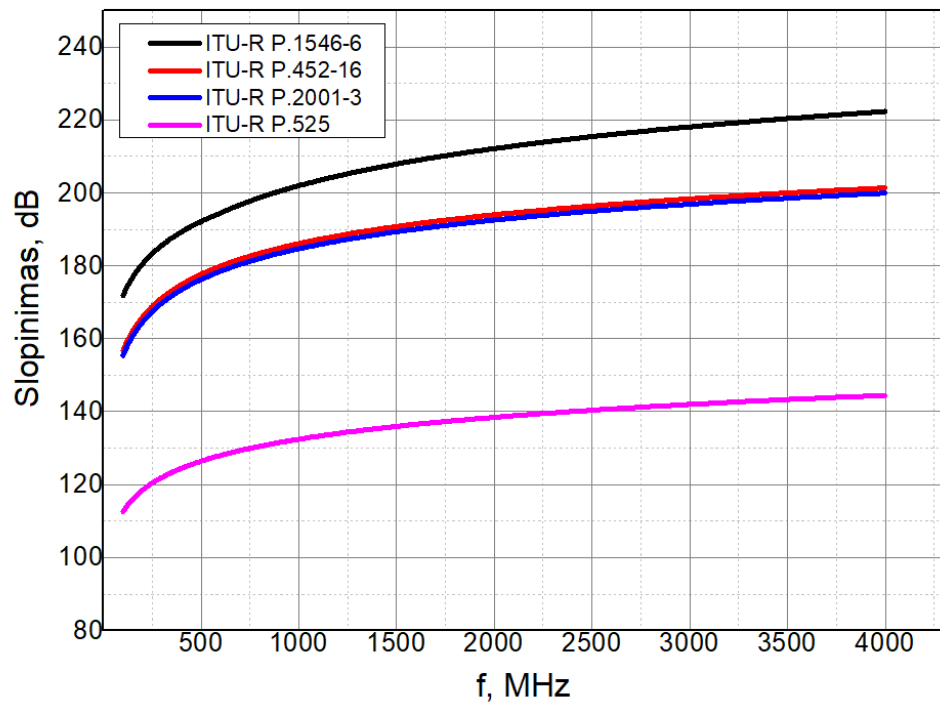
atstumais nuo 3 km iki 1000 km ir antenų aukščiais iki 8000 m. ITU-R P.2001 rekomendacija yra labai panaši, daugeli atveju net gi identiška ITU-R P.452, kadangi įvertina tuos pačius reiškinis: difrakcijos nuostoliai, dujinis slopinimas, atspindžiai ir refrakcija.[9]

3.7 Sklidimo modelių palyginimas

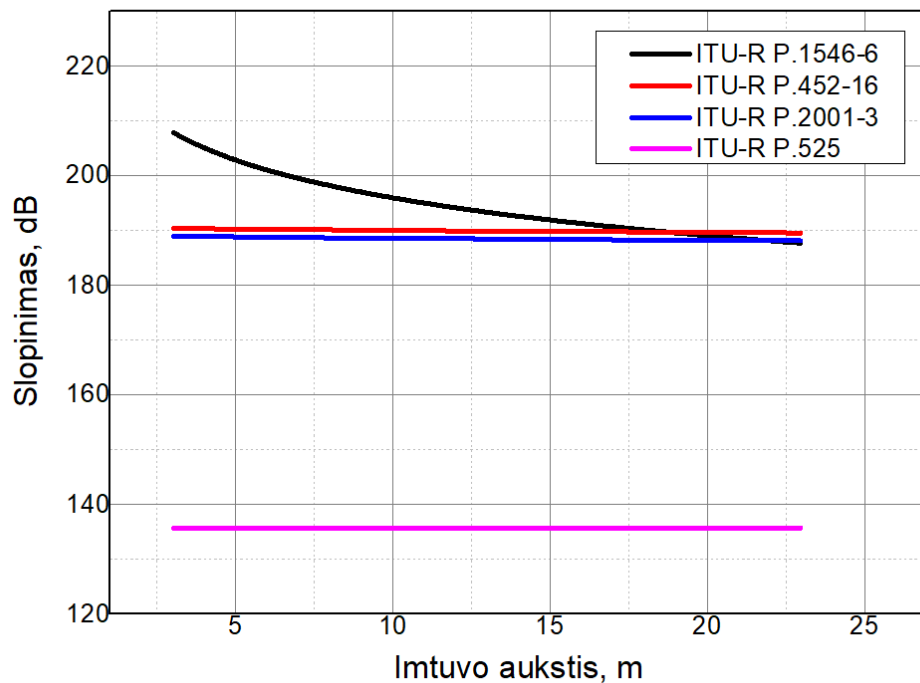
Kaip matome 8, 9 ir 10 paveikslėliuose, mažiausi nuostoliai yra skaičiuojant ITU-R P.525 (laisvos erdvės modelis), kas ir turi būti tikėtina, kadangi laisvoje erdvėje veikia mažiausiai įmanomi nuostoliai. Nuostoliai pagal ITU-R P.2001 ir ITU-R P.452 rekomendacijas yra praktiškai identiški, kas buvo paminėta praeitame skyriuje. Didžiausi nuostolių gauname skaičiuojant ITU-R P.1546 rekomendacija. Svarbu pabrėžti, kad kaip ir aptarta ankstesniame skyriuje, ITU-R P.2001, ITU-R P.452 modeliai yra simetriniai, nėra skirtumo kurį iš terminalų apibrėšime kaip imtuvą ar siųstuvą, priešingai negu remiantis ITU-R P.1546 rekomendacija.



8 pav. Įvairių rekomendacijų bangos sklidimo slopinimo priklausomybė nuo atstumo.



9 pav. Įvairių rekomendacijų bangos sklaidimo slopinimo priklausomybė nuo dažnio



10 pav. Įvairių rekomendacijų bangos sklaidimo slopinimo priklausomybė nuo imtuvo aukščio

4. Technologijų apžvalga

4.1 „Starlink“

Pastaruoju metu, matome didesnę susidomėjimą LEO orbitos (iki 2000 km. jūros lygio) praktiniais panaudojimais palydoviniai ryšiai įgyvendinti, lyginant su plačiai naudojamomis GEO (virš 35000 km. jūros lygio) ir MEO (tarp 5000 ir 12000 km. virš jūros lygio) orbitomis. Kadangi GEO ir MEO atstumas iki žemės paviršiaus yra tolimesnis, tai reiškia didelį signalo vėlinimą. Ieškant būdo, kaip užtikrinti kokybišką palydovinį ryšį, vienas iš sprendimų leisti veikti palydovams LEO orbitoje. Tai yra labai patraukli ir dar neišvystyta rinka, todėl susilaukė didelio investuotojų susidomėjimo, matome vystamasi tokių projektų kaip „Starlink“, „OneWeb“ ir „Blue Origin“, kurie žadą užtikrinti kokybišką ryšį LEO orbitos palydovais.[10]

Dėl šių sistemų palydovų veikimo žemesnėje LEO orbitoje, signalo kelias gerokai sumažinamas, kas lemia paketo vėlinimą iki 50 ms. Ekonominiu požiūriu pranašumas yra sistemos paprastas išplečiamumas (angl. *scalability*)[10], kadangi palydovai yra paleidžiami palaipsniui, atsižvelgiant į vartotojų skaičių, kaip pvz. šiuo metu yra iškelta 2000 Starlink palydovų, planuojama iš viso iškelti 42000, tačiau paslaugos jau teikiamos dabar ir dėl augančio vartotojų skaičiaus paslaugų kokybė neprastėja. Kitas ekonominis pranašumas yra tai, kad naudojamos raketos „Starship“ vienu paleidimu gali iškelti iki 400 palydovų(11 pav.), kas anksčiau nebuvo įmanoma ir kodėl būtent su Starlink matome palydovinio ryšio populiarėjimą.

Dar vienas „Starlink“ pranašumas yra aptarnauti vartotojus įvairios topografijos zonose, kalvose, slėniuose, miškuose, kur diegti judriosios tarnybos sistemos, užtikrinančias tokią pačią ryšio kokybę yra tiesiog ekonomiškai per brangu.

Starlink sistemos veikimas yra parodytas 12 paveikslėlyje. Žemės stotis, komunikuoja 17,8-19,3 GHz juostoje žemynkryptiniu ir 27,5-30 GHz juostoje aukštynkryptiniu ryšiu su palydovu, kuris komunikuoja su terminalu 14-14,5 GHz juostoje aukštynkryptiniu ir 10,7-12,7 GHz juostoje žemynkryptiniu ryšiu. Starlink diegia žemės stotį Lietuvoje, tačiau 27,5-30 GHz juostoje šiuo metu jau naudojama RRL tinklo, kurį reikia apsaugoti. Vienas iš šio darbo tikslų yra įvertinti ar Starlink žemės stotis nekenks esamam RRL tinklui, kitaip tariant reikalinga suderinamumo analizė.

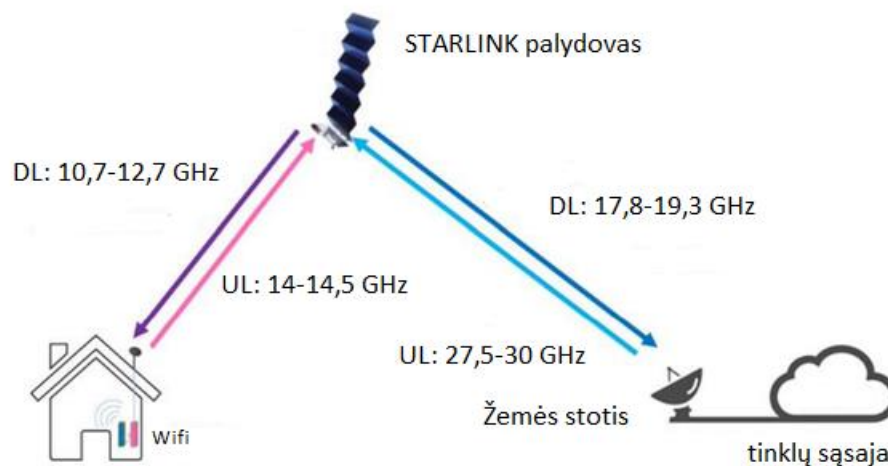
Starlink žemės stoties charakteristika pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė. Starlink žemės stoties parametrai.

Antenos diametras	1,47 m	
Dažnis	Aukštynkryptinis	Žemynkryptinis
	27,5 – 29,1 GHz	17,8 – 18,6 GHz
Kanalo juostos plotis	500 MHz	250 MHz
Bendras juostos plotis	1,5 GHz (3 kanalai x 500 MHz)	1,25 GHz (5 channels x 250 MHz)
Minimalus antenos palenkimas	25°	25°
Maximalus EIRP	66,5 dBW	
Maximalus EIRP tankis	9,7 dBW/4 kHz arba 33,7 dBW/MHz	
Didžiausias stiprinimas	49,5 dBi 29 GHz	46,9 dBi 19 GHz
3dB lygyje antenos lapelio plotis	0,5°	0,8°



11 Pav. „Starlink“ palydovai



12 pav. Starlink sistemos veikimo architektūra.

4.2 Radijo relinės linijos

Augantis duomenų poreikis ir sparta skatina telekomunikacijų ryšių tinklų operatorius ieškoti išeičių patenkinti augančius vartotojų lūkesčius. Fiksuota tarnyba yra vienas iš sprendimų siekiant užtikrinti kokybišką, spartų duomenų srautą, juolab, kad tai yra nuolat tobulėjanti technologija. Fiksuota tarnybas pritaikymas suskirstytas į kelis pobūdžius[11].

Vienas iš radijo relinių linijų pritaikymas yra magistraliniai tinklai judriajam radijo ryšiui. Nors dalinai patenkinti vartotojų duomenų poreikius galima ir šviesolaidžiu, šis sprendimas ne visada yra įmanomas dėl geografinių ar ekonominių priežasčių. Šviesolaidį praktišką naudoti labai tankiai apgyvendintose vietovėse, tačiau vidutinio dydžio miestuose su nelygiu reljefu RRL tinklas yra labiau atsiperkantis sprendimas, kadangi didžioji dalis šviesolaidžio yra tiesiama kartu su greitkeliais. Tokiuose situacijose, patogiau naudoti RRL kaip magistralinius tinklus.

Radijo relinės linijos vaidina svarbų vaidmenį judriosioje tarnyboje užtikrindamos abipusį ryšį tarp mobiliosios tarnybos BS. Siekiant patenkinti išaugusį naudojamų duomenų srautą vienam telefonui, reikalinga daugiau kartų perpanaudoti tą patį dažnį, o tai pasiekama sumažinant BS celės radiusą. Atliktas CEPT ECC raportas 173 pabrėžia svarbų radijo relinių linijų svarbą judriosios tarnybos tarptinkliniam ryšiui. Tai būtų ekonomiškai geras sprendimas tiek retai apgyvendintose vietose, kur diegti šviesolaidį per brangu, tiek tankiai apgyvendintuose miestuose, kur reikalingi kelių kasimo darbai diegiant šviesolaidį, kas trikdytų miesto infrastruktūrai[12]. Tai yra labai svarbu žinant, jog mobiliojo ryšio tinklų duomenų srautas yra asimetrinis, gerokai didesnis žemynkryptinis ryšis (nuo BS iki vartotojo), negu aukštynkryptinis.

Laikinoji fiksuota tarnyba pasižymi greitu diegimo laiku, todėl labai puikiai pasitarnauja karinėms ar kritinėms reikmėms. Pasitaiko situacijų, kai dėl gaisro, sprogių, žemės drebėjimų ar

liūčių egzistuojanti šviesolaidžio infrastruktūra ar BS, gali būti pažeistos, tačiau būtent tokiuose kritiniuose laikotarpiuose užtikrinti kokybišką ryšį yra būtina. Kaip pavyzdys, 2011 m. Japonijoje tsunamio metu nemaža dalis telekomunikacijos infrastruktūros buvo pažeista, tiek šviesolaidis, tiek dalis judriosios tarnybos tinklo. Laikinieji ir nešiojami FS terminalai buvo pajungti prie pažeistos judriosios tarnybos infrastruktūros, atkuriant tinklo veiklą[11].

Įdomus dalykas ir tai, kad radijo relinės linijos puikiai pasitarnauja finansiniame sektoriuje, ypatingai algoritminėje prekyboje. Kadangi finansų rinkoje, milisekundės pagreitėjimas tarp transakcijų gali nulemti pranašumą prieš konkurentus arba didesnę pelną, daug finansinių įmonių ieško mažo vėlavimo, beveik neapkrauto tinklo savo poreikiams. Būtent finansų sektorius nemažai investuoja į privačius mikrobangų linijų tinklus siekiant sujungti finansinius centrus mažo vėlavimo ir mažos apkrovos tinklais[11].

4.3 ESIM charakteristikos

WRC-19 svarstoma naudoti dažnių juostą 17,7-19,7 GHz (Space-to-Earth) ir 27,5-29,5 GHz (Earth-to-space) ESIM komunikuojant su geostacionariomis palydovinėmis stotimis pagal Rezoliuciją 158(WRC-15). ESIM yra žemės stotys, kurios komunikuoja su FFS stotimis, bet veikia ant judančios platformos, kaip laivai, lėktuvai ar automobiliai. ESIM veikia panašiu kaip VSAT principu, tačiau technologija leidžia jiems būti eksploatuojamiems judant, išlaikant tikslų antenos nukreipimą, kaip ir žemės stotims FSS tinkluose. [13]

Egzistuoja trys ESIM skirstymai, antžeminiai, aviacijos ir jūriniai, visos trys kategorijos turi skirtingas charakteristikas. Šiame darbe nagrinėjama antžeminiai ESIM terminalai. Visi ESIM terminalai, nepriklausomai nuo naudojamos platformos turi laikytis e.i.r.p (Ekvivalentės izotropinės spinduliuotės galia) spektrinio tankio kaukę skaičiuojant į 40 KHz, kuri naudojama studijoms 27,5-29,5 GHz juostoje.

3 lentelė. Maksimalus e.i.r.p ESIM terminalams priklausomai nuo maksimalios krypties spinduliavimo kampo θ [1]

Kampas θ	Maksimalus e.i.r.p. per 40 kHz
$2^\circ \leq \theta \leq 7^\circ$	$(19 - 25 \log \theta)$ dB(W/40 kHz)
$7^\circ < \theta \leq 9.2^\circ$	-2 dB(W/40 kHz)
$9.2^\circ < \theta \leq 48^\circ$	$(22 - 25 \log \theta)$ dB(W/40 kHz)
$48^\circ < \theta \leq 180^\circ$	-10 dB(W/40 kHz)

Kur kampas θ yra atskaita nuo maksimalios spinduliavimo krypties.

Būtina pabrėžti, kad ESIM, veikiančios mažesniu palenkimo kampų į GSO palydovą turi turėti didesnę e.i.r.p lygį palyginus su tokiais pat terminalais skirtingais palenkimo kampais, norint pasiekti tokį patį galios srauto tankį dėl ilgesnio atstumo, bei atmosferos sugerties. Tokioms stotims leidžiama viršyti galios lygius taip:

4 lentelė. E.i.r.p korekcija dėl palenkimo kampo

Palenkimo kampas į GSO (ϵ)	e.i.r.p spektrinio tankio padidėjimas (dB)
$\epsilon \leq 5^\circ$	2.5
$5^\circ < \epsilon \leq 30^\circ$	$3 - 0.1 \epsilon$

ESIM antenų diagramos aprašytos ITU-R S.580-6 rekomendacijoje. Šioje rekomendacijoje pateiktos charakteristikos žemės stotims, komunikuojančios su satelitais, kurios turi atitikti tam tikrus techninius kriterijus. Siekiant efektyviai išnaudoti turimą radijo spektrą ir atsižvelgiant į atstumą tarp palydovų, šių žemės stočių šoniniai lapeliai turi būti kuo įmanoma mažesni. [14]

Stiprinimas turi būti parinktas toks, kad 90 % šoninių lapelių maksimumų neviršytų:

$$G = 29 - 25 \log \varphi \text{ [dBi]} \quad (20)$$

Kur G Antenos stiprinimo koeficientas izotropinio spinduolio atžvilgiu, φ kampas nuo pagrindinio lapelio.

Kai $D/\lambda \geq 50$:

$$G = G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} (D/\lambda \varphi)^2, \text{ kai } 0^\circ \leq \varphi < \varphi_m \quad (21)$$

$$G = G_1, \text{ kai } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \quad (22)$$

$$G = 29 - 25 \log \varphi, \text{ kai } \varphi_r \leq \varphi \leq 19.95^\circ \quad (23)$$

$$G = \text{Min}(-3.5, 32 - 25 \log \varphi), \text{ kai } 19.95^\circ < \varphi < \varphi_b \quad (24)$$

$$G = -10, \text{ kai } \varphi_b \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (25)$$

Kai $D/\lambda < 50$:

$$G = G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} (D/\lambda \varphi)^2, \text{ kai } 0^\circ \leq \varphi < \varphi_m \quad (26)$$

$$G = G_1, \text{ kai } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \quad (27)$$

$$G = 52 - 10 \log (D/\lambda) - 25 \log \varphi, \text{ kai } \varphi_r \leq \varphi < \varphi_b \quad (28)$$

$$G = 10 - 10 \log (D/\lambda) \text{ kai } \varphi_b \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (29)$$

$$\frac{D}{\lambda} = \sqrt{\frac{10^{\left(\frac{G_{\max}}{10}\right)}}{\eta \pi^2}} \quad (30)$$

$$\varphi_m = 20 \lambda/D G_{\max} - G_1 \quad (31)$$

$$G_1 = 2 + 15 \log (D/\lambda), \text{ kai } D/\lambda < 50, \quad (32)$$

$$= -21 + 25 \log (D/\lambda), \text{ kai } 50 \leq D/\lambda < 100, \quad (33)$$

$$= -1 + 15 \log (D/\lambda), \text{ kai } 100 \leq D/\lambda, \quad (34)$$

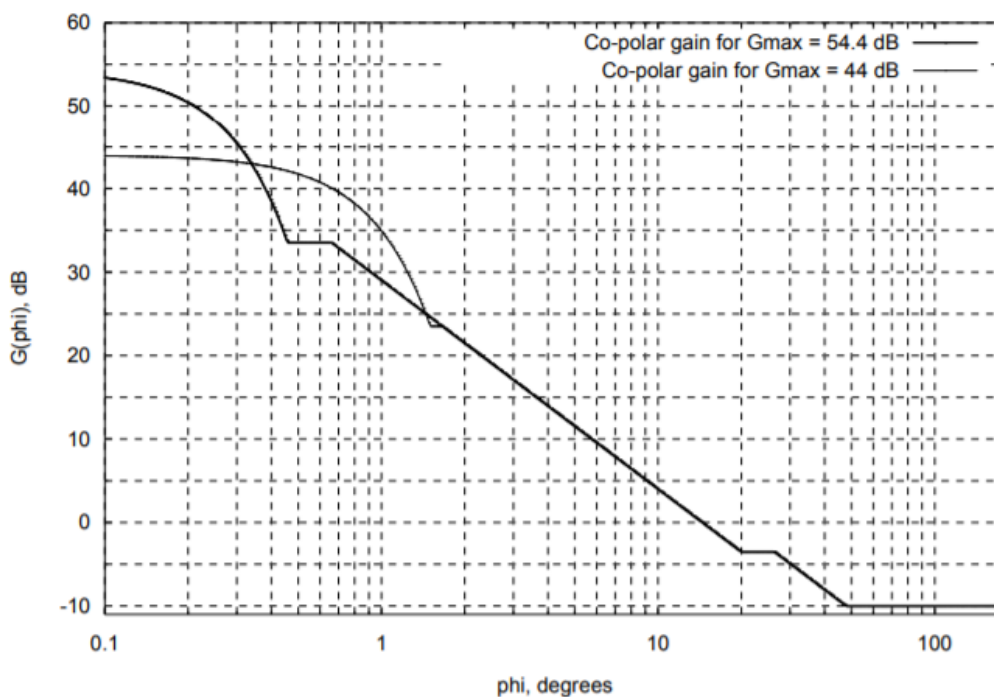
$$\varphi_r = 15.85 (D/\lambda) - 0.6, \text{ kai } D/\lambda \geq 100, \quad (35)$$

$$= 100 \lambda/D \text{ kai } D/\lambda < 100, \quad (36)$$

$$\varphi_b = 10^{\frac{42}{25}} \quad (37)$$

Kur D yra antenos diametras, $\eta = 70 \%$ (naudingumo koef.)

ITU-R S.580-6 Rekomendacijoje pateikta antenos diagrama yra APEREC015V01.



13 pav. APEREC015V01 diagrama [15]

5 Lentelė. ESIM parametrai pagal 158 Rezoliuciją.

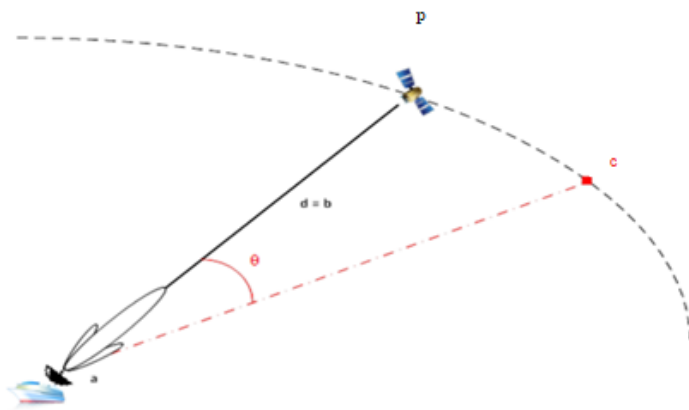
ESIM antenos stiprinimas, dBi	40
ESIM maksimali spinduliavimo galia, dBW	55
ESIM antenos diagrama	ITU-R S.580-6

ESIM e.i.r.p. spectrinio tankio kaukė, dB(W/Hz)	Pagal ITU Rezoliucija 156
ESIM juostos plotis, MHz	14
ESIM antenos aukštis, m	2
Sklidimo modelis	ITU-R P.452- 16

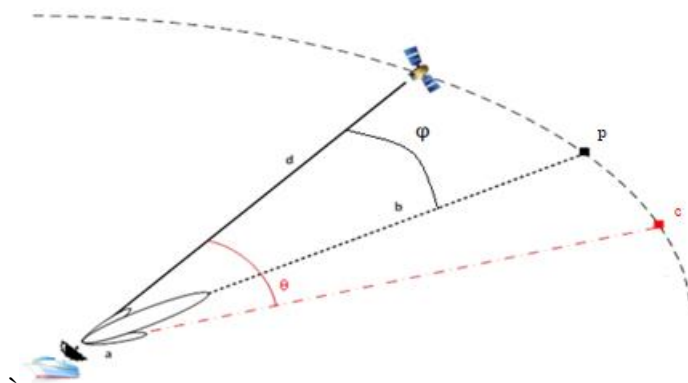
29,5-30 GHz dažnių juosta yra aukštynkryptis ryšys, kuriame ESIM perduoda informaciją GSO FSS palydovams. Kadangi yra didelė tikimybė, kad GSO FSS tinklai komunikuojantys su ESIM dalinsis erdve ir dažniais su GSO FSS tinklais komunikuojančiais su žemės stotimis fiksuotose lokacijose atsiranda interferencijos rizika pašaliniam GSO FSS tinklams nuo ESIM. Todėl ESIM privalo naudoti keliasias stabilizuotas kryptines antenas, kurios suteiktų labai tikslų fokusavimą į GSO FSS satelitą ir privalo užtikrinti, kad spinduliavimas į gretimus GSO satelitus būtų kuo įmanoma mažesnis.

19,7-20,2 GHz dažnių juosta yra žemynkryptinis ryšys ESIM, kuris priima signalus iš GSO FSS palydovų. Šiuo atveju, signalas perduodamas iš GSO FSS būtų apsprendžiamas aptarnavimo plotu ir atitinkantis nurodytus techninius parametrus. Kadangi dauguma CEPT šalių yra priskyvus fiksuotą ir judrųjį ryšį 19,7-20,2 GHz dažnių juostoje pirminiam naudojimui, ESIM technologija niekada negalės reikalauti apsaugos nuo interferencijos šiuose dažniuose.

14 pav. matome ESIM komunikacijos su GSO satelitu scenarijus. a) dalyje ESIM naudoja sekimo mechanizmą, taip išlaiko tikslų antenos nukreipimą vektoriumi \vec{d} . Kai ESIM juda, b) pavaizduotas atvejis, kada atsiranda rizika ESIM anteną laikinai nukreipti netiksliai. Įmanoma, kad paklaida bus skirtumas tarp antenos spinduliuojamo pagrindinio lapelio ir šoninio θ ir tai sukeltų interferenciją gretimam GSO satelitui. Kampas θ bus lygus φ plus paklaida.



a)



b)

14 pav. ESIM komunikacija su GSO FSS satelitu:

a) ESIM tiksliai nukreipus anteną į palydovą,

b) ESIM ne tiksliai nukreipus anteną į palydovą

Kur: a yra ESIM pozicija, b antenos nukreipimo trajektorija, c - GSO orbita, \vec{d} vektorius nuo ESIM iki satelito, φ mažiausias kampas tarp ESIM ir taško P, θ mažiausias kampas tarp ESIM ir taško P, P taškas kuriame spinduliavimas sklinda nuo šoninio lapelio.

Norint išlaikyti tikslų nukreipimą į GSO satelitą, reikia taikyti metodus, užtikrinančių tikslų spinduliavimą judėjimo metu. Vienas iš šių metodų vadinama atvira-kilpa. Tokio metodo principas yra skaičiavimas azimuto A ir aukščio E pagal ESIM antenos poziciją ant žemės ir nominalią ilgumą norimo GSO satelito:

$$A = \arctan\left(\frac{\tan L}{\sin l}\right) \quad (38)$$

$$E = \arctan \left(\frac{\cos \varphi - \frac{R_E}{R_E + R_0}}{\sin \varphi} \right) \quad (39)$$

kur l yra ESIM platuma, L yra ESIM santykinė ilguma (absoliuti vertė tarp ESIM ir GSO satelito ilgumų skirtumo), R_E žemės spindulys, R_0 palydovo aukštis.

Atviros kilpos metodu, ESIM antenos nukreipimo kampai yra apskaičiuojami iš anksto, remiantis nuspėjamu GSO satelito judėjimu. Vienas iš būdų tam pasiekti gali būti satelito efemerido reguliarus transliavimas. Kiekvienas ESIM turėdamas galimybę atsisiųstų nuolat tikslinamą efemeridą ir taip išlaikyti tikslų antenos nukreipimą į GSO satelitą. Tuo tarpu ESIM koordinatės gali būti tikslinamos GPS pagalba.

Antrasis metodas, vadinamas “RF uždara kilpa” yra gerokai tikslesnis už atviros kilpos sekimo metodą. Šiuo atveju ESIM antena seka palydovą, nuolat pataisydama savo nukreipimą pagal priimamo iš palydovo signalo lygį. Naudojant tokį metodą galima pasiekti labai tikslų nukreipimą, didelio terminalo autonomiškumą ir nėra paklaidos skaičiavimuose dėl siunčiamos GSO palydovo padėties orbitoje. Maksimalus praktikoje pasiekiamas ESIM antenos nukreipimo tikslumas naudojant atvirą kilpą yra iki $0,05 \cdot \theta_{3dB}$, kur θ_{3dB} yra spindulio plotis iki -3 dB lygio, šiuo atveju galima aproksimuoti pagal formulę:

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]} \quad (40)$$

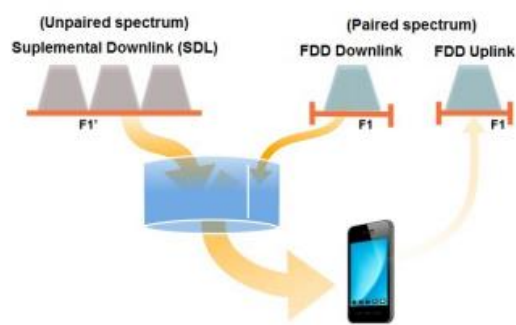
Kur D yra ESIM antenos diametras metrais.

4.5 Papildomas žemynkryptinis ryšis (SDL)

(WRC-19) Rezoliucija 223 „Additional frequency bands identified for International Mobile Telecommunications“ identifikuoja L-juostos dalį 1427-1518 MHz kaip SDL[16]. Kaip ir minėta ankstesniuose skyriuose, duomenų srautas yra asimetrinis, vartotojai siunčiasi daugiau duomenų negu jų išsiunčia, todėl ir paties spektro poreikiai yra nesimetriški. Todėl logiška skirti turimą spektrą žemynkryptiniam ryšiui. Anksčiau SDL negalėjo būti įgyvendinamas be technologinių galimybių, kurios įgyvendintos HSPA+, LTE R9 ir R10. SDL veikimas parodytas 15 pav., prie veikiančių papildomų suporuotų aukštynkryptinių ir žemynkryptinių kanalų, papildomai ryšys užmezgamas SDL kanalu[17].

GSMA duomenimis SDL plėtra atneštų Europai 13,05 mlrd. Dolerių ekonominę naudą[18], todėl EK sprendimas (EU) 2018/661 (pakeitimas (EU) 2015/750) bei ECC sprendimai ECC/DEC/(13)03 (08-11-2013, pakeista 03-07-2015 ir 02-03-2018) ir ECC/DEC/(17)06 (17-11-

2017) galutinai teisiškai įtvirtino L-juostą kaip skirtą judriosios tarnybos poreikiams. Nors šios juostos kanalų valdymas yra mobiliojo ryšio tinklo operatorių atsakomybė, labai tikėtina, kad operatoriai šiuos kanalus priskirs 5G tinklams. Minėtuose sprendimuose, šalys turi didelę laisvę ir lankstumą kaip įgyvendinti ir paskirstyti L-juostą judriosios tarnybos poreikiams. Pagal NJFA (Joint agreement between the civil and military authorities of the NATO Nations on the current use of radio frequency spectrum for military purposes) sutartį, nacionalinės karinės tarnybos pasilieka teisę naudoti savo poreikiams, diegiant TRRL dalį L-juostos. 16 paveikslėlyje matome kaip kokia kaimyninė valstybė planuoja paskirstyti dažnių blokus, kaip matome nesutapimai 1432-1452 MHz ir 1472-1492 MHz juostose, todėl yra būtina atlikti suderinamumo analizę prieš įgyvendinant šias sistemas.



15 pav. SDL veikimo principas [17]



16 pav. Planuojamas 1432-1512 MHz juostos panaudojimas skirtingose valstybėse.

5. Tyrimo metodika

5.1 Monte-Carlo metodas

Monte-Carlo metodas yra serija algoritmų siekiant išspręsti įvairias skaičiavimo problemas naudojant atsitiktines imtis. Šis metodas labai plačiai taikomas informacinėse ir telekomunikacijų technologijose, inžinerijoje, netgi biologijoje, kvantinėje mechanikoje, architektūroje, ekonomikoje[19]. Pavadinimas kilo fizikui N. Metropolis pavadinant vieno iš garsiausių lošimo namų Monake. Monte-Carlo metodu atliekama didelis kiekis skaičiavimų kartojant juos daug kartų, skaičiuojamas tik kompiuteriais.

5.2 Interferencijos įvertinimas

Skaičiuojant interferencijos lygį būtina įvertinti spektro dalį, kuri nepersikloja arba nesutampa tarp dviejų sistemų, kadangi tai įvertinus galime nustatyti tikslesnę interferenciją. Praktikoje tai atlieka spektrinės kaukės ir filtrai, tačiau šie parametrai ne visada yra žinomi ir laisvai prieinami, kaip sistemų, kurios nagrinėjamos šiame darbe. Tam įvedamas interferencijos korekcijos faktorius, tai yra imtuve priimamos galios korekcija dėl juostos ilgių nesutapimo.

Turime keturis pagrindinius scenarijus kaip skaičiuoti interferencijos korekcijos faktorius. B_w laikome imtuvo juostos plotį, B_u – interferuojančio siųstuvo juostos plotį.

1. jeigu abidvi sistemos veikia tuo pačiu centriniu dažniu ir tuo pačiu juostos pločiu, jokios korekcijos netaikome, $B_w = B_u$

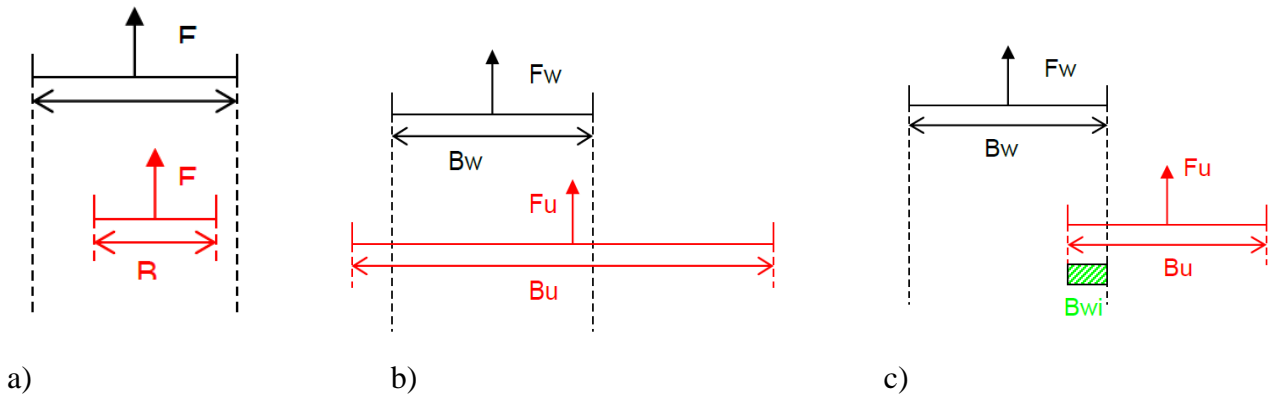
2. jeigu interferuojanti sistema yra mažesnio juosto pločio, negu naudinga, $B_w \subset B_u$ (17 pav. a), jokios korekcijos netaikome, kadangi imtuvas priims visą spinduliuojamą siųstuvo energiją kaip ir 1. atveju.

3. jeigu interferuojančios sistemos juostos plotis viršija naudingos $B_u \subset B_w$ (17 pav. b), taikome tokį interferencijos korekcijos faktorius:

$$IKF = -10\log(B_u / B_w) \text{ [dB]} \quad (41)$$

4. jeigu interferuojanti sistema ir naudinga sistema turi tik tam bendrą juostos pločio dalį (17 pav. c) $B_w \not\subset B_u$ ir $B_u \not\subset B_w$ ir $B_w \cap B_u$), taikome tokį interferencijos korekcijos faktorius:

$$IKF = -10\log(B_u / B_{wi}) \text{ [dB]} \quad (42)$$



17 pav. Dviejų sistemų juostos pločių persiklojimo scenarijai

Prieš skaičiuojant bet kokių sistemų elektromagnetinį suderinamumą, būtina įvertinti keliamų trukdžių lygi. Yra keli įmanomi būdai: nešlio ir triukšmų, nešlio ir triukšmų su interferencija santykis, interferencijos ir triukšmų santykis. Šiame darbe bus naudojamas interferencijos ir triukšmų santykis I/N , kuris apibrėžiamas kaip santykis, interferuojančio signalo lygio, priimamo imtuve ir imtuvo vidinių triukšmų, kuriuo užtikrinamas reikiamas imtuvo veikimas (reikalingas signalas dar gali būti detektuotas). Triukšmai N apskaičiuojami pagal formulę:

$$N = k_B T B F \text{ [W]}, \text{ dažnai aproksimuojama:} \quad (43)$$

$$N = -173,977 + 10 \log(B) \quad (44)$$

Kur k_B yra Bolcmano konstanta $1.380\ 6504(24) \times 10^{-23}$ J/K, T - imtuvo temperatūra Kelvinais, B yra imtuvo juostos plotis Herciais, F – imtuvo triukšmo koeficientas (žiūrėti 6 lentelę).

5.3 ITU-R F.699-8 rekomendacija

ITU-R F.699-8 rekomendacijoje aprašyta antenų diagramos nuo 100 MHz iki 86 GHz, skirtos suderinamumo ir koordinavimo studijomis[20]. Šioje rekomendacijoje aprašyta antenos diagrama nuo 1 GHz iki 86 GHz:

$$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi\right)^2, \text{ kai } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \quad (45)$$

$$G(\varphi) = G_1, \text{ kai } \varphi_m < \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \quad (46)$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 25 \log \varphi, \text{ kai } 100 \frac{\lambda}{D} < \varphi < 48^\circ \quad (47)$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right), \text{ kai } 48^\circ < \varphi < 180^\circ \quad (48)$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad (49)$$

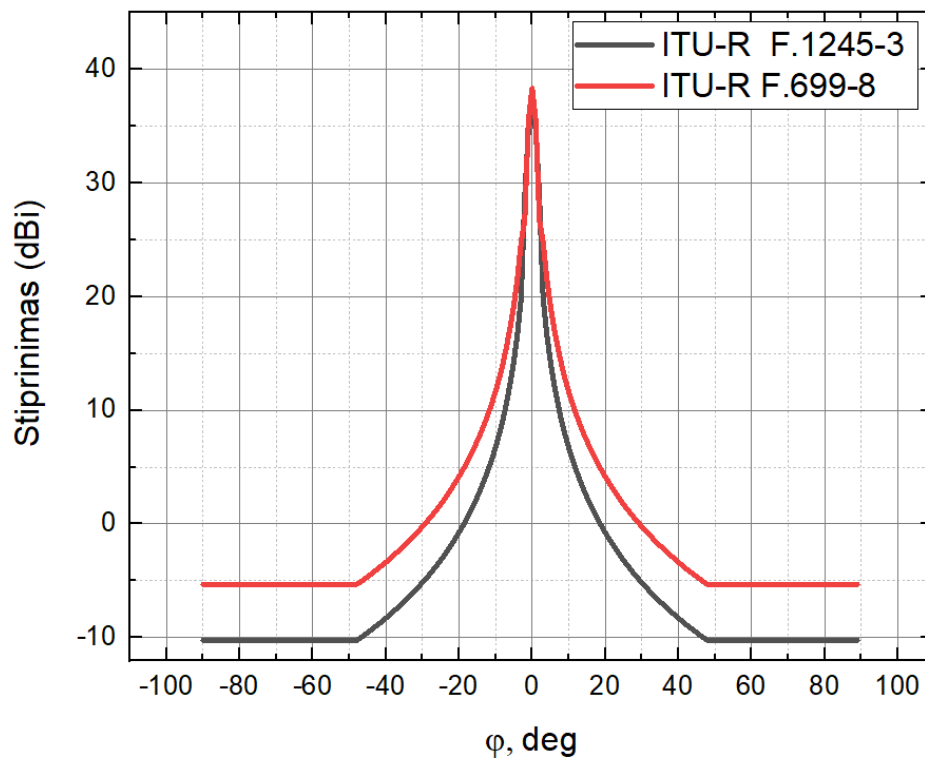
5.4 ITU-R F.1245-3 rekomendacija

ITU-R F.1245-3 rekomendacijoje aprašoma antenos diagrama skirta interferencijos įvertinimui 1-86 GHz dažnių juostoje. Ši rekomendacija yra pakoreguota ITU-R F.699-8 būtent RRL interferencijos skaičiavimams įvairiems scenarijams. Šios rekomendacijos antenos diagramą galima aprašyti pagal[21]:

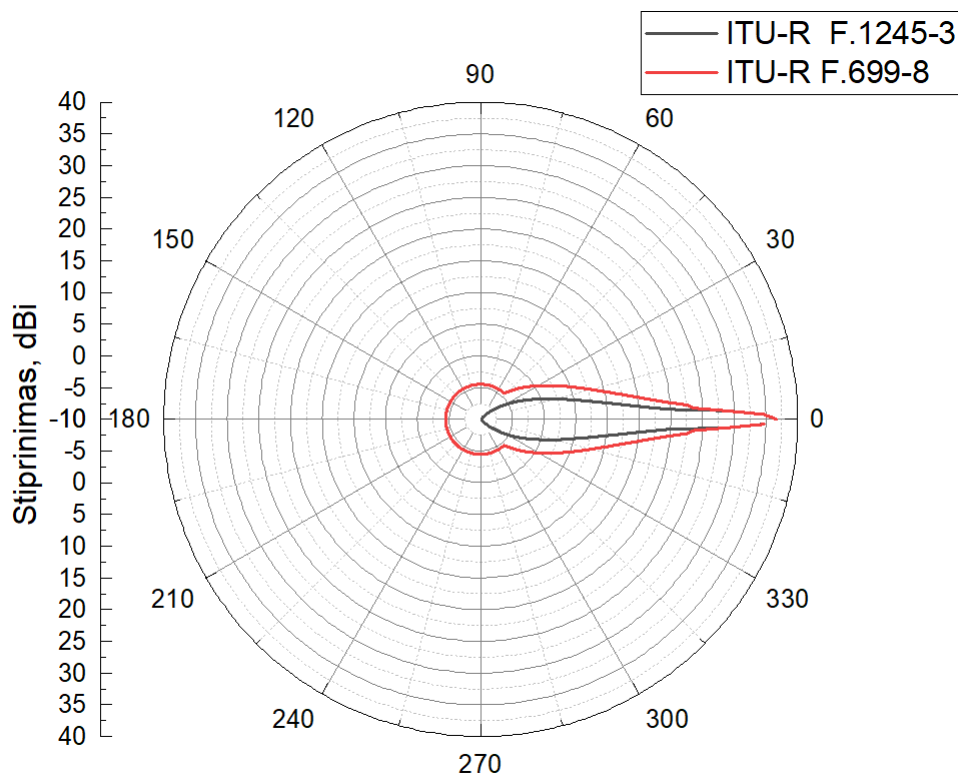
$$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi\right)^2 \quad , \text{kai } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \quad (50)$$

$$G(\varphi) = 39 - 5 \log(D/\lambda) - 25 \log(\lambda) \quad , \text{kai } \varphi_m < \varphi < 48^\circ \quad (51)$$

$$G(\varphi) = 3 - 5 \log(D/\lambda) \quad , \text{kai } 48^\circ < \varphi < 180^\circ \quad (52)$$



18 Pav. Antenos diagrama pagal ITU-R F.699-8 ir ITU-R F.1245-3 rekomendacijas nuo 1 GHz iki 86 GHz dažnių diapazone Dekarto koordinatų sistemoje.



19 Pav. Antenos diagrama pagal ITU-R F.699-8 ir ITU-R F.1245-3 rekomendacijas nuo 1 GHz iki 86 GHz dažnių diapazone polinėje koordinacių sistemoje.

5.5 Pradinės sąlygos elektromagnetinio suderinamumo „Starlink“ sistemos ir radijo relinių linijų Vilniaus mieste įvertinimui.

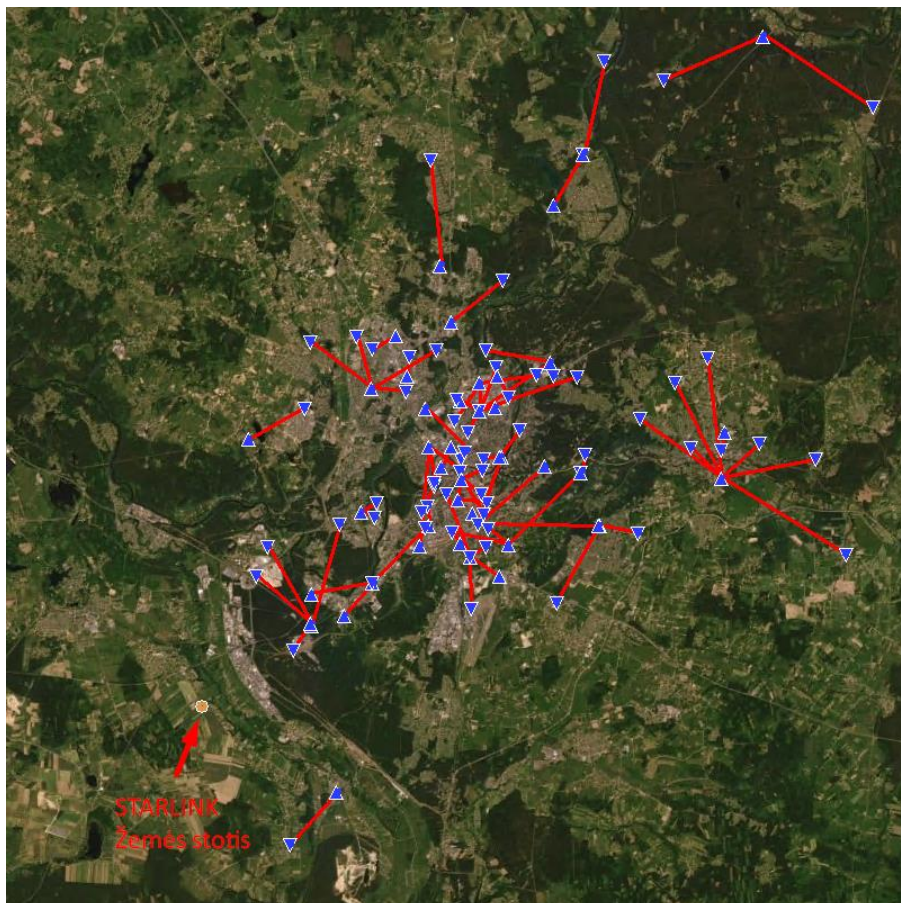
Šiame darbo etape tyrinėtas realus RRL tinklas, veikiantis 27,5-29,5 GHz dažnių juostoje, kaip parodyta 20 pav. Pati populiariausia antena, naudojama FS tarnybos Lietuvoje yra „Ericsson“ „UKY 210 57/SC15“, jos kryptinė diagrama pavaizduota 21 pav. ir parametrai 6 lentelėje.

Starlink žemės stoties parametrai pateikti 2 lentelėje. Antenos diagrama naudota ankstesniame skyriuje aptarta ITU-R S.580-6 Rekomendacijos APEREC015V01. Laikoma, kad Starlink žemės stotis patiria papildomus 10 dB nuostolius dėl apsauginės geležinės tvoros ekranavimo kaip parodyta 22 paveikslėlyje.

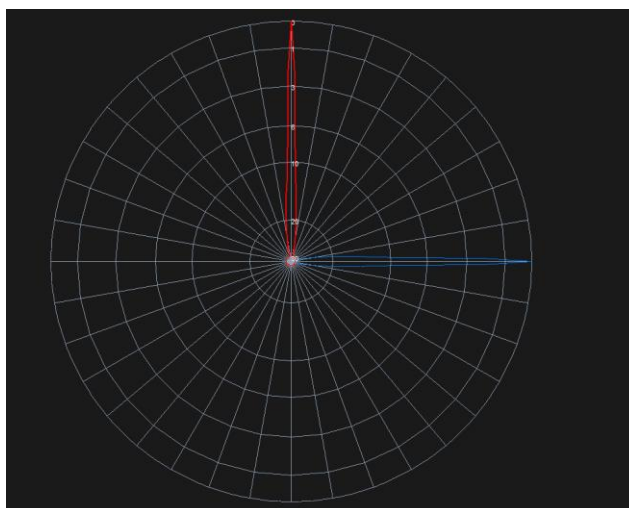
Skaičiavimai atliekami pasinaudojant „HTZ Communications“ programine įranga. Interferencijos lygis RRL nuo Starlink sistemos įvertinamas imtuvo slenksčio degradavimo (threshold degradation TD) parametru, apibrėžiamu kaip priimto naudingojo signalo lygio išlaikymas nustatytam klaidingų bitų skaičiui (BER). Atsiradus trukdžius keliančiam signalui, reikia stipresnio naudingojo signalo imtuve, kad būtų išlaikytas tas pats BER. TD skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$TD = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{I-N}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (53)$$

Laikome, kad TD negali viršyti 0,4 dB RRL sistemai. Skaičiavimams pasirinktas ITU-R P.452-16 modelis, pasirenkant 20% laiko procentą. Atlikti du scenarijai, su reljefu, bei su reljefu ir pastatų sluoksniu.



20 Pav. RRL tinklas Vilniuje ir Starlink žemės stotis



21 pav. Vilniuje naudojamų RRL antenų diagrama (horizontali dalis pažymėta raudona, vertikali mėlyna)

6 lentelė. RRL charakteristikos

Antenos diametras, m	0,3
Dažnių juostos plotis, MHz	28 arba 56
Moduliacija	512-QAM
Antenos stiprinimas, dBi	38
Poliarizacija	V, H
Siųstuvo Galia, dBm	4-14
KTBF, dBm	nuo -96,5 iki -103,5

5.5 pradinės sąlygos ESIM elektromagnetinio suderinamumas su RRL įvertinimui

Pirma ESIM suderinamumo dalis skaičiuota panašiai kaip Starlink scenarijaus atveju, išskyrus tai, kad buvo pasirinktas ne viena žemės stotis, bet modeliuotas atsitiktinis ESIM terminalų išdėstymas Monte-Carlo statistinė analizė. RRL parametrai, kaip ir praeitame skyriuje, pateikti 6 lentelėje, ESIM parametrai 5 lentelėje.

Šio scenarijaus atveju buvo atsitiktinai išdėstyta 20000 terminalų, skaičiuotas kuriamas laukas skirtingais laiko procentais, skirtingiems I/N kriterijams (7 lentelė). Buvo kartoti 3 scenarijai palyginimui, skaičiavimams naudota ITU-R P.452-16 rekomendacija 0,001% ir 20% laiko, neatsižvelgiant į reljefą bei pastatų sluoksnį bei atsižvelgiant tik į reljefą ir atsižvelgiant į pastatų sluoksnį ir reljefą.

7 lentelė. FS leidžiamos interferencijos galia 27.5 - 29.5 GHz juostoje[2]

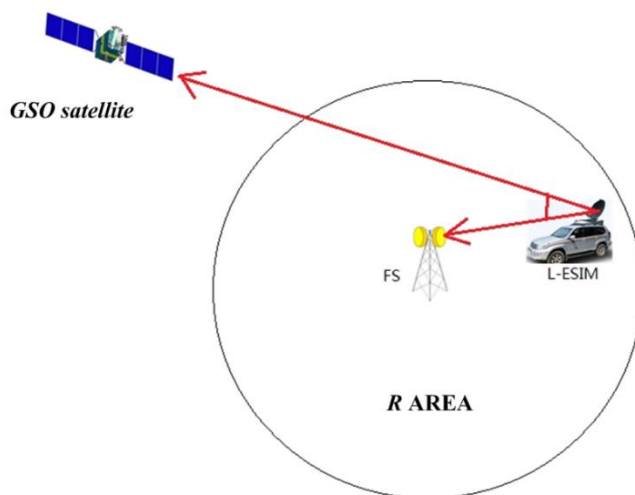
<i>I/N</i>	ITU-R nuorodos	Tipas
9 dB (0.001% laiko)	SF.1719	Trumpalaikis
-10 dB (20% laiko)	F.758-6, SM.1448	Ilgalaikis

Šiuo atveju interferencija laikoma ESIM sukelti trukdžiai FS atžvilgiu, jei jie viršija nurodytas lentelėje I/N vertes.

Taip pat būtina pabrėžti, kad pagal 156 Rezoliuciją, 17,7-19,7 GHz dažnių juostoje ESIM terminalai negali prašyti administracijų apsaugos nuo tuose pačiuose dažniuose veikiančių FS, todėl tyrimai atliekami tik ESIM aukštynkryptinėje juostoje.

5.6 ESIM scenarijus SEAMCAT programine įranga

Palyginimui buvo atlikta analizė naudojant SEAMCAT programinę įrangą. SEAMCAT programinė įranga yra labai plačiai naudojama suderinamumo analizėms dėl greito skaičiavimo, integruotų bibliotekų, turinčių labai daug sklidimo modelių, bei antenų pasirinkimą. Skaičiavimai atliekami Monte-Carlo metodu, 100000 kartų vienam scenarijui. ESIM parametrai naudoti pagal 5 lentelę, RRL parametrai pagal 6 lentelę, tačiau RRL antenos diagramai pasirinkta atitinkamai ITU-R F.1245-3 ir ITU-R F.699-8 rekomendacijos. Paveikslėlyje 22 parodyta kaip ESIM spinduliuojamas signalas trikdo RRL imtuvą. GSO palydovo aukštis pasirinktas 36000 km. Laikome, kad tiek ESIM, tiek GSO palydovo antenos yra tiksliai nukreiptos vienos į kitą. Skaičiavimams naudota ITU-R P.452-16 rekomendacija 0,001% ir 20% laiko, atsižvelgiant į pastatų sluoksnį ir ne.



22 pav. Interferencijos tarp L-ESIM ir FS schema

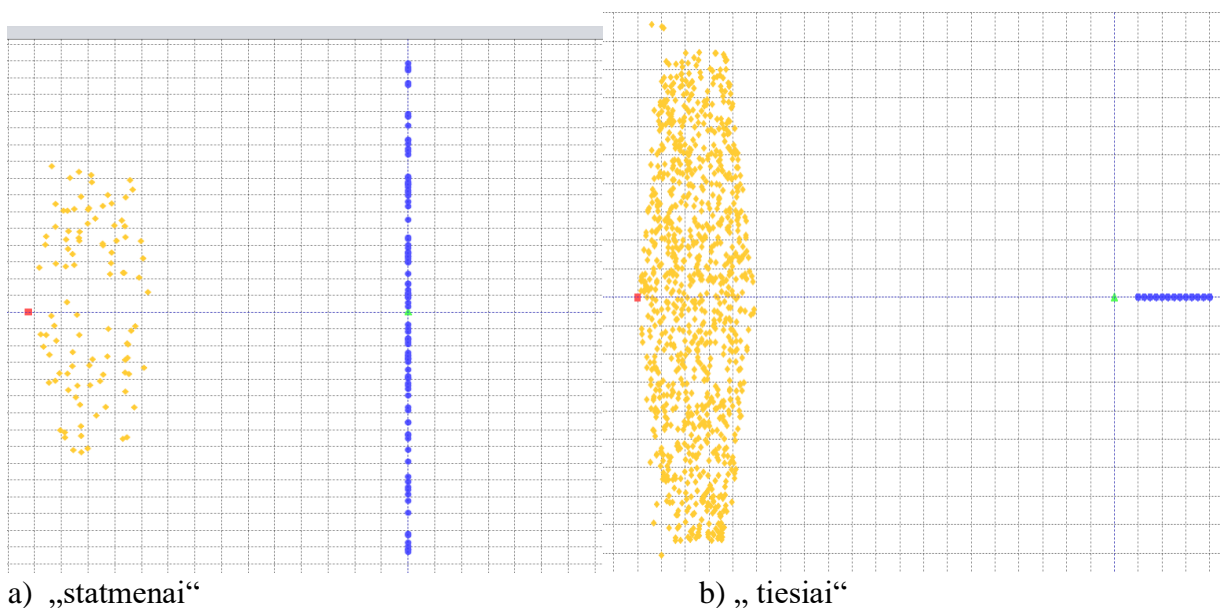
5.7 SDL scenarijus

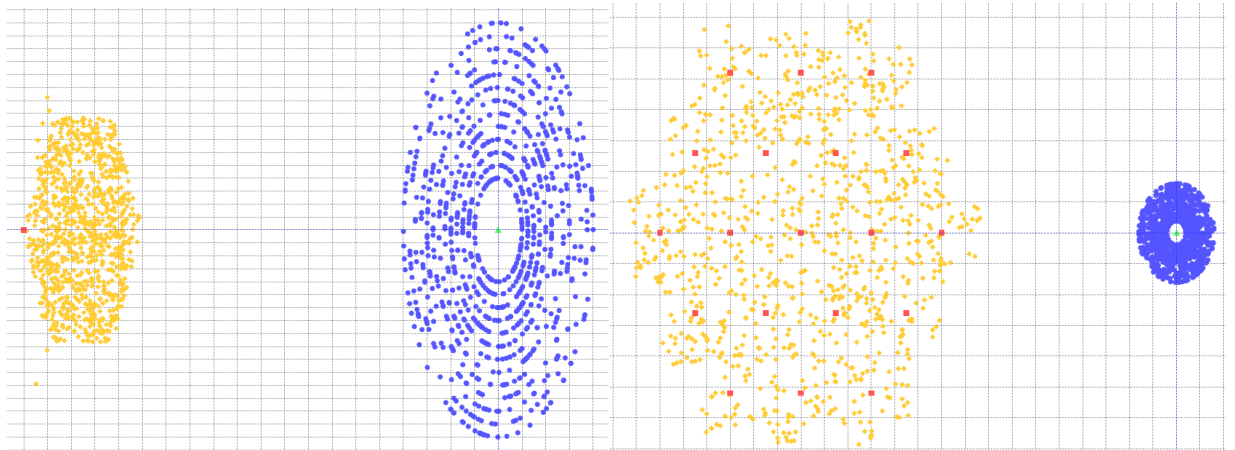
Šiame darbo etapo tikslas nustatyti koku atstumu gali veikti TRRL ir judriosios tarnybos sistemos L juostoje. IMT BS stoties ir TRRL parametrai pateikti 8 lentelėje. Palyginimui, nagrinėjama vienos judriosios tarnybos BS, bei viso tinklo poveikis TRRL tinklui. Išskiriami trys sistemų išdėstymo būdai „statmenai“, „tiesiai“ ir „žiedas“ kaip parodyta 23 paveikslėlyje. Raudonas taškas yra BS, geltonas UE (vartotojo įranga), žalias – TRRL siųstuvai, mėlynas – TRRL imtuvai. „Tiesiai“ sistemų išdėstymą viena kitos atžvilgiu konstruojame tam, kad iširtume blogiausią atvejį, kadangi BS siųstuvai yra tiesiogiai nukreipti į TRRL imtuvą, „statmenai“ atveju – priešingai,

bandome sužinoti mažiausią interferenciją sukeltantį atvejį, tuo tarpu „žiedas“ konfigūracija yra statistiškai bendriausias atvejis, antenų išsidėstymas sistemų atžvilgiu yra įvairus. Išsiaiškinant vienos BS keliamus trikdžius TRRL tinklui, ieškome viso judriosios tarnybos tinklo poveikį TRRL sistemai, scenarijaus konfigūracija parodyta d). Tinklą sudaro 19 BS, celės radiusas yra 5 km, padengimo plotas yra apie 3700 km². Laikome, kad judriosios tarnybos tinklas dirba pilna apkrova – BS spinduliuoja maksimalią įmanomą energiją, blogiausio atvejo scenarijus. Skaičiavimai buvo atliekami ITU-R P.1546 ir ITU-R P.2001 rekomendacijomis, pasirenkant 10% laiko parametą. Interferencija laikoma per didelė, kada I/N santykis viršijama 5% visų įvykių. I/N pasirinkta keturios vertės, -6 dB, 0 dB, 3 dB, 10 dB.

8 Lentelė. SDL scenarijaus judriosios tarnybos BS ir FS TRRL parametrai.

	BS parametrai	TRRL parametrai
Antenos diagrama	3GPP Tri-Sector	Rec. ITU-R F.1245-2
Antenos aukštis	20-80 m (žingsnis: 1 m)	10-25 m (žingsnis: 1 m)
Tx stiprinimas	15 dBi	26 dBi
Rx stiprinimas		26 dBi
Dažnis:	1450 MHz	1450 MHz
Kanalo plotis	20 MHz	7 MHz
EIRP	64 dBm/20 MHz	59 dBm/7 MHz
El. palenkimas	0-8 deg. (žingsnis 1 deg.)	
Celės radius	5 km	
Atstumas tarp Tx ir Rx		2-8 km (žingsnis: 0.5 km)
KTBF		-98,5 dBm





c) „žiedas“

d) „žiedas“ (su judriosios tarnybos tinklu)

23 pav. Skirtingos judriosios ir FS tarnybų sistemų išdėstymo konfigūracijos.

6. Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

6.1 „Starlink“ sistemos EMS su RRL

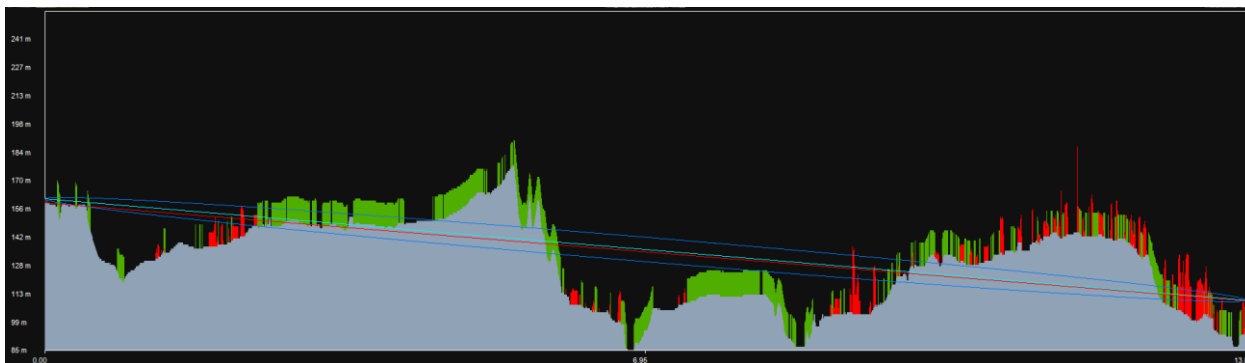
Starlink rezultatai pridedami 1 priede. Remiantis gautais rezultatais, galime teigti, kad patalpinus nustatytoje vietoje Starlink sistemos žemės stotį RRL tinklo patiriami trikdžiai nuo Starlink žemės stoties nepakenks RRL tinklo veiklai, kadangi nei vienai RRL stočiai TD parametras neviršijo 0,4 dB, skaičiuojant su pastatų sluoksniais.

24 pav. pavaizduota apsauginė geležinė tvora skirta ekranuoti Starlink žemės stoties spinduliavimą horizontalia kryptimi, taip slopinant spinduliavimą 10 dB. Atsižvelgiant į reljefą ir pastatų sluoksnį, nei viena RRL stotis nepatiria didelės interferencijos, tačiau skaičiuojant atsižvelgiant tik į reljefą, matome, kad vis dėl to būtų sukeliama trikdžiai RRL sistemai. Būtina pabrėžti, kad skaičiavimuose buvo įtrauktas geležinės tvoros slopinimas, kitu atveju net ir su reljefu ir pastatų sluoksniu RRL stoties VLNB09 TD bus lygus 1,07 dB, todėl Starlink žemės stoties ekranavimas yra būtinas. Galime teigti, kad tokiomis sąlygomis sistemos yra suderinamos, nekels trikdžių ir dėl to Starlink žemės stočiai buvo suteiktas leidimas veikti prie Vilniaus, Trakų Vokėje, tuo pačiu stoties ekranavimas užtikrina geresnes sąlygas toliau vystyti radijo relinių tinklą Vilniuje ir jo apylinkėse.

25 pav. pateikta Starlink žemės stoties profilis iki miesto centro, kur žalia spalva pažymėta miško, o raudona pastatų profilis. Matome, kad pastatų sluoksnis gali trikdyti tiesioginį matomumą.



24 Pav. Apsauginė geležinė tvora Starlink žemės stoties vietoje.



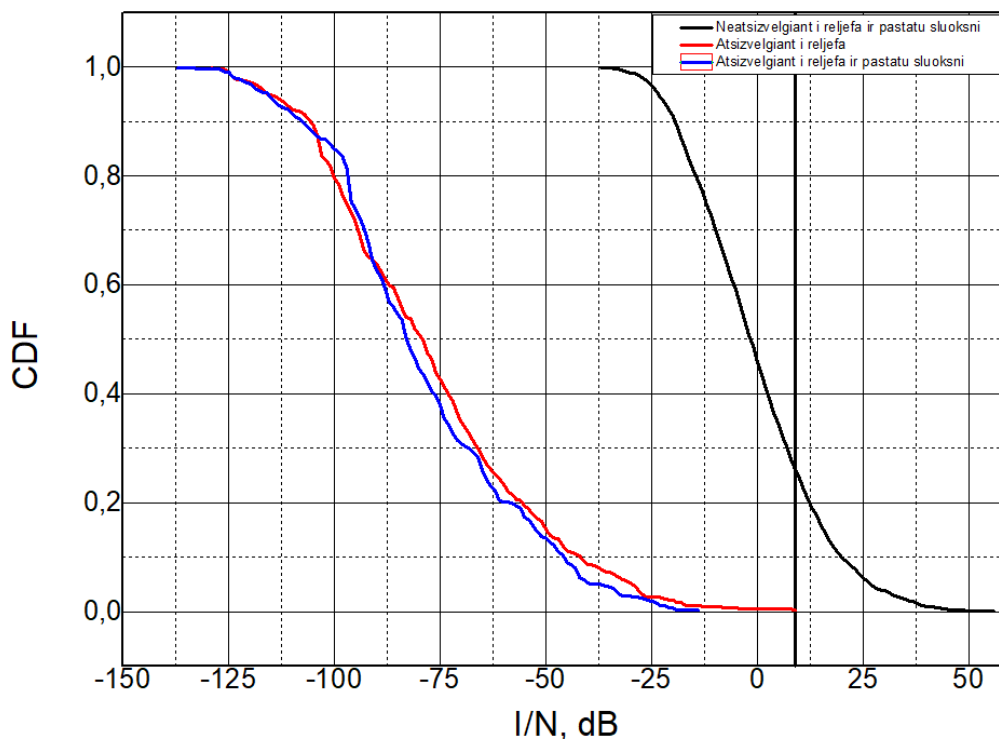
25 pav. Profilis nuo Starlink žemės stoties iki miesto centro

6.2 ESIM sistemos EMS su RRL (I)

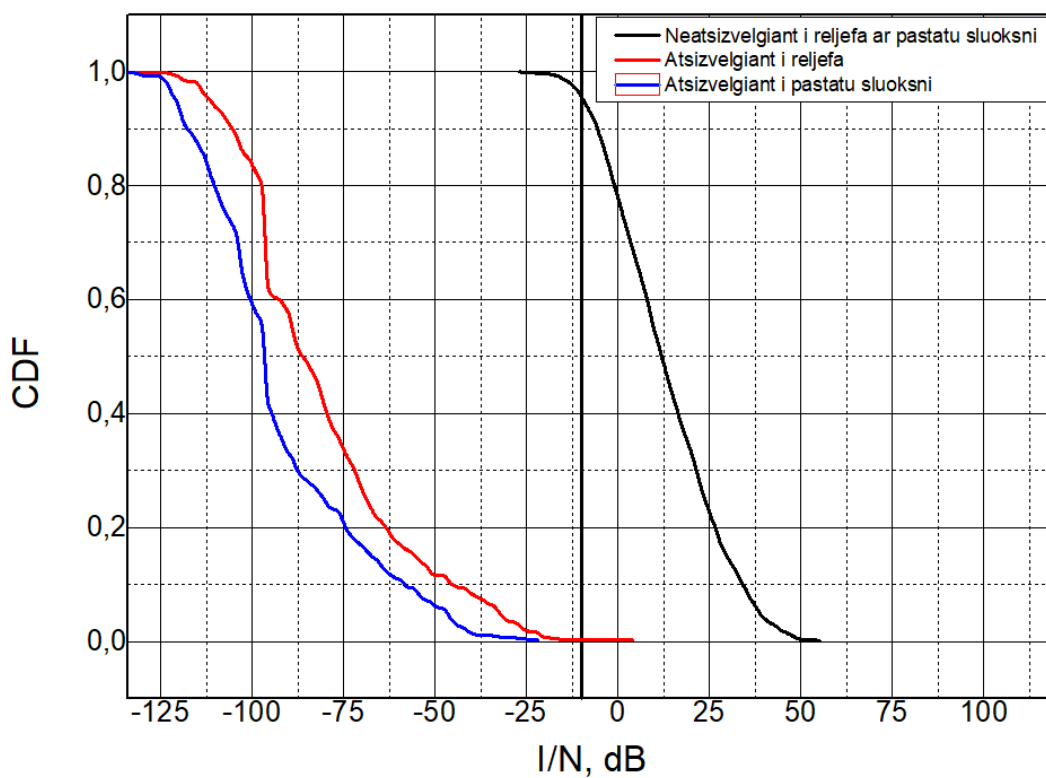
26 pav. Matome kumuliatyvią pasiskirstymo funkciją (CDF), kuri gaunama sumuojant kiekvieno įvykio keliamą interferenciją ir jos tikimybę. Pasirinkta atskaitos riba parodo kiek visų verčių viršys arba bus lygi nustatytam I/N lygiui. Kaip ir tikėtina, daugiausiai trukdžių sukels taikymas ITU rec. P 452-16, kai neįtraukiamas į skaičiavimus reljefas bei neįskaičiuojami augmenijos bei pastatų sluoksniai, kadangi radijo bangos tokiu atveju sklinda nevaržomos. Tokiu atveju ar interferencija pasireikš ar ne, priklauso nuo geografinio sistemų išsidėstymo, antenų krypties, atstumų tarp terminalų. Atsiradus kelyje reljefui ir pastatams, sklidimą varžo jau aptarti reiškiniai kaip difrakcija, atspindys, net gi blokavimas, viso signalo ar dalies Frenelio zonų.

Interferencijos tikimybė :

- taikant tik ITU R.P 452-16 modelį be sluoksnių – 26%
- Atsižvelgiant į reljefą – 2%
- Atsižvelgiant į reljefą ir pastatų sluoksnį – 0%



26 pav. Kumuliatyvioji interferencijos pasiskirstymo funkcija (CDF) trumpalaikiui interferencijos kriterijui



27 pav. Kumuliatyvioji interferencijos pasiskirstymo funkcija (CDF) ilgalaikiui interferencijos kriterijui.

27 pav. matome įvertintą interferenciją pagal ilgalaikį kriterijų. Iš rezultatų galime teigti, jog skirtumas tarp interferuojančio signalo lygio sklidimo nevaržomai ir atsižvelgiant į reljefą ir pastatų sluoksnį yra virš 50 dB. Įvertinus reljefą, be pastatų sluoksnį galima teigti, jog šios sistemos yra suderinamos šioje pasirinktoje vietovėje.

Interferencijos tikimybė :

- Taikant ITU R.P 452-16 modelį be pastatų sluoksnių – 95,61%
- Su reljefu – 0,237%
- Su reljefu ir pastatų sluoksniu – 0%

6.3 ESIM sistemos EMS su RRL (II)

Vertinant trumpalaikį kriterijų SEAMCAT programine įranga į reljefą nebuvo galima atsižvelgti, tačiau tipinis pastatų sluoksnis įvertinamas. Kaip matome iš 28 ir 29 pav., skirtumas tarp ITU-R F.699-8 ir ITU-R F.1245-3 antenų diagramų yra apie 5 dB, ITU-R F.1245-3 atsparesnė interferencijai, kas ir buvo tikėtina, kadangi ITU-R F.1245-3 diagrama yra gerokai siauresnė. Matome ir apie 30 dB skirtumą tarp scenarijaus su pastatų sluoksniais ir be. Lyginant su praeito skyriaus rezultatais, atliktais „HTZ Communication“ programine įranga, kuria jau galima įvertinti realų reljefą, galime teigti, jog ilgalaikį interferencijos kriterijus yra labiau viršijamas negu trumpalaikis. Tačiau, kaip ir minėta anksčiau, dažnai tyrimuose ESIM ilgalaikės interferencijos poveikis RRL tinklui nėra aktualus, kadangi ESIM juda ant mobilių platformų.

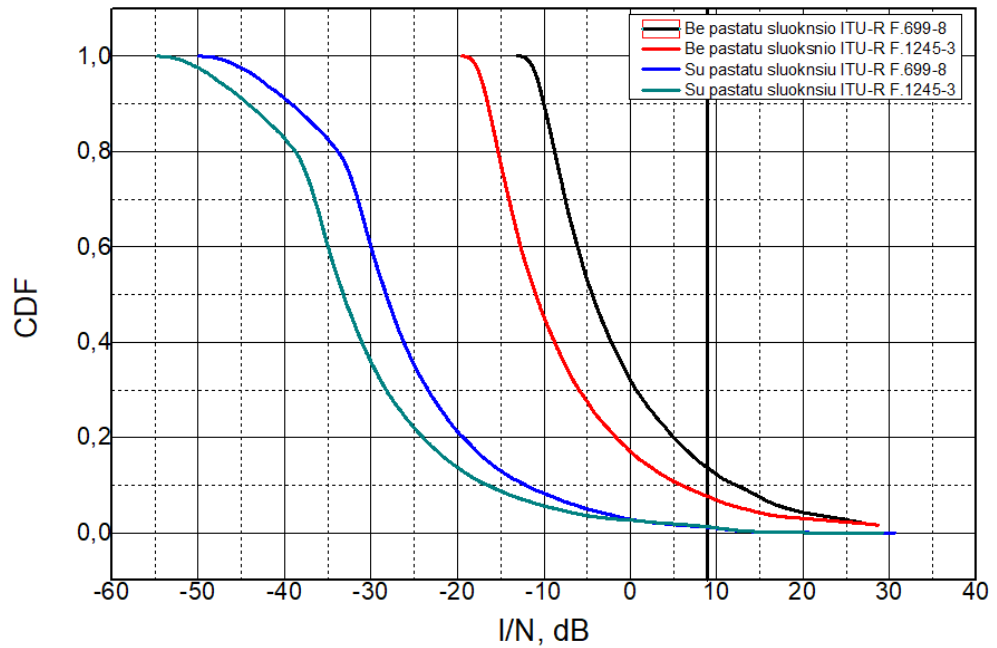
Interferencijos tikimybė trumpalaikiui kriterijui:

- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.699-8 rekomendaciją, be pastatų sluoksnio – 13,53%
- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.1245-3 rekomendaciją, be pastatų sluoksnio – 7,63%
- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.699-8 rekomendaciją, su pastatų sluoksniu – 1,15%
- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.1245-3 rekomendaciją, su pastatų sluoksniu – 1,26%

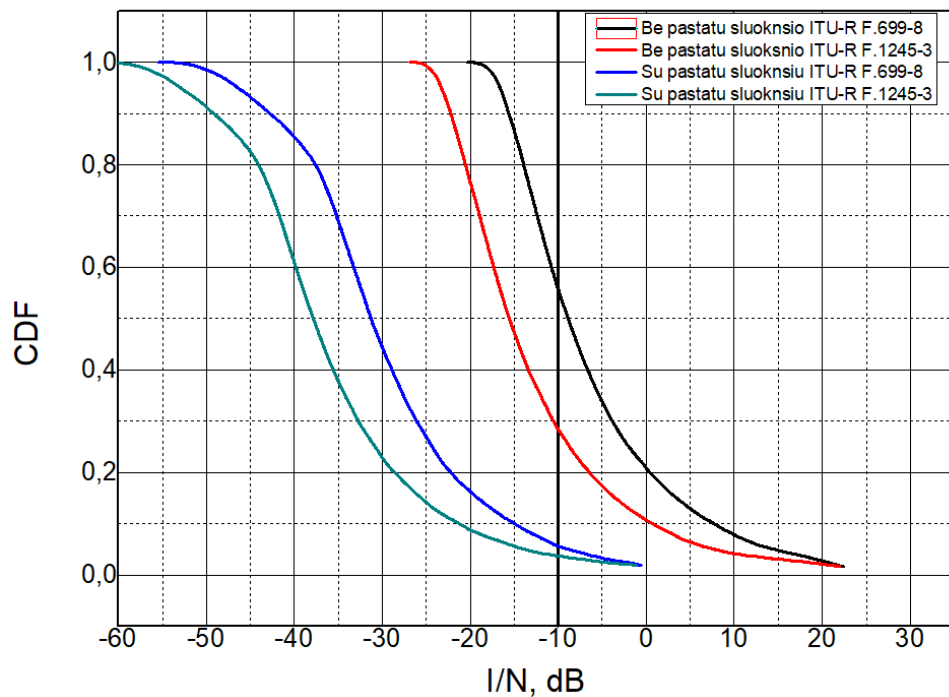
Interferencijos tikimybė trumpalaikiui kriterijui:

- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.699-8 rekomendaciją, be pastatų sluoksnio – 55,66%
- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.1245-3 rekomendaciją, be pastatų sluoksnio – 7,63%

- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.699-8 rekomendaciją, su pastatų sluoksniu – 5,6%
- Naudojant antenos diagramą pagal ITU-R F.1245-3 rekomendaciją, su pastatų sluoksniu – 3,69%



28 pav. Kumuliatyvioji interferencijos pasiskirstymo funkcija (CDF) trumpalaikiui interferencijos kriterijui $I/N = 9$ dB.



29 pav. Kumuliatyvioji interferencijos pasiskirstymo funkcija (CDF) ilgalaikiui interferencijos kriterijui $I/N = -10$ dB.

Nors kaip parodė analizė statistiškai ESIM technologija neturėtų sukelti juntamos interferencijos RRL tinklui, tačiau lieka klausimas, kaip dar geriau būtų galima įgyvendinti šių dviejų sistemą veikimą. Logiška, kad nuo seno veikianti RRL sistema neturėtų pajauti ryšio pablogėjimo, bet ar tada ESIM veikimą reikėtų licensijuoti ar koordinuoti šalies viduje? [22] tyrime atlikta analizė papildo šį darbą ištiriant kognityvios radijos (angl. *Cognitive radio*) veikimą, kada ESIM terminalas skenuoja dažnių spektrą, „klausydamasis“ ar ta pačia juosta vyksta komunikacija. Kognityvi radija šiuo atveju nebūtų praktiška, kadangi komunikuojant su GEO orbita tarp terminalų atsiranda didžiulis vėlinimas (apie 250 ms). Geras sprendimas būtų ESIM terminalui turėti duomų bazę su tiksliais koordinatėmis kiekvieno RRL imtuvo ir siųstuvo.

6.4 SDL sistemos EMS su RRL

Šio etapo tyrimo rezultatai pavaizduoti 9 ir 10 lentelėse. 9 lentelėje matome skirtingos konfigūracijos reikalingus atskyrimo atstumus tarp sistemų, skirtingiems I/N kriterijams, neviršijant 5% ribos, skaičiuojant pagal ITU-R P.1546 ir ITU-R P.2001 rekomendacijas. Kaip ir minėta anksčiau ITU-R P.1546 modeliu gauname didesnę radijo bangos slopinimą, todėl atstumas tarp sistemų galimas mažesnis.

10 lentelėje matome palyginimą tuo pačiu atstumu judriosios tarnybos tinklo ir vienos BS sektoriaus signalo lygis 3 m. aukštyje nuo žemės duotam atstumui. Suminis tinklo lauko efektas stiprina interferuojantį signalą nuo 6,4 iki 9,7 dB, esant 19 BS, tačiau gali siekti 20 dB įskaitant 57 BS. Būtina paminėti, kaip jau aptarta ankstesniame skyriuje, ITU-R P.1546 rekomendacija slopinimą skaičiuoja ne simetriškai ir priklauso nuo imtuvo aukščio, TRRL terminalų aukščiai buvo varijuojami nuo 10 iki 25 m., o signalas fiksuojamas 3 m. aukštyje (tai yra labai įprasta praktika pasirašant dvišalius susitarimus tarp valstybių, nustatyti signalų lygius 3 m. aukščiui), ITU-R P.2001 rekomendacija gauname daug didesnius signalo lygius.

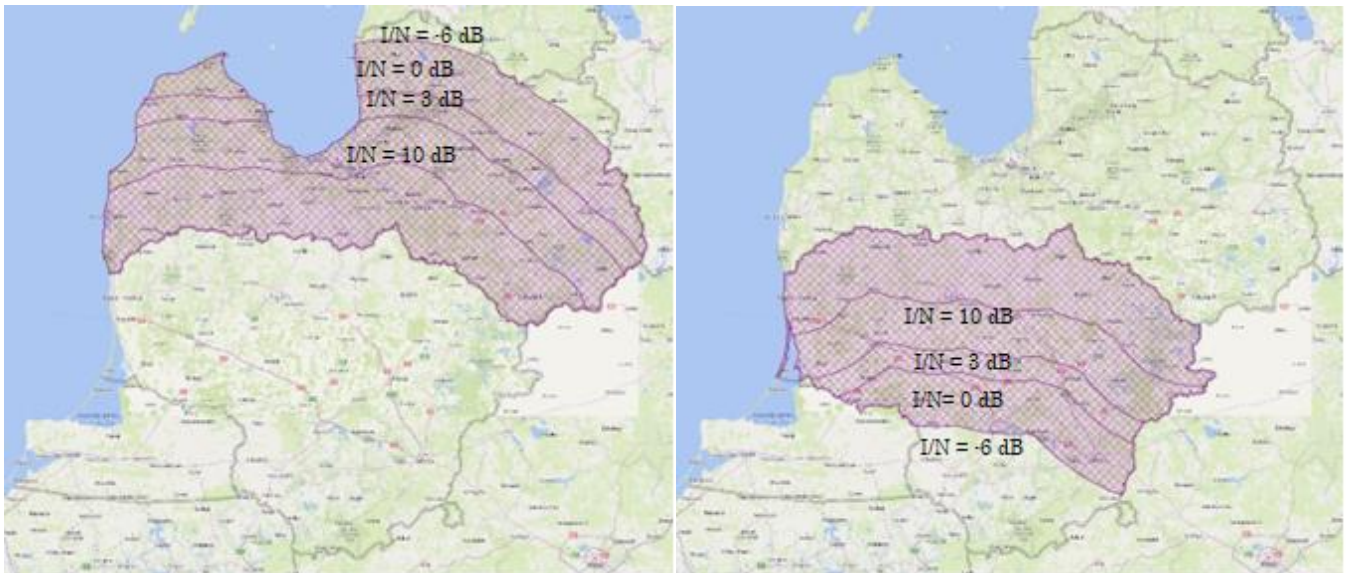
Pagal pateiktus rezultatus, galima pasakyti, kad sistemos praktiškai yra nesuderinamos. 30 paveikslėlyje pavaizduoti atskyrimo atstumai pagal labiau optimistinę ITU-R P.1546 rekomendaciją, kiekviena linija atitinka tam tikra I/N santyki, artimiausia Lietuvos-Latvijos sienos atitinka 10 dB, tolimiausia -6 dB. Matome, kad pagal griežčiausią kriterijų -6 dB, Latvijoje nebūtų įmanoma vystyti nei SDL nei TRRL sistemų. Vienas iš sprendimų būtų koordinavimas, kadangi priklausomai nuo sistemų išsidėstymo viena kitai atžvilgiu, atskirties atstumą galime sumažinti iki 37 km. Tačiau žinant, kad TRRL yra karinės tarnybos ir sistemos geografinės koordinatės negali būti prieinamos dėl saugumo sumetimų, nėra galimybės koordinuoti.

9 lentelė. Atskyrimo atstumai ir interferencijos tikimybė, skirtingiems I/N kriterijams pagal ITU-R P.1546 ir ITU-R P.2001 rekomendacijas esant skirtingoms sistemų išdėstymo konfigūracijoms.

Interferencinis signalas krinta į RRL	ITU-R P.1546			ITU-R P.2001		
	I/N	Tikimybė, %	Atstumas, km	I/N	Tikimybė, %	Atstumas, km
Statmenai	-6	4,89	37	-6	4,54	65,75
	0	4,36	28,5	0	5,09	60
	3	5,17	24,5	3	4,27	57,5
	10	4,81	17,5	10	4,82	50,5
Tiesiai	-6	4,8	174	-6	4,8	182
	0	4,9	128	0	4,81	136,25
	3	4,8	108	3	4,69	115,5
	10	4,6	74	10	4,1	81
Žiedas	-6	4,9	67	-6	4,9	80
	0	5,02	50	0	4,8	71
	3	4,9608	44	3	4,8	67
	10	4,9594	32	10	4,76	59
Žiedas (tinklas)	-6	4,86	165	-6	4,86	198
	0	4,75	120	0	4,4	160
	3	4,53	100	3	4,8	137
	10	4,62	60	10	4,93	85

10 lentelė. Atskyrimo atstumai ir atitinkamas laukas 3 m. aukštyje, skirtingiems I/N kriterijams pagal ITU-R P.1546 ir ITU-R P.2001 rekomendacijas, „Žiedo“ konfigūracijos atveju, esant vienam BS sektoriui ir tinklui.

Rekomendacija	BS stoties sektoriaus signalo lygis 3m. aukštyje nuo žemės, dBm/20 MHz	BS tinklo signalo lygis 3m. aukštyje nuo žemės, dBm/20 MHz	Atstumas, km	Kumuliatyvinis efektas, dB
ITU-R P.1546	-145,31	-135,77	165	9,54
	-139,49	-130,1	120	9,39
	-136,18	-127,39	100	8,79
	-126,26	-119,88	60	6,38
ITU-R P.2001	-128,29	-118,56	198	9,73
	-122,84	-113,35	155	9,49
	-120,34	-111,04	137	9,3
	-112,22	-103,7	85	8,52



a)Latvijoje

b)Lietuvoje

30 pav. Atskirties atstumai pagal ITU-R P.1546 rekomendacija vertinant tinklo įtaką a) Latvijoje ir b) Lietuvoje

Būtina atkreipti dėmesį į sistemų patikimumą. Pravartu yra įvertinti ir saugomos sistemos signalo lygį. Pagal 11 lentelės parametrus, buvo paskaičiuotas ryšio balansas RRL sistemai pagal pateiktus parametrus. Tam skaičiuojame atsargą užmirimams, kas yra apibrėžiama kaip imtuvo jautrumo (triukšmų slenksčio) ir priimamo signalo santykis. Kaip matome, atsarga užmirimams yra apie 56 dB skaičiuojant pagal ITU-R P.2001 rekomendaciją ir 23 dB pagal ITU-R P.1546 rekomendaciją. 12 lentelėje pateiktas patikimumas priklausomai nuo atsargos užmirimams. Galime teigti, kad, skaičiuojant pagal ITU-R P.2001 rekomendaciją, jei sistema naudotų visą galią, tai ji veiktų su patikimumu virš 99,999% laiko visus metus, tuo tarpu pagal ITU-R P.1546 modelį tik kiek daugiau nei 99%. Skaičiuojant elektromagnetinį suderinamumą pagal ITU-R P. 1546 rekomendaciją gauname nepakankamą patikimumą radijo ryšiui, taigi turime visą EMS skaičiuoti vadovaudamiesi ITU-R P.2001 modeliu, pagal kurį vis dėl to atskirties atstumas tarp sistemų yra didesnis.

11 lentelė RRL ryšio balanso parametrai

TRRL parametrai skaičiuojant ryšio balansą	
Siųstuvo galia	33 dBm
Siųstuvo stiprinimas	26 dBi
EIRP	59 dBm/7 MHz
Imtuvo stiprinimas	26 dBi
Antenų nuostoliai	0 dB
Kiti nuostoliai	10 dB
Atstumas tarp imtuvo ir siųstuvo	8 km
Siųstuvo ir imtuvo aukštis	10 m

Dažnis	1450 MHz
Imtuvo triukšmų slenkstis	-98,5 dBm
Imtuvo priimamas signalas (10 m. aukštyje)	-44,22 dBm (Rek. ITU-R P.2001)
	-74,86 dBm (Rek. ITU-R P.1546)
Atsarga užmirimams	≈ 56 dB (Rek. ITU-R P.2001)
	≈ 23 dB (Rek. ITU-R P.1546)

12 lentelė. Patikimumas pagal skirtingus atsargą užmirimams.

Atsarga užmirimams	Patikimumas
18 dB	99%
28 dB	99,9%
38 dB	99,99%
48 dB	99,999%

7. Išvados

- Nustatytos sąlygos, kuriomis esant pasiekiamas elektromagnetinis suderinamumas palydovinės žemės stoties Starlink, išdėstytos šalia Vilniaus, ir veikiančios tais pačiais radijo dažniais su Vilniuje ir jo apylinkėse veikiančiomis radijo relinėmis linijomis. „Starlink“ žemės stoties ekranavimas yra būtinas, kitaip RRL stočiai VLNB09 sukeliama trikdžiai būtų jau nepriimtini, tuo pačiu „Starlink“ stoties ekranavimas užtikrina geresnes sąlygas toliau vystyti radijo relinių tinklą Vilniuje ir jo apylinkėse
- Atlikta elektromagnetinio suderinamumo analizė tarp ESIM ir radijo relinių linijų tinklo, su realiai veikiančiomis stotimis Vilniaus mieste, bei statistinė analizė "Seamcat" programine įranga. Parodyta, kad įvertinus reljefą, augmenijos bei pastatų sluoksnius ESIM nesukels nepriimtinių trikdžių Vilniuje veikiančioms RRL.
- Nustatyta, jog judriosios tarnybos IMT SDL BS, veikiančios 1,5 GHz radijo dažnių diapazone yra nesuderinamos su TRRL tinklu. Esant griežtam apsaugos kriterijui neįmanoma šių skirtingų technologijų vystyti besiribojančiuose Baltijos šalyse ir kitose panašaus dydžio valstybėse.
- Nustatyta, kad kumuliatyvinis efektas – signalo lygis lyginant vieną IMT BS celę ir visą tinklą yra apie 9 dB (19 BS), 20 dB(57 BS).

9. Literatūra

[1] WRC-19 Rezoliucija 169 (2019)

https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0C/0A/R0C0A00000F0056PDFE.pdf

[2] ECC sprendimas 18(04) „*The harmonised use, exemption from individual licensing and free circulation and use of land based Earth Stations In-Motion (ESIM) operating with GSO FSS satellite systems in the frequency bands 10.7-12.75 GHz and 14.0- 14.5 GHz*” 2018-07-06

[3] Ericsson Mobility Report (11/2021) <https://www.ericsson.com/4ad7e9/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2021/ericsson-mobility-report-november-2021.pdf> (Žiūrėta 2022-05-21)

[4] Recommendation ITU-R P.676-12 (08/2019) „*Attenuation by atmospheric gases and related effects*“

[5] Ch. Lee, S. Park “*Diffraction Loss Prediction of Multiple Edges Using Bullington Method with Neural Network in Mountainous Areas*” Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791.

[6] M. Žilinskas „*Taikomoji elektrodinamika*“. 2008

[7] Recommendation ITU-R P.1546-6 (08/2019) “*Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz*”

[8] Recommendation ITU-R P.452-17 (09/2021) “*Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*”

[9] Recommendation ITU-R P.2001-4 (09/2021) “*A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz*”

[10] O. B. Osoro ir E. J. Oughton, "A Techno-Economic Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 141611-141625, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119634.

[11] Report ITU-R F.2323-0 (11/2014) “*Fixed service use and future trends*”

[12] ECC raportas 173 „*Fixed Service in Europe Current use and future trends post 2016*” Papildyta 2018-04-27.

[13] WRC-15 Rezoliucija 158 (2015) https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000C0005PDFE.pdf (Žiūrėta 2022-05-21)

[14] Recommendation ITU-R S.580-6 (07/2015), „*Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites*“.

- [15]APEREC015V1 antenna pattern, ITU-R, 2018-11-22. https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Documents/ant-pattern/APL_DOC_BY_PATTERN_NAME/APEREC015V01.pdf (Žiūrėta 2022-05-21)
- [16] WRC-19 Rezoliucija 223 (2019) https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0C/0A/R0C0A00000F0073PDFE.pdf (Žiūrėta 2022-05-21)
- [17] K. Ariansyah, "The benefit of allocating 1.4 GHz band for supplemental downlink (SDL) in Indonesia from the viewpoint of mobile network operator," 2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 2017, pp. 138-143, doi:10.1109/ICWT.2017.8284155.
- [18] GSMA raportas "Global momentum and economic impact of the 1.4/1.5 GHz band for IMT" 2015 spalio. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2015/10/1-4-1-5GHz-L-band-for-IMT-OCTOBER-2015.pdf> (Žiūrėta 2022-05-21)
- [19] C. Haslett, „Essentials of Radio Wave Propagation, Cambridge“ University Press, 2008.
- [20]Recommendation ITU-R F.699-8 (01/2018) „Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to 86 GHz“.
- [21] Recommendation ITU-R F.1245-3 (01/2019) „Mathematical model of average and related radiation patterns for point-to-point fixed wireless system antennas for use in interference assessment in the frequency range from 1 GHz to 86 GHz“
- [22] Høyhty, Marko & Kyrolainen, Jukka & Hulkkonen, Ari & Ylitalo, Juha & Roivainen, Antti. (2012). „Application of cognitive radio techniques to satellite communication.“ 540-551. 10.1109/DYSPAN.2012.6478178.

10. Santrauka

Didėjant vis daugiau įrenginių, kuriems reikia prieigos prie tinklo, užduotis yra tinkamai ir efektyviai panaudoti ribotą radijo ryšio spektrą. Tai galima įgyvendinti leidžiant ta pačia dažnių juosta naudotis kelioms ryšio sistemoms, tačiau tam reikalinga elektromagnetinio suderinamumo analizė. Šiame darbe apžvelgtos fiksuotos tarnybos, Starlink, ESIM, judriosios tarnybos 1,5 GHz juostoje sistemos Lietuvoje.

Starlink žemės stoties trikdžiai veikiančiomis FS stotims toleruojami TD neviršijus 0,4 dB. Skaičiavimai buvo atliekami ITU-R P.452 rekomendacija 20 % laiko, atsižvelgiant į reljefą, pastatų sluoksnį, bei ekranavimą. Nustatyta, jog trikdžiai nebus keliami esančioms RRL stotimis, todėl buvo išduotas leidimas Starlink žemės stočiai veikti Lietuvoje.

ESIM terminalų trikdžiai RRL sistemoms skaičiuoti dvejopai, konkretus Vilniaus miesto scenarijus ir statistinė analizė SEAMCAT programine įranga. Abidvi analizės atliekamos Monte-Carlo metodu, iteruojant 100000 kartų, vertinant ilgalaikį ir trumpalaikį interferencijos kriterijų. Bangų sklidimo modeliui pasirinkta ITU-R P.452 rekomendacija 20 % ir 0,001 % laiko. Analizėje atsižvelgta į reljefo, pastatų sluoksnio, skirtingų antenų įtaką. Kaip ir tikėtina, analizė parodė mažiausią interferenciją RRL sistemoms skaičiuojant konkrečiu Vilniaus miesto scenarijumi atsižvelgiant į reljefą ir pastatų sluoksnį.

Atliekant elektromagnetinio suderinamumo analizę tarp TRRL ir judriosios tarnybos sistema buvo taip pat pasitelkta Monte-Carlo metodu, skaičiavimai atliekami SEAMCAT programine įranga. Pasirinkti du radijo bangų sklidimo modeliai: ITU-R P.2001 ir ITU-R P.1546 rekomendacijos, pasirenkant 10% laiko tikimybę. Analizėje nagrinėjama vienos judriosios tarnybos BS celės ir viso tinklo sukelti trikdžiai TRRL tinklui skirtingiems išdėstymo konfigūracijomis, analizė parodė, kad kumuliatyvinis efektas yra apie 9 dB. Nustatyta, kad sistemos yra nesuderinamos, kadangi atskirties atstumai tarp sistemų yra labai dideli. Palyginimui, paskaičiuotas ryšio balansas ir TRRL sistemos patikimumas.

11. Summary

As number of devices, that need network access, increases one of the main challenges is to designate and use spectrum as efficiently as possible. One approach is to allow multiple systems to share their designated radio frequency spectrum. However, in order to ensure both systems work reliably, an electromagnetic compatibility analysis is needed. In this work fixed service, Starlink, ESIM, mobile service in the 1.5 GHz band.

Tolerated threshold degradation for FS links is 0.4 dB. Starlink earth stations' caused interference was calculated using rec. ITU-R P.452, time percentage probability set to 20 % and taking into account earth surface topography and clutter of Vilnius city and screening of Starlink earth station. Analysis determined that no harmful interference is present to RRL systems, therefore license for Starlink earth station operations was granted.

The compatibility analysis of ESIM interference to RRL systems were conducted in two parts, real Vilnius city and statistical using SEAMCAT software. Both analyses conducted using Monte-Carlo method, iterating 100000 times, evaluating both short-term and long-term interference criteria. Rec. ITU-R P.452 with 20 % and 0.001 % time probabilities was used as model for radio wave propagation. Effects of topography, clutter, different antennas were considered. As expected, taking into account topography and clutter probability of interference to RRL links are lowest.

Compatibility analysis of TRRL and mobile service systems was conducted using Monte-Carlo method, using SEAMCAT software. For comparison, rec. ITU-R P.2001 and ITU-R P.1546 with 10% time probability were used. In this analysis, different layouts of single IMT cell and IMT network were tested and it was determined that cumulative effect of network is around 9 dB. Both systems are incompatible with each other as shown in this work. For reference, fade margin and reliability of TRRL systems were calculated.

12. Priedas

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interfe- rencija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- mutas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
0°	S025,2	-107,5	0,33	-141,10	0	-131,10	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-118,3	0,03	-153,14	0	-143,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-126,7	0	-126,69	0	-116,69	0,04	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-124,3	0,04	-159,42	0	-149,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	VL230	-125,1	0	-125,15	0	-115,15	0,01	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNA19	-132,4	0	-132,42	0	-122,42	0,01	-96,5	1542 7,01	174,3	28,1225	28
	VLND42	-130,3	0,01	-180,71	0	-170,71	0,00	-103,5	1195 5,09	241	28,4165	56
	VLND36	-132,1	0,01	-132,07	0,01	-122,07	0,06	-103,5	1518 1,48	164,6	28,3605	56
	VLN025	-133,0	0	-168,15	0	-158,15	0,00	-103,5	1616 8,46	239	28,2485	56
	VLNA19	-136,4	0	-136,44	0	-126,44	0,00	-96,5	1542 7,01	174,3	28,1225	28
5°	S025,2	-106,4	0,42	-140,06	0	-130,06	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-117,2	0,04	-152,10	0	-142,10	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-125,7	0,01	-125,66	0,01	-115,66	0,05	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-124,1	0	-124,13	0	-114,13	0,01	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNB09	-124,3	0,04	-159,42	0	-149,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	VLNA19	-131,4	0	-131,37	0	-121,37	0,01	-96,5	1542 7,01	174,3	28,1225	28
	VLND42	-129,3	0,01	-179,76	0	-169,76	0,00	-103,5	1195 5,09	241	28,4165	56
	VLND36	-131,0	0,01	-131,04	0,01	-121,04	0,08	-103,5	1518 1,48	164,6	28,3605	56
	VLN025	-132,0	0,01	-167,12	0	-157,12	0,00	-103,5	1616 8,46	239	28,2485	56
	VLNA19	-135,4	0	-135,39	0	-125,39	0,01	-96,5	1542 7,01	174,3	28,1225	28

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
10°	S025,2	-105,4	0,53	-139,01	0	-129,01	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-116,2	0,05	-151,05	0	-141,05	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-124,6	0,01	-124,60	0,01	-114,60	0,07	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-123,2	0	-123,22	0	-113,22	0,01	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNBO9	-124,3	0,04	-159,42	0	-149,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
15°	S025,2	-104,4	0,66	-137,98	0	-127,98	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-115,2	0,06	-150,03	0	-140,03	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-123,5	0,01	-123,55	0,01	-113,55	0,09	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNBO9	-124,3	0,04	-159,42	0	-149,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
17°	S025,2	-104,0	0,72	-137,59	0	-127,59	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,8	0,06	-149,65	0	-139,65	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-123,1	0,01	-123,15	0,01	-113,15	0,09	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNBO9	-124,3	0,04	-159,42	0	-149,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
19°	S025,2	-103,6	0,78	-137,22	0	-127,22	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,4	0,07	-149,29	0	-139,29	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-122,8	0,01	-122,77	0,01	-112,77	0,10	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNBO9	-124,1	0,04	-159,28	0	-149,28	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
21°	S025,2	-103,3	0,84	-136,87	0	-126,87	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,1	0,08	-148,96	0	-138,96	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
	S041,2	-122,4	0,01	-122,40	0,01	-112,40	0,11	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNB09	-123,8	0,04	-158,90	0	-148,90	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
22°	S025,2	-103,1	0,86	-136,71	0	-126,71	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,0	0,08	-148,81	0	-138,81	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-122,2	0,01	-122,23	0,01	-112,23	0,12	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNB09	-123,6	0,04	-158,71	0	-148,71	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
23°	S025,2	-103,0	0,89	-136,56	0	-126,56	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,67	0	-138,67	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-122,1	0,01	-122,07	0,01	-112,07	0,12	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNB09	-123,4	0,04	-158,51	0	-148,51	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
24°	S025,2	-102,8	0,92	-136,42	0	-126,42	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,9	0,01	-121,91	0,01	-111,91	0,12	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56
	VLNB09	-123,2	0,05	-158,32	0	-148,32	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
25°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,8	0,01	-121,77	0,01	-111,77	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VL230	-122,8	0	-122,79	0	-112,79	0,02	-88,5	6525 ,67	150,7	27,8565	56

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
	VLNB09	-123,0	0,05	-158,12	0	-148,12	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
26°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-122,8	0,05	-157,92	0	-147,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
28°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-122,4	0,06	-157,51	0	-147,51	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
30°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-121,9	0,06	-157,10	0	-147,10	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
32°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-121,5	0,07	-156,68	0	-146,68	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
34°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-121,1	0,07	-156,26	0	-146,26	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56

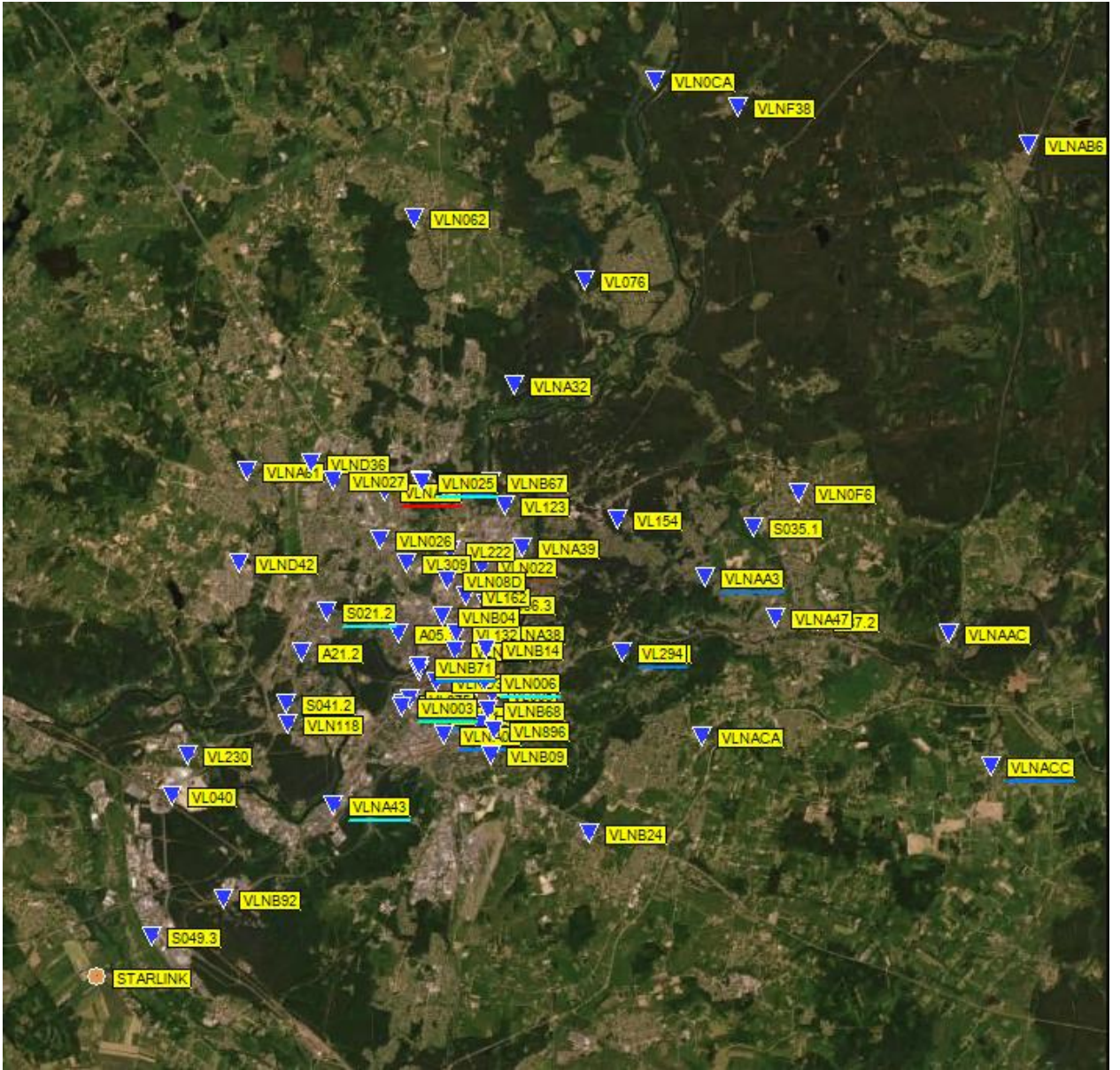
Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- mutas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
36°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-120,7	0,08	-155,84	0	-145,84	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
38°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-120,3	0,09	-155,42	0	-145,42	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
40°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,8	0,08	-148,64	0	-138,64	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-119,9	0,1	-155,00	0	-145,00	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
42°	S025,2	-102,8	0,92	-136,40	0	-126,40	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-113,9	0,08	-148,75	0	-138,75	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,71	0,01	-111,71	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-119,4	0,11	-154,60	0	-144,60	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
44°	S025,2	-103,1	0,87	-136,66	0	-126,66	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,2	0,07	-149,06	0	-139,06	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	S041,2	-121,7	0,01	-121,75	0,01	-111,75	0,13	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
	VLNB09	-119,1	0,12	-154,20	0	-144,20	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
46°	S025,2	-103,4	0,82	-136,99	0	-126,99	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
	S021,2	-114,5	0,07	-149,39	0	-139,39	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,7	0,13	-119,04	0	-109,04	1,07	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-122,0	0,01	-156,84	0,01	-146,84	0,00	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
48°	S025,2	-103,7	0,76	-137,34	0	-127,34	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-114,9	0,06	-149,76	0	-139,76	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,3	0,14	-153,48	0	-143,48	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-122,4	0,01	-122,38	0,01	-112,38	0,11	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
50°	S025,2	-104,1	0,7	-137,72	0	-127,72	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-115,3	0,06	-150,15	0	-140,15	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,0	0,15	-153,16	0	-143,16	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-122,7	0,01	-122,75	0,01	-112,75	0,10	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
52°	S025,2	-104,5	0,64	-138,11	0	-128,11	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-115,7	0,05	-150,55	0	-140,55	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-123,1	0,01	-123,13	0,01	-113,13	0,09	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
54°	S025,2	-104,9	0,59	-138,52	0	-128,52	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-116,1	0,05	-150,96	0	-140,96	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-123,5	0,01	-123,54	0,01	-113,54	0,09	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
56°	S025,2	-105,3	0,54	-138,94	0	-128,94	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-116,5	0,04	-151,38	0	-141,38	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
	S041,2	-123,9	0,01	-123,95	0,01	-113,95	0,08	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
58°	S025,2	-105,7	0,49	-139,36	0	-129,36	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-117,0	0,04	-151,81	0	-141,81	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-124,4	0,01	-124,37	0,01	-114,37	0,07	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
60°	S025,2	-106,2	0,45	-139,78	0	-129,78	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-117,4	0,04	-152,23	0	-142,23	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-124,8	0,01	-124,79	0,01	-114,79	0,06	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
62°	S025,2	-106,6	0,41	-140,20	0	-130,20	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-117,8	0,03	-152,65	0	-142,65	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-125,2	0,01	-125,22	0,01	-115,22	0,06	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
64°	S025,2	-107,0	0,37	-140,62	0	-130,62	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-118,2	0,03	-153,06	0	-143,06	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-125,6	0,01	-125,64	0,01	-115,64	0,05	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
66°	S025,2	-107,4	0,34	-141,03	0	-131,03	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-118,6	0,03	-153,47	0	-143,47	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-126,0	0	-126,05	0,01	-116,05	0,05	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- muntas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
68°	S025,2	-107,8	0,31	-141,44	0	-131,44	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-119,0	0,02	-153,88	0	-143,88	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,92	0	-142,92	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-126,5	0	-126,47	0,01	-116,47	0,04	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
70°	S025,2	-108,2	0,28	-141,84	0	-131,84	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-119,4	0,02	-154,27	0	-144,27	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-117,8	0,16	-152,99	0	-142,99	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-126,9	0	-126,87	0	-116,87	0,04	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
72°	S025,2	-108,6	0,26	-142,23	0	-132,23	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-119,8	0,02	-154,66	0	-144,66	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,1	0,15	-153,29	0	-143,29	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-127,3	0	-127,27	0	-117,27	0,04	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
74°	S025,2	-109,0	0,24	-142,62	0	-132,62	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-120,2	0,02	-155,04	0	-145,04	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,5	0,14	-153,62	0	-143,62	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-127,7	0	-127,66	0	-117,66	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
76°	S025,2	-109,3	0,22	-142,90	0	-132,90	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-120,3	0,02	-155,14	0	-145,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-118,8	0,13	-153,98	0	-143,98	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-128,0	0	-128,04	0	-118,04	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
80°	S025,2	-109,3	0,22	-142,90	0	-132,90	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28

Azimu- tas (Star- link)	stoties ID	Interferen- cija, dBm (be pastatų sluoksniu)	TD (be pas- tatų sluoks- nio)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu)	TD (su pas- tatų sluoks- niu)	Interfe- rencija, dBm (su pastatų sluoksniu, be ekra- navimo)	TD (su pas- tatų sluoks- niu, be ekra- navimo)	KTBF (dBm)	atstu- mas, m	RRL azi- mutas, deg,	Rx dažnis, GHz	Rx juos- tos plo- tis, MHz
	S021,2	-120,3	0,02	-155,14	0	-145,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-119,6	0,11	-154,76	0	-144,76	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-128,2	0	-128,21	0	-118,21	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
85°	S025,2	-109,3	0,22	-142,90	0	-132,90	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-120,3	0,02	-155,14	0	-145,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-120,6	0,08	-155,80	0	-145,80	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-128,2	0	-128,21	0	-118,21	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
90°	S025,2	-109,3	0,22	-142,90	0	-132,90	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-120,3	0,02	-155,14	0	-145,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-121,7	0,07	-156,85	0	-146,85	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-128,2	0	-128,21	0	-118,21	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28
100°	S025,2	-109,3	0,22	-142,90	0	-132,90	0,00	-96,5	1617 4,15	215,6	28,1785	28
	S021,2	-120,3	0,02	-155,14	0	-145,14	0,00	-96,5	1177 7,86	200,9	28,1225	28
	VLNB09	-123,7	0,04	-158,87	0	-148,87	0,00	-103,5	1234 8,03	238,7	28,1365	56
	S041,2	-128,2	0	-128,21	0	-118,21	0,03	-96,5	9069 ,33	193,5	28,1225	28



31 Pav. RRL stotys Vilniuje.