

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TAIKOMOSIOS ELEKTRODINAMIKOS IR TELEKOMUNIKACIJŲ INSTITUTAS**

Kotryna Tamulynaitė

**PENKTOS KARTOS JUDRIOJO RADIJO RYŠIO EUROPOS SĄJUNGOS PIRMENYBINIUOSE
RADIJO DAŽNIUOSE ĮGYVENDINIMO LIETUVOJE ANALIZĖ**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – TELEKOMUNIKACIJŲ FIZIKOS IR ELEKTRONIKOS)

Studentė

Kotryna Tamulynaitė

Darbo vadovas

dr. Mindaugas Žilinskas

Recenzentas

doc. dr. Kęstutis Svirskas

Instituto direktorius

prof. Jonas Matukas

Vilnius 2020

Turinys

Sutrumpinimai	2
Įvadas	3
1 Literatūros apžvalga	4
1.1 Radijo dažnių spektro reguliavimas ir dažnių skyrimas	4
1.2 5G - revoliuciją žadanti technologija ir laukiantys iššūkiai	7
1.2.1 5G prioritetiniai dažniai Europos Sąjungoje	7
1.2.2 5G architektūra	9
1.2.3 Masyvusis MIMO	11
1.3 Radijo bangų sklidimas	13
1.3.1 Bangų sklidimo mechanizmai	13
1.3.2 Tiesioginio matomumo kanalas	14
1.3.3 Signalo triukšmo santykis skaitmeninėse ryšių sistemose	16
1.3.4 Trukdžių tarp judriosios bei Žemės stočių skaičiavimas	17
1.3.5 Interferencijos rūšys	18
1.3.6 Lauko stiprumas ir PFD	19
1.4 Radijo bangų sklidimo modeliai	19
1.4.1 ITU-R rekomendacija P.1546	20
1.4.2 ITU-R rekomendacija P.452	22
1.4.3 ITU-R rekomendacija P.1812	24
1.4.4 ITU-R rekomendacija P.2001	26
1.4.5 Standartinio nuokrypio ir vidutinės paklaidos reikšmė, renkantis modelį	28
2 Tyrimo metodika	29
2.1 Situacija 700 MHz radijo dažnių juostoje	29
2.2 Situacija 3500 MHz radijo dažnių juostoje	34
2.3 Situacija 26 GHz radijo dažnių juostoje	36
3 Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas	39
3.1 Rezultatai 700 MHz juostoje	39
3.2 Rezultatai 3500 MHz juostoje	46
3.3 Rezultatai 26 GHz juostoje	61
Išvados	66
Literatūra	67
Santrauka	70
Summary	72

Sutrumpinimai

3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) - trečiosios kartos partnerystės projektas

4G (*Fourth Generation*) - ketvirtoji judriojo ryšio karta

5G (*Fifth Generation*) - penktoji judriojo ryšio karta

AAS (*Advanced antenna system*) - aktyviosios antenos sistema

CDMA (*Code-division multiple access*) - kodinis prieigos tankinimas

CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) - Europos pašto ir telekomunikacijų administracijų konferencija

CERP (*The European Committee for Postal Regulation*) - Europos pašto reguliavimo komitetas

CP-OFDM (*Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) - ortogonali dažninių radijo kanalų dalijimo technologija

ECC (*Electronic Communications Committee*) - Europos elektroninių ryšių komitetas

EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) – ekvivalentinė izotropinės spinduliuotės galia

FDD (*Frequency Division Duplex*) – dažninis dvipusis atskyrimas

FSS (*Fixed-Satellite Service*) - fiksuotas palydovinis ryšys

GHz (*Gigahertz*) - gigahercas

IMT (*International Mobile Telecommunications*) – tarptautinis judrusis radijo ryšys

ITU (*The International Telecommunication Union*) - Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga

LTE (*Long Term Evolution*) - spartaus duomenų perdavimo sistema

MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) - daugybinis įėjimas, daugybinis išėjimas

NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) - neortogonalus dažninių radijo kanalų prieigos tankinimas

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) - ortogonali dažninių radijo kanalų dalijimo technologija

PFD (*Power Flux Density*) - prieigos tinklo radijo ryšio stoties sukuriamas elektromagnetinio lauko galios srauto tankis

RRT - Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnyba

QAM (*Quadrature amplitude modulation*) - kvadratūrinė amplitudinė moduliacija

TB (*Terabyte*) - terabaitas

WAP (*Wireless Application Protocol*) - atviras tarptautinis standartas sistemoms, kurios naudoja be-laidį ryšį

Įvadas

Neprabėgus nei dešimtmečiui po to, kai Lietuvos rinkoje startavo ketvirtosios kartos ryšys, telekomunikacijų industrija ruošiasi penktosios kartos standartui. Tokį spartų vystymąsi lėmė augantis daiktų interneto poreikis verslui bei pramonei, sėkmingi bandymai su savaeigiais automobiliais, dronai, dauguma žmonių naudoja išmaniuosius įrenginius ir jau priprato nevaržomai dalyvauti vaizdo konferencijose, dalintis nuotraukomis, žaisti aukštos raiškos žaidimus. Suvartojamas duomenų kiekis kasmet auga ir bazinės stotys, ypač tankiai apgyvendintuose miestuose, dirba su didele apkrova. Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnybos duomenimis, 2019 metų IV ketvirtį išsiųstų ir priimtų duomenų kiekis siekė 138 219 TB (iš kurių net 130 293 TB duomenų naudojant 4G), palyginimui, prieš metus buvo 92 115 TB. Taigi, turime net 50% didesnę suvartotą duomenų kiekį [1]. Jei tokios tendencijos išliks, 4G tinklas nebeturės pakankamai resursų aptarnauti visus vartotojus.

Šią problemą galėtų išspręsti 5G - tai penktos kartos belaidžio plačiajuosčio ryšio technologija, kuri, kaip planuojama, pasižymės didele duomenų perdavimo sparta, maža delsa bei efektyviau išnaudos spektrą, taip paspartindama ketvirtąją pramonės revoliuciją, nes suteiktų visas galimybes „išmaniosioms gamykloms“, savaeigiems automobiliams, robotikai veikti, manoma, kad keisis sveikatos priežiūros sistema, net žmonių saviraiška. Tačiau naujai technologijai reikalingas radijo dažnių ruožas, o jis yra ribotas resursas. Europos Sąjungoje yra nurodyti trys pirmenybiniai radijo dažnių ruožai 5G ryšiui - 700 MHz, 3500 MHz bei 26 GHz, juose dar nėra veikusios judriosios tarnybos stotys. 700 MHz juostoje šiuo metu veikia antžeminė televizija, ji Europos Sąjungoje bus išjungta iki 2022 m. Kada ji bus išjungta Rusijoje, Baltarusijoje - neaišku, tačiau 5G poreikis yra jau dabar, todėl reikia išsiaiškinti, ar būtų galimybė suderinti televiziją su 5G judriuoju ryšiu. 3500 MHz radijo dažnių juostoje veikia Žemės stotys. ES valstybėse dominuoja bendros krypties principas - ES ir ECC sprendimais 3500 MHz dažnių juostoje siekiama perrašyti licencijas ir panaikinti dažnių juostos defragmentaciją, nes tai yra neefektyvu, todėl ginčytis siekiant susitarimo naudoti 5G numatomus dažnius beveik nereikia, o štai valstybėms, kurios ribojasi su ne ES valstybėmis, gali iškilti sunkumų. Tokia situacija yra ir Lietuvoje. 5G čia buvo suplanuota diegti pirmiausiai 3500 MHz juostoje ir per praėjusius metus RRT administracijai pavyko sudaryti optimistiškas sutartis su Latvija, Lenkija ir Baltarusija, tačiau su ketvirtąja kaimyne Rusija susitarti nepavyko, nes ji šioje juostoje naudoja Žemės stotis, skirtas kariniams tikslams, šiai tarnybai reikalinga ypač didelė apsauga nuo trukdžių ir judrusis ryšys greta esančioje Lietuvoje jiems galėtų trukdyti. 26 GHz dažnyje reikia užtikrinti pasyviosios Žemės tyrimo radijo ryšio tarnybos (EESS) apsaugą 23,6–24,0 GHz dažnių juostoje ir ši opi problema sukėlė daug pykčio ir spekuliacijų ES. Taip pat Rusija siekia apsaugoti 26 GHz juostoje veikiančią kosmoso tyrimų tarnybą (SRS).

Šio darbo tikslas yra apžvelgti visų trijų ES prioritetinių 5G dažnių plusus ir minusus diegiant judrųjų ryšių bei atlikti suderinamumo su ten jau veikiančiomis tarnybomis analizę ir įvertinti, ar yra galimybė Lietuvoje šiuos dažnius naudoti 5G technologijai.

1 Literatūros apžvalga

1.1 Radijo dažnių spektro reguliavimas ir dažnių skyrimas

Esant keliems to paties dažnio signalams, radijo bangų priėmimo įranga negali tinkamai išskirti naudingo ir trukdančio signalų. Kadangi dažnių juosta yra ribota, svarbu užtikrinti, kad ji būtų naudojama efektyviai bei su kuo mažesne žalingų trukdžių rizika, tam reikalingos institucijos, koordinuojančios dažnius bei vykdančios nuolatinę radijo spektro stebėseną, kad būtų laikomasi radijo dažnių naudojimą reglamentuojančių teisės aktų reikalavimų. Dažnių juostos koordinavimas vyksta trimis lygmenimis - tarptautinis, Europos Sąjungoje ir konkrečioje valstybėje. Labai svarbu išlaikyti lygiateisiškumo principus bei juos įtvirtinti dvišaliuose susitarimuose ir tarptautinių institucijų rekomendacijose, laikantis visiško pariteto principo. Kadangi judriojo ryšio tinklų išdėstymas tiesiogiai priklauso nuo operatorių sąnaudų, investicijų bei komercijos principų, jie, po Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnybos (toliau - RRT) organizuoto aukciono pasidaliję dažnių juostas, savarankiškai priima sprendimus, kaip plėsti savo tinklą.

Pagrindinė ir svarbiausia institucija tarptautiniam koordinavimui yra tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (toliau - ITU). Tai dukterinė Jungtinių Tautų Organizacijos organizacija, įkurta 1865 metais. ITU skirsto radijo dažnių spektro juostas, priskiria radijo dažnius ir juos registruoja, taip pat koordinuoja veiksmus šalinant trukdžius, keliamus skirtingų šalių radijo stočių, skatina bendradarbiavimą, kurį ne visada paprasta užtikrinti [2]. ITU Radijo ryšio reglamente galima rasti pagrindinius principus ir taisykles, kuriais turi remtis valstybių-narių institucijos, koordinuojančios spektro naudojimą. Žemiau pateikta reglamente nurodoma lentelė, kaip, pavyzdžiui, reiktų valdyti 3400-3800 MHz juostos naudojimą (Lietuva priklauso pirmajam regionui)[3]:

Allocation to services		
Region 1	Region 2	Region 3
3 400-3 600 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile 5.430A Radiolocation 5.431	3 400-3 500 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile 5.431A 5.431B Amateur Radiolocation 5.433 5.282	3 400-3 500 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) Amateur Mobile 5.432 5.432B Radiolocation 5.433 5.282 5.432A
	3 500-3 600 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile 5.431B Radiolocation 5.433	3 500-3 600 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile 5.433A Radiolocation 5.433
3 600-4 200 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) Mobile	3 600-3 700 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile 5.434 Radiolocation 5.433	3 600-3 700 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile Radiolocation 5.435
	3 700-4 200 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) MOBILE except aeronautical mobile	

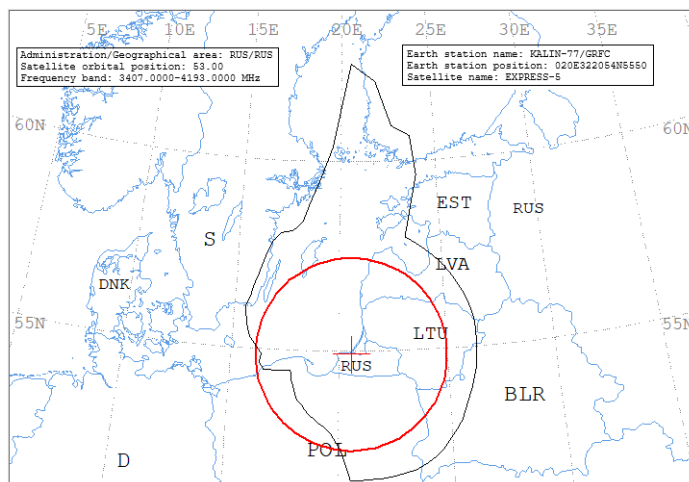
1 pav. Radijo reglamento ištrauka

Yra sutarta, kad radijo reglamente pirmumo teisę turinčios tarnybos yra rašomos didžiosiomis raidėmis, o antrinę teisę - mažosiomis. Kaip matome iš 1 pav., 3400-3600 MHz juostoje pirmumo teisę turi tiek fiksuotoji, tiek judrioji tarnybos, 3600-4200 MHz juostose pirmumo teisę turi fiksuotoji tarnyba ir tik antrinę - judrioji. Tačiau norint veikti 3400-3600 MHz dažniuose pirmumo teisės neužtenka, reikia saugoti jau sukoordinuotas stotis. Todėl čia ypač reikalingas tarpvalstybinis bendradarbiavimas bei nauji susitarimai, nes iki 5G šis ruožas nebuvo toks aktualus. Nesant susitarimui, reikia remtis radijo reglamento siūlomais apsaugos kriterijais, šiam dažniui nustatyti kriterijai parodyti 2 pav.

Frequency band	Service *	Limit in dB(W/m ²) for angles of arrival (δ) above the horizontal plane			Reference bandwidth
		0°-5°	5°-25°	25°-90°	
3 400-4 200 MHz	Fixed-satellite (space-to-Earth) (geostationary-satellite orbit)	-152	-152 + 0.5(δ - 5)	-142	4 kHz

2 pav. Žemės stotiai reikalinga apsauga pagal radijo reglamentą

Karaliaučiaus srityje yra koordinuota Žemės stotis, veikianti 3407-4193 MHz radijo dažnių juostoje, kurią reiktų apsaugoti (3 pav.), norint diegti judrųjį ryšį, nes ji sukoordinuota anksčiau, nei dar nepastatytos Lietuvoje bazinės stotys.



3 pav. Žemės stoties, kurių reiktų saugoti Lietuvai, parametrai

Europoje yra įprasta harmonizuoti dažnių naudojimą regioniniame lygmenyje, tokiu atveju sistemos, naudojančios tuos pačius dažnius skirtingose kaimyninėse valstybėse, gali išvengti žalingų trukdžių arba sumažinti juos iki tokio lygio, kad nekeltų didelių nepatogumų. Pagrindinės institucijos, turinčios didžiausią įtaką dažnių spektro reguliavime, yra Europos sąjunga ir CEPT. CEPT - savanoriška organizacija, kuriai priklauso politikos atstovai ir reguliuotojai iš 48 Europos šalių, tarp jų ir Lietuva, Latvija, Lenkija, Rusija. Tikslas yra bendradarbiaujant išlaikyti suderintą radijo dažnių spektrą, tobulinti telekomunikacijų ir pašto rinkos reguliavimą, kad būtų užtikrintas maksimalus efektyvumas, kurį jaustų kiekvienas europietis. CEPT sudaro trys savarankiški verslo komitetai: elektroninių ryšių komitetas (ECC), Europos pašto reguliavimo komitetas (CERP) bei ITU strategijos komitetas (Com-ITU). Šių komitetų pirmininkai sudaro CEPT valdybą, kuriai padeda centrinis biuras (ECO), įsikūręs Danijoje. O Lietuvoje už spektro reguliavimą ir politiką atsakingos Lietuvos Respublikos Susisiekimo ministerija bei RRT (4 pav.). Radijo dažniai Lietuvoje yra paskirstyti pagal Nacionalinę radijo dažnių paskirstymo lentelę nuo 9 kHz iki 275 GHz, kuri parengta ITU įstatais ir konvencija. RRT nustato radijo dažnių naudojimo sąlygas [4].



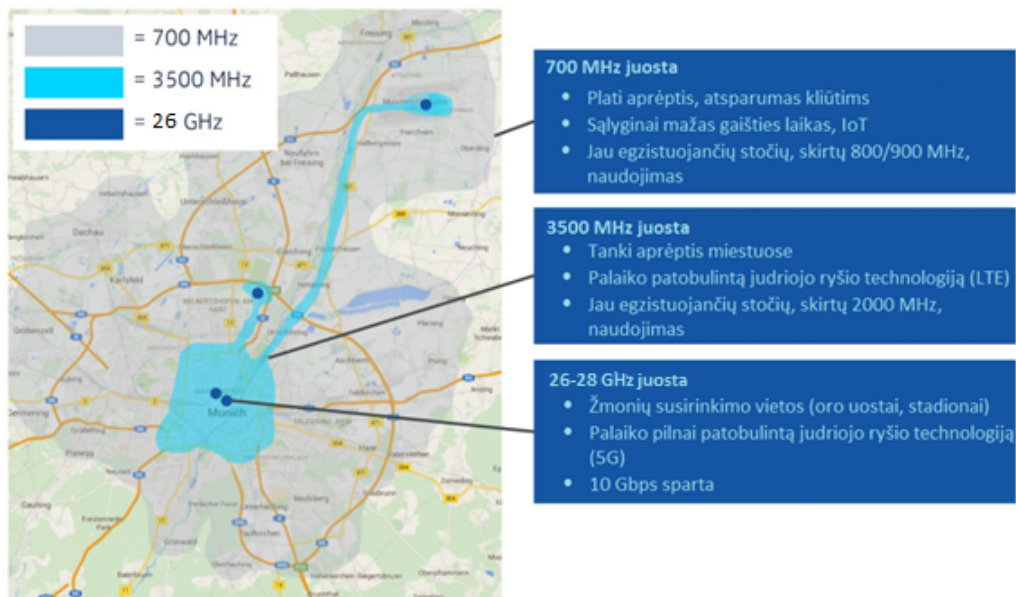
4 pav. Pagrindinės institucijos, atsakingos už radijo dažnių naudojimo reguliavimą Lietuvoje

1.2 5G - revoliuciją žadanti technologija ir laukiantys iššūkiai

3G suteikė galimybę naudotis realaus laiko skambučiais, SMS, naršymu per WAP protokolą, stebėti srautinę vaizdo medžiagą, 4G - dalyvauti aukštos kokybės vaizdo konferencijose, siųsti žinutes su nuotraukomis ar vaizdo įrašais, greitai naršyti per http protokolą, stebėti transliacijas mobiliajame telefone. Sakoma, kad 4G sujungė žmones, o ateinanti penktoji karta 5G yra labiau orientuota į daiktų internetą, dirbtinį intelektą, autonominius automobilius.

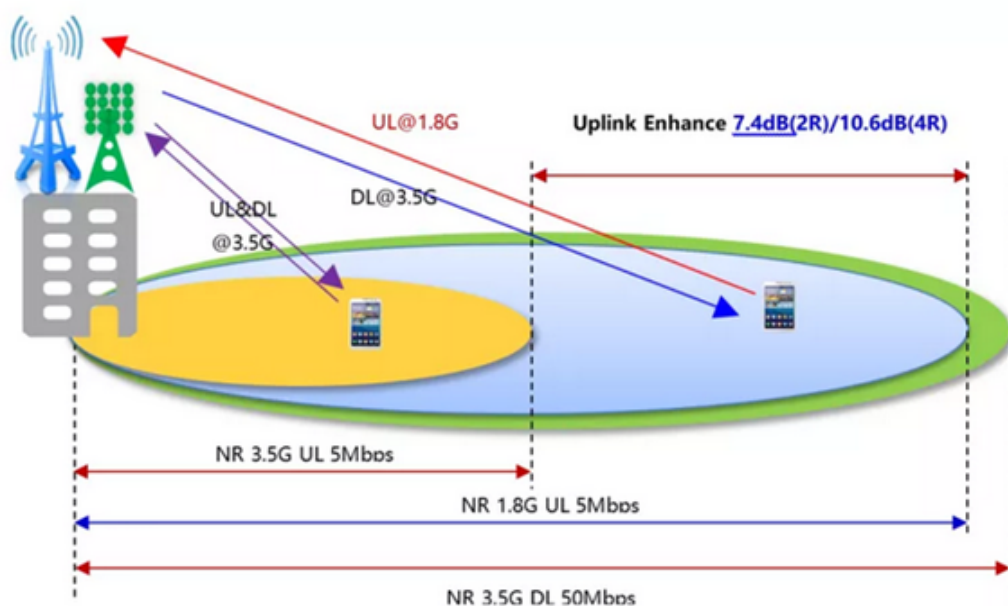
1.2.1 5G prioritetiniai dažniai Europos Sąjungoje

Kol kas Europos Sąjungoje yra išrinkti šie pirmenybiniai radijo dažniai, kuriuose planuojama diegti 5G: 700 MHz, 3,5 GHz ir 26 GHz. Nors ir daugiausiai dėmesio ir investicijų yra skiriama 3,5 GHz juostai, šie trys ruožai yra labai skirtingi, turi savų bruožų ir gali būti panaudojami skirtingiems tikslams - 700 MHz pasižymi puikia aprėptimi, taip pat būtų galima naudoti plačiai išvystyto LTE tinklo 800/900MHz bazines stotis bei antenas. 3,5 GHz dažnių juosta garantuotą neblogą aprėptį miestuose, tačiau ji nebūtų tokia plati kaip 700 MHz, todėl reiktų didesnės galios siųstuvų. O štai milimetrinių bangų dažnių skyrimas judriajam ryšiui anksčiau nebuvo planuotas. Šis terminas apibrėžia dažnių ruožą, viršijantį 6 GHz - tokios bangos prastai sklinda, o ir technologijos nėra pakankamai išvystytos ir ištestuotos. Tačiau norint patenkinti nuolat didėjančio duomenų perdavimo spartos ir srauto poreikį, ši juosta yra puikus variantas dėl plataus kanalo pločio (planuojama virš 100 MHz vienam vartotojui). Dėl prasto sklidimo reikalinga lapelio formavimo technologija, kad antenos skleidžiama galia būtų kuo labiau fokusuojama ir tokiu būdu padidėtų aprėptis. 26 GHz juostoje būtų galima pasiekti didžiausią duomenų perdavimo spartą, tačiau aprėptis tokia nedidelė, kad tikėtų naudoti nebent žmonių susibūrimo vietose (oro uostuose, stadionuose ir panašiai). 5 paveikslėlyje matome šių dažnių palyginimo eksperimentą, atliktą Miuncheno mieste, pilka zona žymi 700 MHz aprėptį ir matomas ryškus skirtumas tarp, pavyzdžiui, 26 GHz (tamsiai mėlyna) aprėpties zonos [5].



5 pav. 700 MHz, 3.5 GHz ir 26 GHz dažnių juostų aprėpčių palyginimas[6]

Taip pat galima šiuos dažnių ruožus kombinuoti. 3GPP 15-ajame leidime atsiranda papildomo aukštynkrypčio ryšio sąvoka, kai keletas skirtingų spektro juostų yra suporuojamos ir tai leistų teikti 5G paslaugas platesnėje zonoje [6]. Siųstuvuose (žemynkryptis ryšys (DL)) galią padidinti ir gauti didesnę aprėptį įmanoma, tačiau mobilieji telefonai ir kiti aukštynkrypčiam (UL) ryšiui naudojami prietaisai nėra tokie galingi, todėl galima naudoti, pavyzdžiui, 3.5 GHz juostą žemynkrypčiam ryšiui, o 700 MHz juostą (6 paveikslėlyje matomame pavyzdyje naudojamas 1.8 GHz ruožas) aukštynkrypčiam. Tačiau ar tai yra tikslinga sprendžia patys operatoriai, be to, abu dažnių ruožai turėtų būti atlaisvinti.

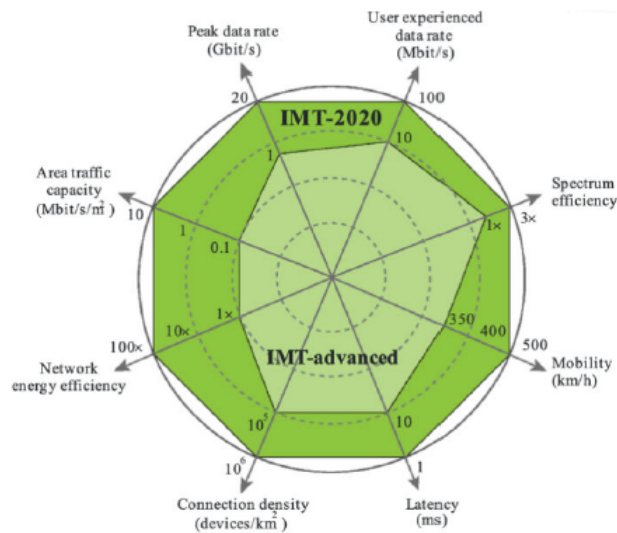


6 pav. Aukštynkrypčio ir žemynkrypčio ryšio aprėptys, esant skirtingiems dažniams[6]

Kalbant apie būsimų bazinių stočių reikalingus dažnių juostos plotčius, nauji ITU IMT-2020 reikalavimai, susiję su maksimaliu kanalo pralaidumu, yra pagrįsti su prielaida, kad naudojamas 100 MHz juostos plotis (kai tuo tarpu LTE technologijoje būdinga 5, 10, 20 MHz). Tačiau iš vykstančių 3,5 GHz juostos aukcionų Europoje matyti, kad ne visų valstybių operatoriai turės galimybę naudotis tokiu plačiu spektru. 5G technologijos našumas tokiu atveju bus mažesnis už IMT-2020 nurodytą.

1.2.2 5G architektūra

Besikuriančios IMT-2020 sistemos turi atitikti ITU nustatytus reikalavimus, pavaizduotus 7 pav. Tai tokie parametrai, reikalingi sklandžiam ir visapusiškam 5G ryšio panaudojimui - patobulintam judriajam plačiajuosčiam ryšiui, patikimam mažos delsos ryšiui, masyviajam mašininio tipo ryšiui (angl. *Massive Machine Type Communications*). Kaip matyti iš paveikslėlio, 5G turi užtikrinti 10 kartų didesnę vartotojo patirtą duomenų perdavimo spartą ir net 20 kartų didesnę maksimalią duomenų spartą nei yra dabar.



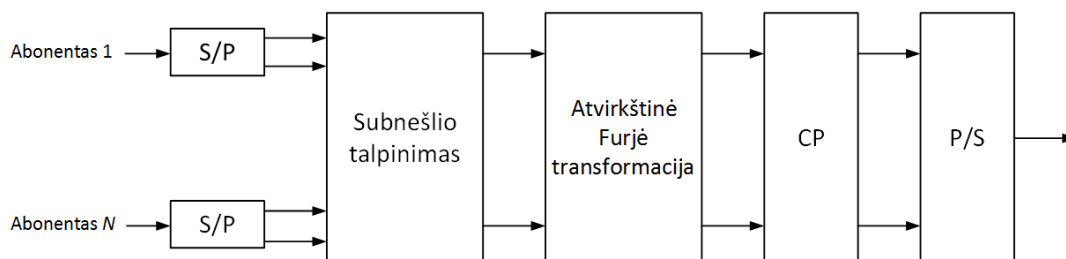
7 pav. IMT-2020 reikalavimai [15]

Viena realiausiai panaudojamų iš sukurtų sistemų yra 5G *New Radio*. Ši sistema gali veikti dvejopai - savarankiškai (angl. *standalone*) arba panaudojant LTE tinklo dalis, tokias kaip nešlys, branduolys, EPC (angl. *non-standalone*). Didžioji dalis operatorių pasaulyje pradeda nuo antrojo varianto, nes pradėti naujos kartos ryšį su nauja infrastruktūra kainuoja daug laiko ir investicijų, todėl bus pereinama palaipsniui. Kol 5G NR veikia nesavarankiškai, sunku užtikrinti mažą delšą, kas nevisai atitinka 5G ryšiui keliamus reikalavimus, taip pat tinklas yra priklausomas nuo LTE tinklo, todėl esant gedimams arba didelei apkrovai, tai pasijaustų ir 5G vartotojams.

Rūšis	Standalone	Non-standalone	
Pagrindinis nešlys	NR	LTE ir eLTE	NR
Antrinis nešlys	-	NR	eLTE
Branduolys	5G (5GC)	4G EPC arba 5GC	5GC
Operatoriaus perspektyva	paprasta, didelis našumas	naudojami 4G resursai	
Gamintojo perspektyva	nepriklausomas RAN produktas	reikalingas glaudus ir bendras veikimas su LTE	
Vartotojo patirtis	Bitų perdavimo sparta nustatyta pagal NR; Skirta mažos delsos transportui	Sumuojama LTE ir NR bitų perdavimo sparta; Delsa didesnė, kai naudojamas LTE nešlys	

8 pav. „Standalone“ ir „non-standalone“ palyginimas

5G technologijos „nesavarankiška“ architektūra, su kuria planuojama pradėti 5G įgyvendinimą, turi daug panašumų į LTE (nes višiskai naujos technologijos diegimas reikalauja labai daug investicijų), pagrindinis skirtumas yra aukštynkryptėje sąsajoje. 4G LTE tik žemynkryptėje sąsajoje yra naudojama ortogonalioji dažninio tankinimo moduliacija su cikliniu prefiksu (toliau CP-OFDM). Duomenų simboliai iš skirtingų siųstuvų yra patalpunami į skirtingus ponešlius, priklausomai nuo dažnių juostos, kuri yra priskirta jiems. Tuomet informacijai konvertuoti iš dažnių juostos į laikinę yra panaudojama atvirkštinė Furjė transformacija. Pridedamas ciklinis prefiksas (angl. *cyclic prefix*), padedantis išvengti tarpsimbolinės interferencijos dėl prieš tai perduotų OFDM simbolių. OFDM simbolis su cikliniu prefiksu ir duomenimis parodytas 9 pav. Prefiksas neturi jokių savo duomenų ir yra pašalinamas vos pasiekus imtuvą. Signalas yra paruoštas perduoti. Perdavimą atlieka subnarvelis (angl. *subframe*), kuriame patalpinta daug OFDM simbolių. Imtuvas, priėmęs išsiųstą ponešlį, vykdo atvirštinę operaciją – ciklinis prefiksas pašalinamas, laikinis signalas keičiamas į dažninį pasitelkiant Furjė transformaciją [7].

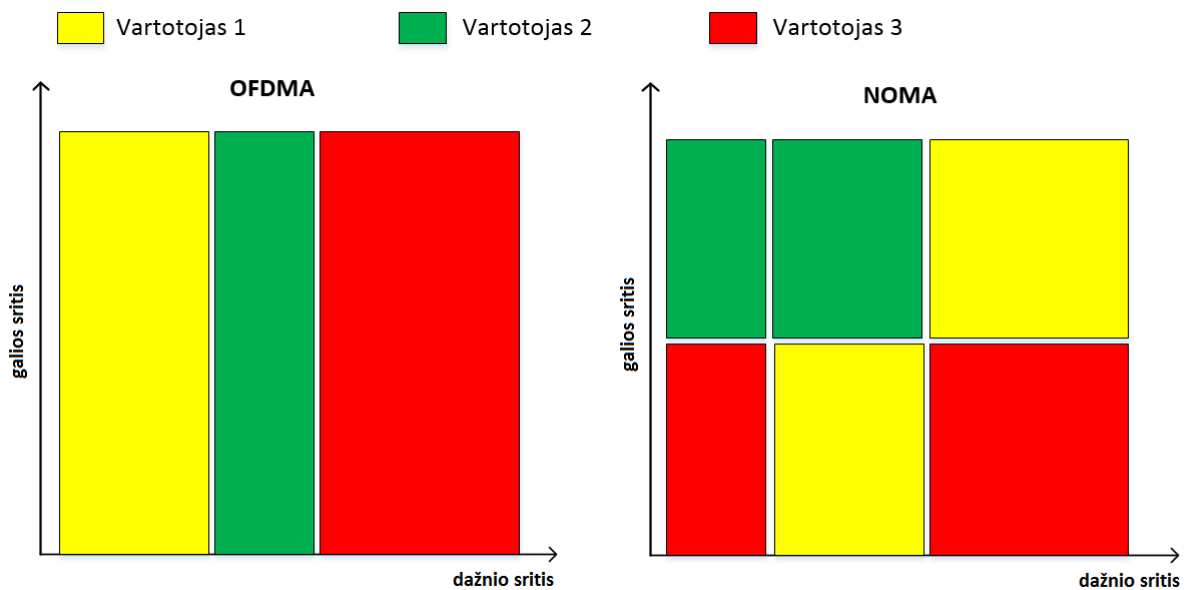


9 pav. Principinė OFDM technologijos schema

5G atveju CP-OFDM yra naudojama tiek aukštyn, tiek žemyn. Išaugus moduliacijos tankiui iki 256QAM (LTE įprastai naudojama 64QAM), 5G suteikia galimybę perduoti daugiau informacijos per tą patį laiko tarpą. Taip pat pasirinktinai aukštynkryptėje sąsajoje galima naudoti ir vieno nešlio moduliaciją - diskrečiosios Furje transformacijos išskleista ortogonalioji dažninio tankinimo moduliacija, kuri efektyviau išnaudoja galią nei CP-OFDM, o tai yra labai aktualu mažas siųstuvo galias turintiems išmaniesiems įrenginiams.

Tačiau literatūroje vis dažniau minimas naujas terminas, kurio LTE technologija niekada nenaudojo: neortogonalus dažninių radijo kanalų prieigos tankinimas (angl. *Non Orthogonal Multiple Access*)

- NOMA. LTE įprasta naudoti ortogonalų tankinimą, kai kiekvienas įtaisas naudoja porciją resursų bloko. Su 5G technologija siekiama dar labiau pagerinti spektrinį efektyvumą ir neortogonalusis tankinimas yra vienas iš sprendimų, nes keli vartotojai galėtų naudoti tą patį dažnį tuo pačiu metu. Vartotojus atskirti galima kelias būdais: kiekvienam jų priskiriant skirtingus kodus, vadinamus SCMA (angl. *sparse code multiple access*), derinant 3G technologijoje naudojamą kodinį prieigos tankinimą CDMA ir 4G naudojamą ortogonalią dažnių radijo kanalų dalijimo technologiją OFDMA arba vis keičiant vartotojų signalo-triukšmo santykius (10 pav.). Tarkime, pirmas vartotojas (toliau - V1) yra su geru signalo-triukšmo santykiu, o antras vartotojas (toliau - V2) su prastesniu signalo-triukšmo santykiu. Antena siunčia didelės galios signalą, skirtą V2, ir taip užgožia silpnesnį signalą, kurio pakaktų V1. V2 išsišifruos tik didelės galios signalą, o kitas paskęs triukšmuose. Tuo tarpu V1 išfiltruos didelės galios signalą iš priimto signalo tam, kad sukurtų geresnės kokybės silpnesnį signalą dėl gero signalo-triukšmo santykio. Šiuos du metodus pasirinkta naudoti 5G NR [8]. Kaip galima matyti iš 10 pav., OFDMA atveju kiekvienas vartotojas turi po atskirą spektro gabalėlį, o NOMA atveju tą patį gabalėlį tuo pačiu metu gali naudoti daugiau nei vienas vartotojas.

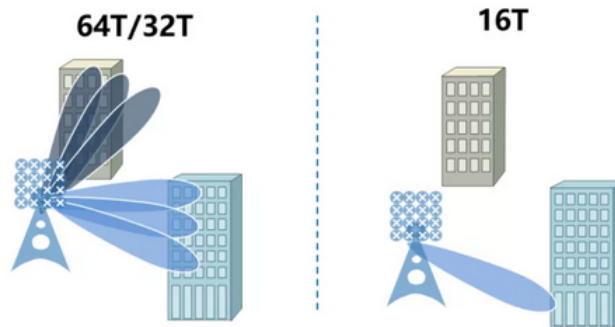


10 pav. OFDMA ir NOMA palyginimas

1.2.3 Masyvusis MIMO

Kelių antenų technologija arba kitaip „keli įėjimai – keli išėjimai (angl. *multiple-input multiple-output, MIMO*)“ tapo labai aktuali projektuojant ketvirtosios kartos tinklą, nes garantavo greitą duomenų perdavimą, išvengiant dažnių juostos pločio ir antenų galios didinimo, taip pat yra naudojama daugumoje šiuolaikinių bevielio ryšio standartų, pavyzdžiui, 3GPP, WiMAX, IEEE 802.11n WiFi. LTE technologijoje, pavyzdžiui, yra naudojamas 2x2 MIMO. 5G technologijoje žadama naudoti „masyvųjį MIMO“ (angl. *Massive MIMO*), kuris pagerina tiek aprėptį, tiek talpą, ir yra vienas iš pagrindinių

5G bruožų, skiriančių šią technologiją nuo kitų. Visų pirma, reikia visapusiškai atsižvelgti į sąnaudas, tinklo našumą, vietos/svorio apribojimus (pavyzdžiui, Pietų Korėjoje draudžiama diegti antenas, jei jų svoris viršija 25 kg). Taip pat, nėra efektyviausios konfigūracijos - 64T/32T naudingiau naudoti tankiai apstatytuose miestuose, kur aukšti pastatai, taip yra pigiau, o priemiesčiuose geriau naudoti 32T ar 16T (11 pav.). Iš dabartinių tendencijų matyti, kad 2T2R, 4T4R ir 8T8R variantai bus įprastiniai, o 16T16R, 32T32R, 64T64R variantai galėtų būti naudojami tik tose vietose, kur nepakanka kanalo talpos ir tinklas yra labai apkrautas [9].



11 pav. 64T/32T ir 16T MIMO palyginimas[9]

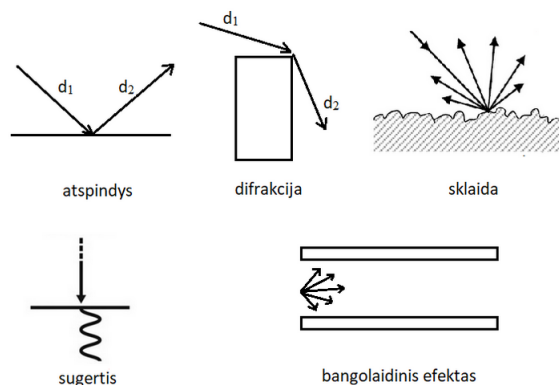
Bazinėse stotyse įrengus daug antenų padidėja narvelio spektrinis efektyvumas, pagrinde dėl lapelio formavimo (angl. *beamforming*) ir erdvinio tankinimo. Taikant lapelio formavimą, bazinė stotis perdavimo energiją sutelkia į konkrečią vietą, kurioje yra vartotojo įranga (toliau - UE), taigi stipriai padidindama priimamo signalo energiją. Erdvinis tankinimas yra pagrįstas MIMO technologija, kai kelios antenos, tiek siųstuve, tiek imtuve, yra naudojamos keliems duomenų srautams vienu metu perduoti toje pačioje dažnių juostoje. Taikant erdvinį tankinimą, bazinė stotis siunčia kelis srautus link kelių aktyvių UE, kurios atskirtos naudojant skirtingus pluošto formavimo įrenginius (angl. *beamformers*). Kadangi MIMO technologija atrodo perspektyvi, šiuo metu vyksta daug tyrimų - tiek mokslinių, tiek industrinių, todėl jau kelių metų bėgyje planuojama, kad viena bazinė stotis bus aprūpinta šimtais antenų, „pilno MIMO“ (angl. *full-dimension MIMO*) technologija jau yra standartizuota tryliktame LTE leidime [10]. Tačiau didinant antenų skaičių svarbu atsižvelgti į galimą elektromagnetinės spinduliuotės poveikį žmonėms, kuris prieš kelis metus Pasaulio sveikatos organizacijos buvo klasifikuotas kaip „galimai kenksmingas“, ir neviršyti nustatytos elektromagnetinės spinduliuotės higienos normos [11]. Jį reguliuoti nėra paprasta, nes masyvusis MIMO, nors ir pagerina sistemos našumą, tačiau gali sukoncentruoti energiją formuodamas siaurą, „aštrų“ lapelį su dideliu stiprinimu į vieną tašką, kur yra UE, taigi teoriniu būdu modeliuojamas tinklas, kai skaičiuojama antenos maksimali siųstuvo galia visomis kryptimis vienodai, atrodytų gerokai didesnis ir perpildytas nei galėtų būti realybėje, nes antena vienu metu niekada nespinduliuos maksimalia, sukoncentruota galia visomis kryptimis ir dideliu nuotoliu. Operatoriams tai taip pat yra papildomi sunkumai, nes žymiai sudėtingiau planuoti tinklą ir derinti masyvaus MIMO bazinės stotis su jau egzistuojančiomis GSM, UMTS ir LTE stotimis. Moksliniame darbe „Statistinis radijo dažnių poveikio atitikties ribų įvertini-

mo metodas masyviojo MIMO sistemose“ (angl. *A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems*) yra siūlomas statistinis metodas, skirtas elektromagnetinės spinduliuotės stiprumui aplink masyviojo MIMO bazinę stotį įvertinti, remiantis 3GPP sukurtu 3D erdvinio kanalo modeliu. Metodiką sudaro sistemos modeliavimas, įskaitant realius tinklo diegimo scenarijus - stoties aukštį, UE pasiskirstymo, galimo srauto parametrus, siekiant įvertinti bazinės stoties realios perdavimo galios suminę pasiskirstymo funkciją CDF (angl. *cumulative distribution function*). Tada apskaičiuojama gautos bazinės stoties perdavimo galios tam tikra procentinė dalis. Nagrinėjant atvejį, kai aktyvus tik vienas UE, skaitmeniniai rezultatai rodo, kad reali bazinės stoties perdavimo galia yra tik 26-32% galimos maksimalios vertės, esant atvejui, kai bazinės stotys statomos ant pastatų 25 m aukštyje ir tarp stočių yra 500 m atstumas, ir 22-27%, kai bazinės stotys yra 10 metrų aukštyje 200 m atstumu viena nuo kitos. Bazinių stočių aprėptis dar labiau sumažėja, kai pridedama daugiau aktyvių UE - srautas pasiskirsto [12].

1.3 Radijo bangų sklaidimas

1.3.1 Bangų sklaidimo mechanizmai

Elektromagnetinių bangų sklaidimas gali būti tyrinėjamas keliais būdais: remiantis Maksvelo lygtimis arba spindulių teorija, kuri tinka nagrinėjant aukštesnius dažnius. Šis būdas yra gana paprastas ir pagrįstas geometrija. Iš viso galima paminėti penkis pagrindinius reiškinius, pasitaikančius telekomunikacijų sistemose - tai atspindžiai (kai spindulys, kritęs į tam tikrą paviršių su kitu lūžio rodikliu atsispindi vienodu kampu kaip ir kritimo kampas, o šių bangų EM laukai susiję per atspindžio koeficientą), difrakcija (tai procesas, paaiškinantis bangos perėjimą į šešėlio zoną), sklaida (kritusi energija išsklaidoma į visas puses, priklausomai nuo paviršiaus šiurkštumo ir pan.), sugertis (tai dažnas reiškinys atmosferoje dėl ištirpusių vandens lašelių, taip pat ir medžių lapai, pastatai sugeria dalį energijos) ir bangolaidžio efektas (angl. *guided wave*). Šie reiškiniai pavaizduoti 12 pav. Žemesniuose nei 30 MHz radijo dažniuose papildomai dar prisideda sklaidimo per jonosferą ypatybės - Faradėjaus plokštumos sukimas, dvigubas lūžis.

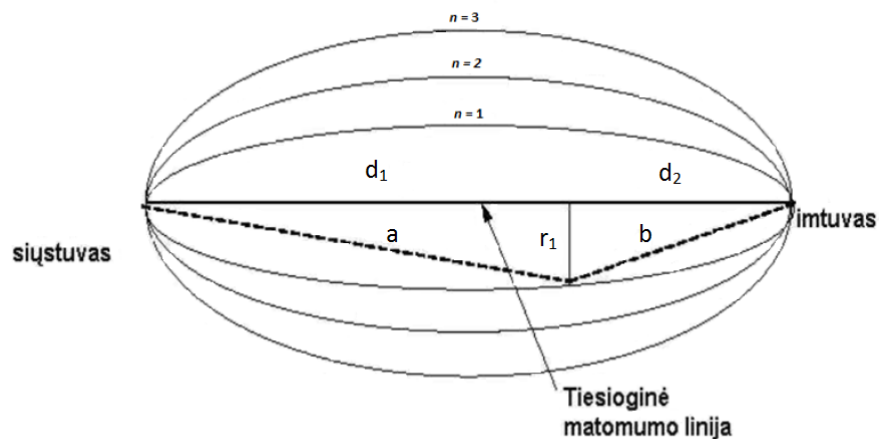


12 pav. Bangų sklaidimo reiškiniai

1.3.2 Tiesioginio matomumo kanalas

Korinis ryšys yra bevielis ir radijo bangos yra jo pagrindinė komponentė. Elektromagnetinėms bangoms sklindant erdve, jų kelyje pasitaiko įvairios kliūtys, todėl tiesioginis siųstuvo signalas retai kada priimančią anteną pasiekia nepakitęs. Kliūtys gali atspindėti, išsklaidyti dalį siunčiamo signalo, taip pat galimas difrakcijos reiškinys [13]. Dėl šios priežasties imtuvo antenos aplinką dažniausiai pasiekia tiek tiesioginis signalas, tiek ir silpnesni, bet atsispindėję, difragavę signalai. Signalai tarpusavyje interferuoja ir tokiu būdu paveikia priimamąjį signalą. Nesunku pastebėti, kad mažiausiai įtakos turės tos kliūtys, kurios yra toliau nuo geometrinės linijos siųstuvas-imtuvas.

Hiugenso - Frenelio principas apibūdina kliūtis tašką, kurį pasiekė elektromagnetinės bangos kaip antrinių bangų šaltinį. Taip pat plačiai naudojama Frenelio zonos sąvoka – tai elipsoido, per kurį difrakciniu būdu praėjusių bangų fazė nuo tiesioginių bangų fazės skiriasi $n\pi$ (čia n – teigiamas sveikasis skaičius, Frenelio zonos numeris), apribota erdvės sritis. Frenelio zonos grafiškai pavaizduotos 13 pav. [14].



13 pav. Frenelio zonos [14]

Frenelio zona paprastu dvimačiu atveju aprašoma padėties a ir b taškais, tarp kurių atstumas ($a + b$) turi sveiku pusbangių skaičiumi viršyti tiesę tarp siųstuvo d_1 ir imtuvo d_2 antenų ($d_1 + d_2$), λ – signalo bangos ilgis:

$$a + b = d_1 + d_2 + \frac{n\lambda}{2} \quad (1)$$

Darant prielaidą, kad įprastu atveju $d_1, d_2 \gg r_n$, tai

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda(d_1 d_2)}{d_1 + d_2}} \quad (2)$$

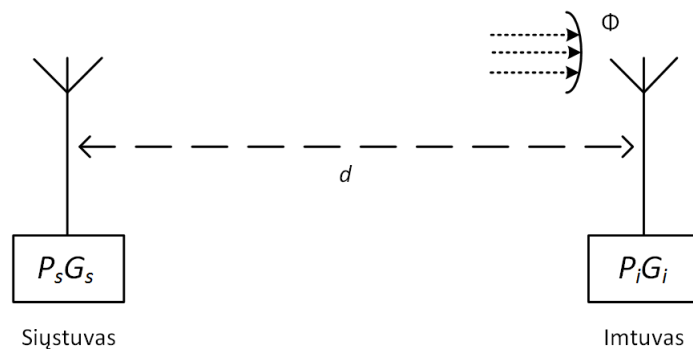
Centrinėje Frenelio zonos dalyje spindulys yra didžiausias. Praktiniam bevielio ryšio planavimo pritaikymui naudinga žinoti didžiausią pirmosios Frenelio zonos spindulį (13 pav.).

2 formulėje vietoje λ įrašome c/f ($\lambda = c/f$), dažnio f matavimo vienetais parinkę GHz, d_1 ir d_2 – kilometrus, r_n – metrus, gauname paprastesnę lygtį:

$$r_n = 17,3 \sqrt{\frac{n(d_1 d_2)}{f(d_1 + d_2)}} \quad (3)$$

Remiantis teoriniais skaičiavimais, pirmoji Frenelio zona turi būti neuždengta bent $0.6r_1$ spindulio centrinė zonos dalis (pati ilgiausia). Šis kriterijus vadinamas 0.6 Frenelio zonos kriterijumi [14][15].

Kai kanalas tenkina 0.6 Frenelio zonos kriterijų, galima išnagrinėti tiesioginio matomumo radijo kanalą, matomą 14 pav.



14 pav. Tiesioginio matomumo radijo kanalas laisvoje erdvėje

kur P_s - galios siųstuvas, G_s - stiprinimo antena, prie kurios prijungtas galios siųstuvas P_s , P_i - galią priimančias imtuvas, G_i - imtuvo antenos stiprinimas.

Siųstuvas sukuria galios srautą Φ imtuvo antenos aplinkoje:

$$\Phi = \frac{G_s P_s}{4\pi d^2} \quad (4)$$

kur d - atstumas tarp antenų, P_s - efektyvioji izotropinė spinduliavimo galia. Tokios galios reikia siųstuvui, kad būtų sukurtas galios srautas Φ , jei siųstuvo stiprinimo G_s antena būtų pakeista izotropine. Imtuvo antena srautą surenka iš antenos apertūros, žymimos raide A , kitaip – efektyvaus srauto ploto. Tuomet priimto signalo galia lygi P_i :

$$P_i = \Phi A_i = \frac{G_s P_s}{4\pi d^2} A_i \quad (5)$$

kur A_i - antenos apertūra, su antenos stiprinimu susijusi formule:

$$A_i = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_i \quad (6)$$

λ - ilgis. Įstatę A į P gausime Friss'o laisvosios erdvės lygtį:

$$P_i = \frac{G_s P_s \lambda^2}{4\pi d^2} \frac{G_i}{4\pi} \quad (7)$$

Pasinaudoję šiuo sąryšiu galime apibrėžti radijo kanalo nuostolius RKN:

$$RKN = 10 \lg\left(\frac{P_s}{P_i}\right) \quad (8)$$

Iš (7):

$$RKN = -10 \lg(G_i G_s) + 20 \lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (9)$$

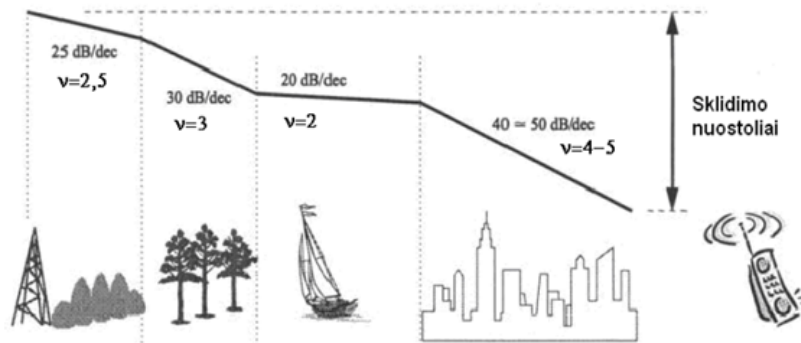
Pirmasis narys aprašo stiprinimą, antrasis – sklidimo nuostolius. Lygybė Φ parašyta darant prielaidą, kad radijo bangos sklinda terpėje, kuri yra idealus dielektrikas be nuostolių. Tokiu atveju priimto signalo galia:

$$P_i \propto \frac{1}{d^2} \quad (10)$$

Tačiau tai neatitinka realybės, Žemės atmosfera nėra idealus dielektrikas. Rūkas, dulkės, lietus – visa tai sklaido ir sugeria keliaujančias bangas, todėl reali priimto signalo galia:

$$P_i \propto \frac{1}{d^v}, v > 2 \quad (11)$$

v - silpninimo parametras, naudojamas ne tik tiesioginio matavimo, bet ir Fedingo kanaluose, kai radijo bangoms sklirti trukdo medžiai, augalai, konstrukcijos. Miestuose šis parametras būna 4-5, miškuose 3, virš vandens 2 [16].



15 pav. Sklidimo nuostolių priklausomybė (dB į nuotolio dekadą), esant įvairiam urbanizacijos lygiui [16]

1.3.3 Signalų triukšmo santykis skaitmeninėse ryšių sistemose

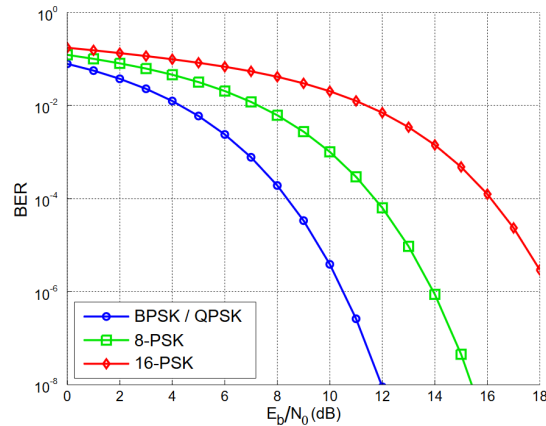
Signalų triukšmo santykis išreiškiamas formule:

$$\frac{P_s}{P_{tr.}} = \frac{P_s}{P_{tr.0}B} = \frac{P_s T_b}{P_{tr.0} B T_b} = \frac{E_B}{P_{tr.0}} \frac{R}{B} \quad (12)$$

kur P_s - signalo galia, $P_{tr.}$ - triukšmo galia, B - kanalo juosta, $P_{tr.0}$ - triukšmo spektrinis tankis, T_b - bito (simbolio) trukmė, $R = \frac{1}{T_b}$ - signalo sparta, $E_b = S T_b$ - simbolio energija.

E_b - tai bito (simbolio) trukmės signalo energija, paprastai vadinama bito (simbolio) energija. E_b yra lygus signalo galiai, padalintai iš vartotojo bitų perdavimo spartos. Jei signalo galia matuojama vatais, o perdavimo sparta - bitais per sekundę, tuomet E_b vienetai yra džuliai. Dažniau matomas parametras telekomunikacijose yra E_b/N_0 santykis, tai normalizuotas signalo triukšmo santykis (SNR per bitą), naudojamas lyginant bitų klaidų spartas, esant įvairioms moduliacijoms, ir tam nereikia įtraukti kanalo pločio, kaip įprasta.

$\frac{R}{B}$ - moduliacijos spektrinis efektyvumas, arba kitaip tariant moduliuoto signalo gebėjimas perduoti kuo daugiau informacijos fiksuotoje dažnių juostoje.



16 pav. E_b/N priklausomybė nuo BER

1.3.4 Trukdžių tarp judriosios bei Žemės stočių skaičiavimas

Žalingų trukdžių lygis, kurį sukelia judrioji stotis Žemės stoties imtuvui, yra apibrėžta 2014 m. ITU ataskaitoje [17]:

$$I_{IMT} = P_{IMT} + G_{IMT} + G_{f_{ss}}(\varphi) - L(f, d) - FDR(\Delta f) \quad (13)$$

kur I_{IMT} - Žemės stoties imtuvo priimtas trukdžių lygis 1 MHz kanale, kai signalas išsiųstas iš judriosios tarnybos bazinės stoties (dBm)

P_{IMT} - bazinės stoties siųstuvo galia 1 MHz juostos pločio kanale (dBm);

G_{IMT} - bazinės stoties antenos stiprinimas (dB);

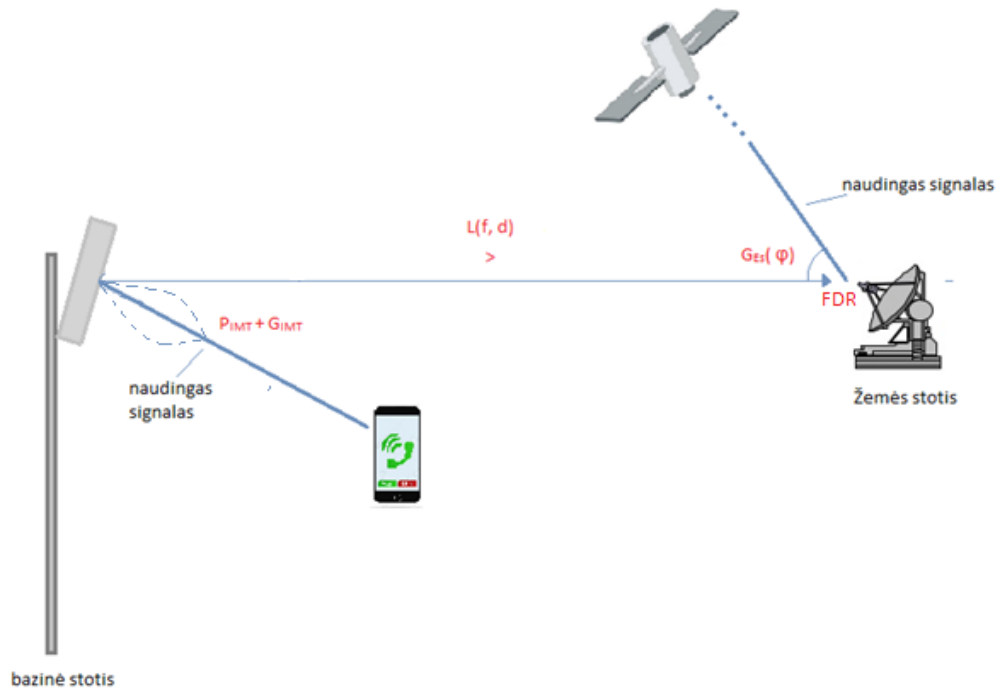
$G_{f_{ss}}(\varphi)$ - Žemės stoties imtuvo antenos stiprinimas (dB);

φ - Žemės stoties antenos polinkio kampas;

$L(f, d)$ - nuostoliai (dB);

$FDR(\Delta f)$ - slopinimo parametras, kuris atsiranda dėl kaimyninių dažnių.

Žalingų trukdžių mechanizmas tarp Žemės ir judriosios tarnybų pavaizduotas 17 pav.



17 pav. Žalingų trukdžių mechanizmas tarp Žemės stoties ir judriosios tarnybos

1.3.5 Interferencijos rūšys

1. Ilgalaikė interferencija. Remiantis ITU-R S.1432 rekomendacija, reikia įvertinti du atvejus, priklausomai nuo to, kokie dažniai yra tarp interferuojančių tarnybų. Jei tarnybų naudojami dažniai sutampa, tai $I/N = -12.2 \text{ dB}$ ($\Delta T/T=6\%$) atitinkamai taikoma suminei interferencijai iš sistemų, kurios turi pirmumo teisę veikti tuose dažniuose, naudojant 100% blogiausio mėnesio parametą, arba $I/N = -10 \text{ dB}$ ($\Delta T/T=10\%$), naudojant 20% blogiausio mėnesio parametą. Jei tarnybų naudojami dažniai yra gretutiniai, tai $I/N = -20 \text{ dB}$ ($\Delta T/T=1\%$) atitinkamai taikoma suminei interferencijai iš visų trukdančių šaltinių, naudojant 100% laiko tikimybę, kur N - giedro dangaus palydovinės sistemos triukšmas, apibrėžtas ITU-R S.1432 rekomendacijoje [18].
2. Trumpalaikė interferencija. Šis kriterijus plačiau yra aprašytas ITU-R SF.1006 rekomendacijoje, taip pat jį galima rasti Radijo ryšio reglamento septintame priede. Ši interferencijos rūšis skaičiuojama, kai $I/N = -1.3 \text{ dB}$, naudojant iki 0,001667% vertės laiko tikimybę. Šis kriterijus dažniausiai naudojamas koordinavimo sričiai apibrėžti [19].

Vertinant potencialius žalingus trukdžius Žemės stoties imtuve, reikia atsižvelgti į abu interferencijos kriterijus. Skaičiavimai rodo, kad, paskaičiavus pagal abu metodus, interferencijos lygis skiriasi. 3400-3800 MHz dažnių juostoje pagal ITU-R nurodymus geriausiai naudoti ITU-R P.452 rekomendacijoje aprašytą sklidimo modelį.

1.3.6 Lauko stiprumas ir PFD

Interferencijos ir trukdžių analizė pagrįste sukasi aplink radijo signalų galią, kuri priklauso nuo elektrinio lauko stiprumo. Santykis tarp naudingo ir trukdančio signalo dažnai nustatomas/vertinamas kaip PFD (angl. *power flux density*) - galios srauto tankis. Šio parametro privalumas tas, kad jį galima pasimatuoti ir įvertinti nepriklausomai nuo imtuvo savybių, nešališkai. Tai labai praverčia reguliuojant spektrą tarptautiniu lygiu tarp kaimyninių valstybių. Taip pat jei operatorius, reguliuotojas ar kita organizacija turi įtarimų dėl sąlygų nesilaikymo, galima lengvai nustatyti, kai šis lygis yra viršijamas ar yra arti to. PFD yra dažnai naudojamas ITU radijo reglamento pastabose, kaip, pavyzdžiui, RR 5.430A, kur PFD lygio limitas nurodomas $-154.5 \text{ dBW/m}^2/4 \text{ kHz}$, esant 20% laiko tikimybei ir 3 m aukščiui virš reljefo taško. Panašus į PFD parametras yra EPFD, kuriame įskaitomas antenos stiprinimas ir galimybė pridėti kelis trukdančius signalus vienu metu.

$$EPFD = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{P_i/10} \frac{g_{tx}(\Theta) g_{rx}(\varphi_i)}{4\pi d_i^2 g_{rx,max}} \right] \quad (14)$$

Jis pagrįste naudojamas apsaugoti GSO palydovines sistemas nuo žalingų trukdžių iš ne-GSO FSS sistemų [20].

1.4 Radijo bangų sklaidimo modeliai

Radijo bangų sklaidimo modelį apibrėžti galima taip - tai eksperimentiniams matavimams pritaikyta matematinė formuluotė, skirta apibūdinti radijo bangos sklaidimą kaip funkciją nuo dažnio, atstumo ir tokių sąlygų kaip atmosferos sugertis, reljefas, kliūtinės zonos parametrai ir pan. Bendro, „tinkamiausio“ modelio, kaip skaičiuoti priimtojo signalo vidutinės galios priklausomybę nuo atstumo iki siųstuvo, nėra, tačiau jų sukurta nemažai. Juos jungia bendra savybė – jie visi iš dalies empiriniai ir paremti įvairiose vietovėse atliktais elektromagnetinio lauko stiprio matavimais. Suformuotas modelis nėra tikslus bangos sklaidimo aprašymas – tai yra tikimybinis modelis, nusakantis bangos galią (arba elektromagnetinio lauko stiprį) taške, nutolusiame nuo siųstuvo T_x atstumu d , kuriame yra imtuvas R_x . Imtuvą pasiekia ne tik tiesioginė elektromagnetinė banga, bet ir difragavusi, išsklaidyta, atspindėta. Dėl šios priežasties imtuvo priimtas signalas yra šių bangų-signalų superpozicija.

Kadangi radijo dažnių spektras yra ribotas, reikia ieškoti būdų, kaip dažnių juostą naudoti kuo efektyviau, pavyzdžiui, tas pats dažnių ruožas gali būti naudojamas skirtingoms telekomunikacijų paslaugoms teikti arba panašias paslaugas teikiantys operatoriai gali kooperotis ir dalintis turimais dažniais. Tam, kad būtų užtikrintos kokybiškos paslaugos, labai svarbu yra kuo tiksliau numatyti galimą interferencijos lygį. 1968 metais Y. Okumura, kombinuodamas galimus bangų sklaidimo mechanizmus, vienas iš pirmųjų pateikė silpimo kreivės modelį fedingo kanale. Silpimo kreivė gana tiksliai aprašyta Tokijuje. Tačiau dėl didelio skaičiaus pataisos koeficientų šis modelis yra nepatrauklus praktiniam

panaudojimui. Kur kas praktiškesni modeliai yra Hata, kuriame sklidimo nuostoliai aprašomi naudojant empirinius pataisos koeficientus, ir Lee, kuriame nustatomi zona-zona sklidimo nuostoliai yra panaudojami taškas-taškas sklidimo vertei skaičiuoti [16].

1.4.1 ITU-R rekomendacija P.1546

ITU-R P.1546 yra viena iš rekomendacijų, kurias galima naudoti elektroninių bangų lygiui apskaičiuoti. Ši rekomendacija yra skirta antžeminių tarnybų, veikiančių 30-4000 MHz dažnių juostoje, taškas-plotas prognozės skaičiavimui, pagrįsta interpoliacijos/ekstrapoliacijos iš empiriškai gautų lauko stiprumo kreivių, tokių kaip nuotolio, antenos aukščio, dažnio, laiko tikimybės (laiko procentai rodo, kiek laiko metuose elektrinis laukas bus ne mažesnis nei vertė, gauta pagal kreivę). Tuomet sudaromos aproksimacinės formulės. Į skaičiavimą taip pat įtraukti rezultatų patikslinimai, atsižvelgiant į reljefo aukštį bei galimas kliūčių zonas. Šis modelis tinkamas naudoti iki 1000 km atstumui, o siųstuvo antenos aukštis negali viršyti 3000 m. Pagal šia rekomendaciją skaičiuojamas stoties siųstuvo efektinis antenos aukštis - tai aukštis virš vidutinio Žemės paviršiaus lygio imtuvo kryptimi, skaičiuojamas esant 3-15 kilometrų nuotoliui nuo bazinės stoties. Svarbu paminėti, kad specifiniams planavimo tikslams (pavyzdžiui, dažnių pasiskirstymo prioritetiniais pasienio zonoje) reikia įvertinti ir „vietos nepastovumo“ (*angl. location variability*) parametą, kuris priklauso nuo multitrajektorinio fedingo zonų.

Ši rekomendacija yra gretinama su Okumura-Hata modeliu[21]. Okumura-Hata atveju, elektrinis laukas apskaičiuojamas taip:

$$E = 69.82 - 6.16 \log(f) + 13.82 \log(H_1) + a(H_2) - (44.9 - 6.55 \log(H_1) (\log(d))^b) \quad (15)$$

kur E - lauko stiprumas (dB(mV/m)), kai e.r.p. = 1 kW;

f - dažnis (MHz) ;

H_1 - bazinės stoties efektyvusis antenos aukštis (m), galimos vertės nuo 30 iki 200 m;

H_2 —judriosios stoties antenos aukštis, galimos vertės nuo 1 iki 10 m ;

d - atstumas (km);

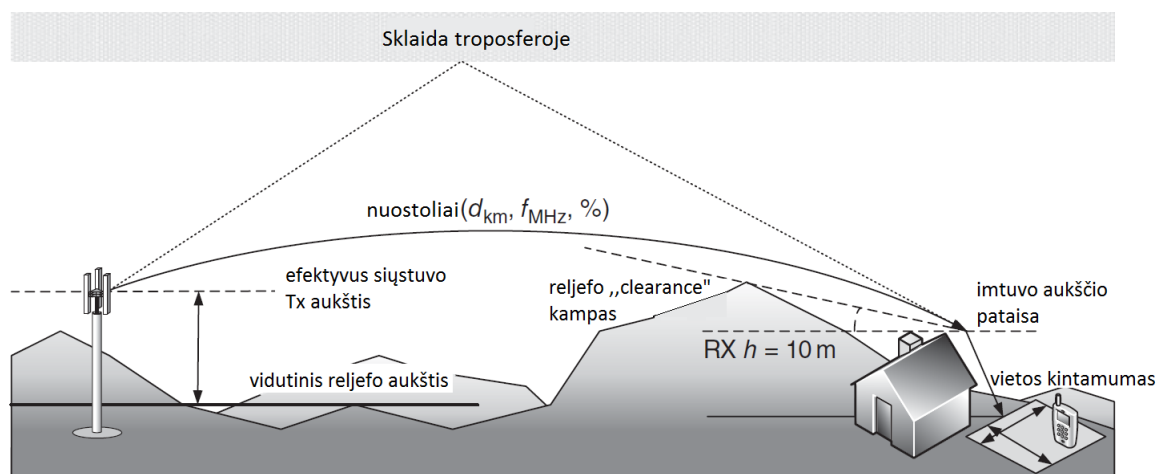
$a(H_2) = (1.1 \log(f) - 0.7)H_2 - (1.56 \log(f) - 0.8)$;

$b = 1$, kai $d \leq 20$ km;

$b = 1 + (0.14 + 0.000187f + 0.00107)(\log[0.05d])^{0.8}$, kai $d > 20$ km.

P.1546-5 rekomendacija remiantis gaunami beveik identiškai rezultatai, kai atstumas neviršija 10 km, $h_2 = H_2 = 1.5$ m, $R=15$ [21].

Šis modelis puikiai tinka skaičiuoti aprėpčiai tarnybų, kuriose siųstuvas yra aukščiau nei imtuvas, pavyzdžiui, transliavimo tarnybos. Tinklo planavimui paprastai naudojama laiko tikimybė 50 %, o trukdžių įvertinimui mažesnė, iki 1 %. Modelis apima gan daug fizikinių reiškinių, jie pavaizduoti 18 pav., gali būti naudojamas su reljefu arba be (reguliuojamam įprastai naudojamas be).



18 pav. P.1546 modelyje įskaitomi nuostolių elementai [20]

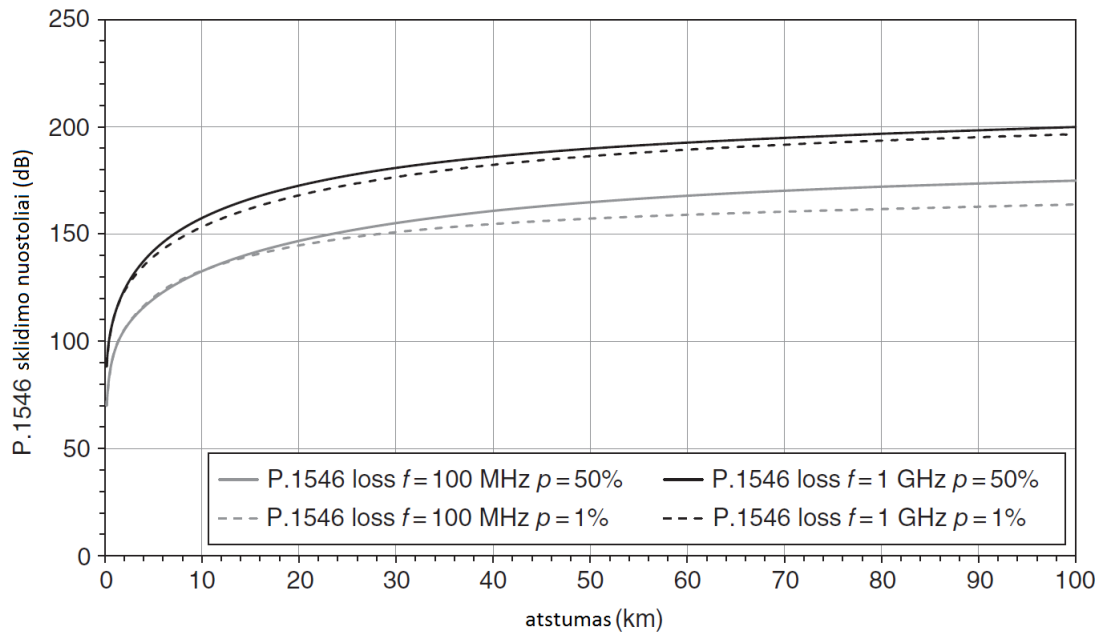
P.1546 rekomendacija yra paremta kita, ITU-R P.370 rekomendacija, kuri dabar jau nebenaudojama, bet iš jos buvo panaudotos nuostolių kreivės esant įvairiems atstumams, dažniams, aukščiams ir net klimato zonoms. P.1546 rekomendacija yra aktuali ir vis tikslinama, papildoma naujais komponentais, pavyzdžiui:

- Pagrindinio sklidimo (angl. *core propagation*) nuostoliai, apskaičiuojami pagal lauko stiprio nuo atstumo kreives, esant skirtingiems dažniams, laiko procentams bei aukščiui, kai imtuvo aukštis 10 metrų, o siųstuvo ERP = 1 kW.
- Pataisos, skirtos skaičiuoti skirtingais laiko procentais.
- Pataisos, atsižvelgiant į prošvaisos kampą (angl. *clearance angle*) tarp siųstuvo ir imtuvo, naudojant reljefą.
- Pataisos, kai imtuvo aukštis yra žemiau referencinio 10 m aukščio. Tokią pataisą turi ir P.452 modelis, tik P.1546 yra šiek tiek išsamesnis.
- Pataisos, atsižvelgiant į sklidimo nuostolius troposferoje.

P.1546 modelis, skirtingai nei P.452, P.1812 ir P.2001, nėra simetrinis, todėl nuostoliai iš stoties A į stotį B gali skirtis nuo nuostolių skaičiuojant atvirkščiai. Taip pat modelis nėra tinkamas mažesniems nei 3 km atstumams skaičiuoti. Kadangi tokiuose atstumuose didelę įtaką turi aplinkos veiksniai (pastatai, medžiai), tai vidutinio lauko stiprio kreivės nėra tokios tikslios ir modelio rezultatai gaunasi artimi laisvos erdvės nuostoliams. Išskirtinis šios rekomendacijos bruožas yra tai, kad jis yra taškas-plotas modelis, galintis skaičiuoti kelio nuostolius neviršydamas $q\%$ vietos tikimybės vertės kiekviename taške ir daro prielaidą, kad tame taške vietos pokytis kinta atsižvelgiant į standartinį nuokrypį:

$$\sigma = K + 1.3 \log(F_{MHz}) \quad (16)$$

kur $K = 1.2$ imtuvams, kurių antenos yra žemiau už kliūtinių zonų aukštį miestuose ir priemiesčiuose, skirtos mobiliosioms sistemoms su nekryptinėmis antenomis automobilio stogo aukštyje;
 $K = 1.0$ imtuvams su antenomis ant automobilio, kai aukštis artimas kliūtinių zonų aukščiai;
 $K = 0.5$ imtuvams kaimiškose vietovėse.

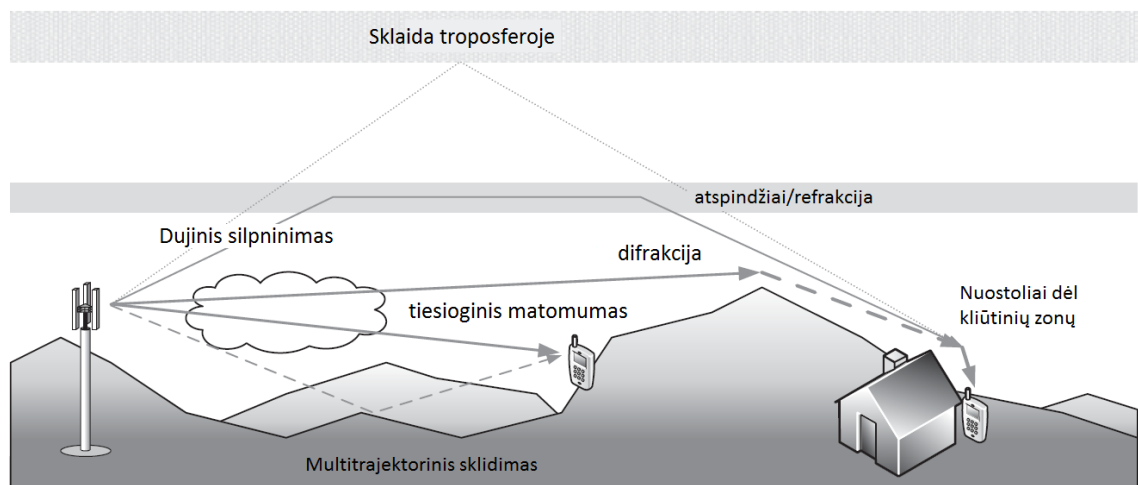


19 pav. P.1546 sklaidimo nuostoliai lygios Žemės atveju, kai $f = 100$ MHz, 1 GHz, 10 GHz, o $p = 1\%$, 50% [20]

1.4.2 ITU-R rekomendacija P.452

Visų pirma, šis modelis patrauklus ne tik todėl, kad gana tiksliai prognozuoja bangų sklaidimą aukštesniuose dažniuose (tuo tarpu P.1546 modelis rekomenduojamas naudoti tik iki 4 GHz), bet ir dėl to, kad jis leidžia įtraukti reljefo ir/arba vietinės kliūčių zonos aukščio įtaką prie lygaus žemės modelio apibrėžiant juos difrakcijos nuostolių dalį.

P.452 modelis yra gerai žinomas, patikimas ir plačiai naudojamas spektro valdymui, dažnių priskyrimui ir trukdžių analizei. Skaičiuojant bangų sklaidimą įtraukiami įvairūs reiškiniai, parodyti 20 pav. Svarbu paminėti, kad jis gali būti naudojamas tiek su reljefo duomenų baze, tiek be jos, tokiu atveju modelis yra lygi Žemė ir yra artimas blogiausiam atvejui (angl. *worst case*), tokį variantą naudoja dalis administracijų reguliavimui. Naudojant reljefą, rezultatai, savaime suprantama, yra tinkami tik tai specifinei vietai, kurioje buvo skaičiuota, todėl labai naudinga dažnių naudojimo koordinavimui ir dažnių skyrimui tikslinėje vietoje. Į P.452 modelį taip pat įeina blogiausio mėnesio, vidutinės metinės statistikos sąvokos[22].



20 pav. P.452 modelyje įskaitomi nuostolių elementai [20]

Skirtumai tarp nuostolių skaičiuojant su reljefu ir be jo gali siekti iki 70 dB. Ši rekomendacija nėra parašyta „nuo nulio“ ir remiasi kitomis rekomendacijomis, pavyzdžiui, difrakcijos modeliu iš ITU-R P.526, dujinio slopinimo modeliu iš ITU-R P.676. Modeliui veikti reikalingas reljefo kelio profilis, kiekvieno kelio segmento klasė (sausuma, pakrantė, jūra), tam naudojami radijo meteorologiniai parametrai ΔN ir N_0 . Modelis veikia tokiu principu: atskirai apskaičiuojami nuostoliai pagal tris galimus radijo bangos sklidimo kelius, vienu atveju įskaičius difrakciją, kitu - bangolaidinį efektą, bei trečiu atveju - troposferinį bangos išbarstymą (sklaidą). Galiausiai šie skaičiavimai susumuojami ir gaunama bendra nuostolių vertė. Modelio trūkumas yra tai, kad jei skirtumas tarp antenų aukščių yra didelis, tai P.452 prognozuos mažesnius nuostolius nei yra iš tikrųjų. Skaičiuojant dėl kliūčių zonų atsirandančius nuostolius įskaitomas d_k - atstumas (km) nuo kliūtinės zonos iki antenos; h - antenos aukštis (m) virš Žemės paviršiaus, h_a - kliūtinės zonos aukštis (m) virš Žemės paviršiaus. Šie parametrai būna įrašyti lentelėje, kuri paremta žemės naudojimo kodu (angl. *land-use code*). Tuomet kliūčių zonų nuostoliai:

$$A_h = 10.25 F_{fc} e^{-d_k} \left\{ 1 - \tanh \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0.625 \right) \right] \right\} - 0.33 \quad (17)$$

kur

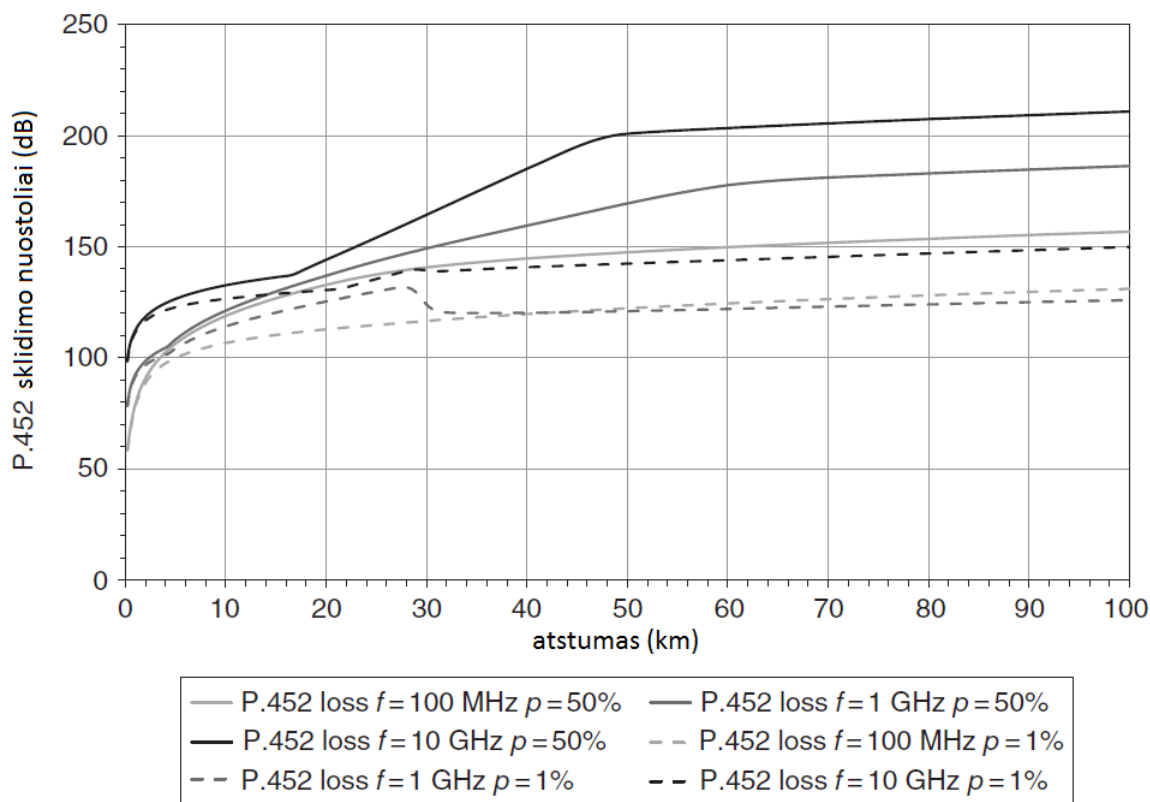
$$F_{fc} = 0.25 + 0.375 \{ \tanh [7.5 (f_{GHz} - 0.5)] \} \quad (18)$$

d_k - atstumas (km) nuo nominalios kliūties taško iki antenos;

h - antenos aukštis (m);

h_a - nominalus klūties zonos aukštis (m)

Tai galima pritaikyti bet kokio aukščio T_x arba R_x stočiai, atvirkščiai nei ITU-R P.1546 ar COST 231 modeliuose, kur reikalaujama, kad kelias būtų nuo aukščiau esančios antenos į žemiau esančią.

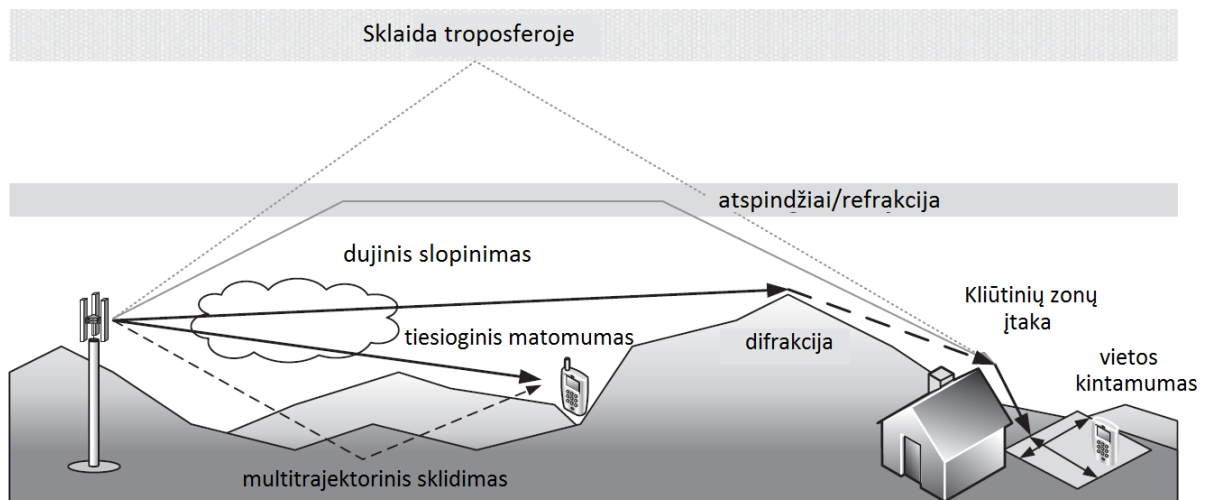


21 pav. P.452 sklaidimo nuostoliai lygios Žemės atveju kai $f = 100$ MHz, 1 GHz, 10 GHz, o $p = 1\%$, 50% [20]

Kaip matome iš 21 pav., yra taškų, kur nuostoliai sumažėja, nors atstumas nuo siųstuvo didėja, taip yra dėl minėto nuostolių komponentų (difrakcijos, atspindžio ir t.t.) sumavimo, kuris būdingas P.452 rekomendacijai. Galbūt ateityje šis modelis turės pataisas, kurios ištaisys šiuos neatitikimus[20].

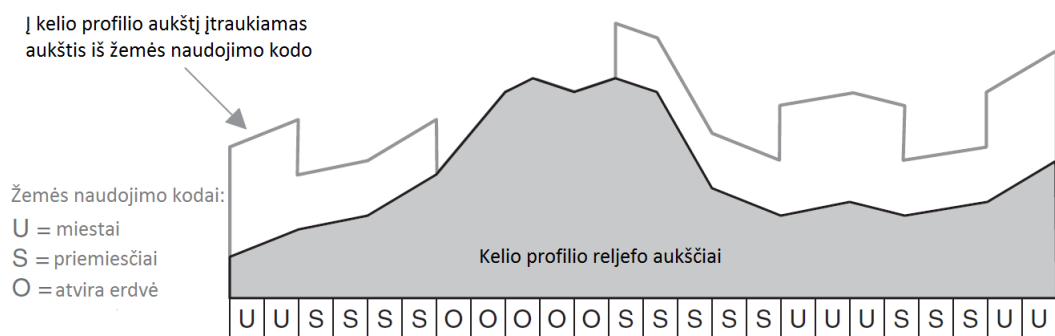
1.4.3 ITU-R rekomendacija P.1812

ITU-R P.1812 rekomendacija yra skirta antžeminėms sistemoms, veikiančioms labai aukštuose (VHF) ir ultra aukštuose (UHF) dažnių ruožuose. Šis modelis atsirado vėliau nei minėti P.452 ar P.1546 modeliai ir jo tikslas yra būti tikslu taškas-plotas modeliu 30-3000 MHz dažnių planavimui. Jį galima naudoti norint apskaičiuoti turimo signalo aprėptį iki 1% laiko tikimybės. Į modelį įskaityti fizikiniai reiškiniai parodyti 22 pav.



22 pav. P.1812 modelyje įskaitomi nuostolių elementai [20]

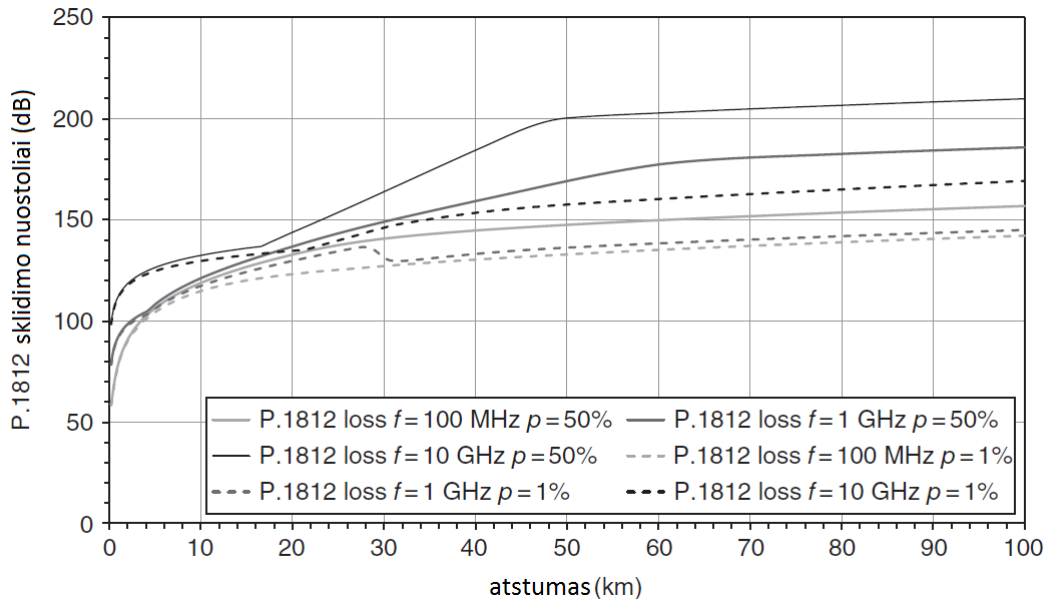
P.1812 modelis gali būti naudojamas tiek su reljefo duomenų baze, tiek be jos, taip pat dalis jo elementų yra naudojami remiantis P.452 ir P.1546 rekomendacijomis (galima tai pamatyti vien pažvelgus į 18 ir 20 pav. ir palyginus juos su 22 pav.), neoficialiai jis dar yra vadinamas „žemesnių dažnių P.452 modeliu“. Iš P.452 rekomendacijos buvo „pasiskolinta“, pavyzdžiui, laisvos erdvės nuostolių įvertinimas, nuostoliai dėl difrakcijos, dujinis slopinimas, atspindžiai/refrakcija, kliūtinių zonų modelis. O iš P.1546 buvo perimtas vietos kintamumo parametras, tik dar pridėtas siaurėjimo (angl. *tapering*) efektas: vietos kintamumas, taip pat ir kliūtinių zonų aukštis, visada bus prilygintas nuliui, jei nebus nurodyta vietovės naudojimo informacija (angl. *land use data*). Nors ir atrodytų, kad P.1812 modelis turėtų prognozuoti panašias aprėpties zonas kaip P.452, tačiau skirtumas išryškėja dėl to, kad P.1812 modelis neįprastai generuoja bangų sklaidimo profilį, sudėdamas reljefo aukštį su kliūtinių zonos aukščiu, kuris būna konkrečiai nurodytas žemės naudojimo duomenų bazėje, toks būdas parodytas 18 pav.



23 pav. P.1812 kelio profilis, kai įskaitomas ir kliūtinių zonų aukštis [20]

Kaip matome, skirtingos raidės (U-miestas, S-priemiestis, O-atvira erdvė) turi priskirtus konkrečius aukščius, kurie nuo vietovės taško nekinta. Šie aukščiai sumuojami su reljefo informacija ir gaunamas galutinis aukštis, kuris įskaitomas skaičiuojant. Tačiau toks būdas turi ir trūkumą, kad reikia

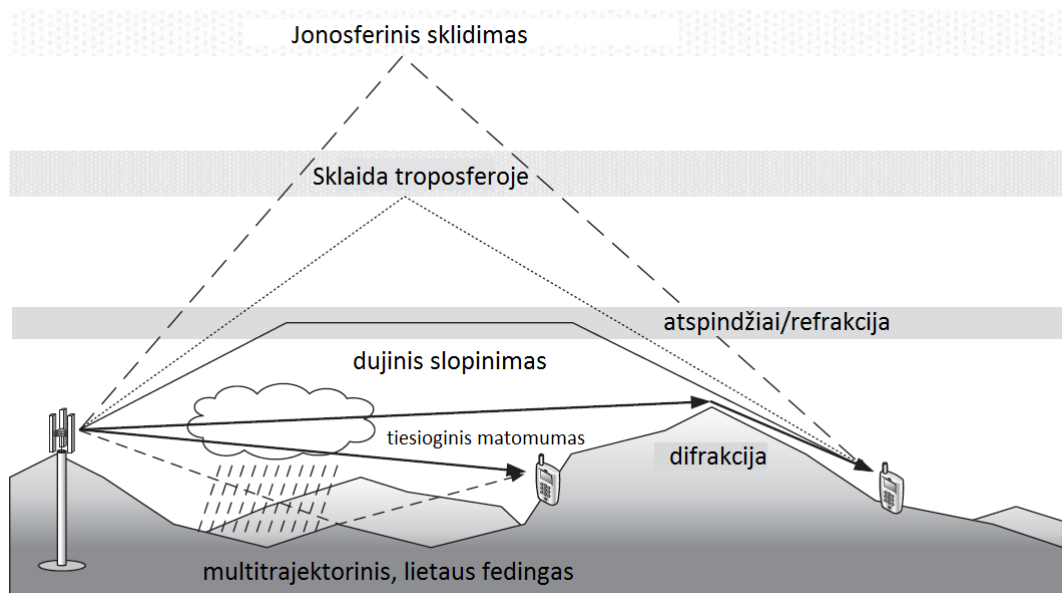
labai kruopščiai įvertinti reljefo informaciją, kad, pavyzdžiui, pastato aukštis nebūtų pridėtas dvigubai. Kaip bebūtų, šis modelis unikalus, nes įvertina pilną kelio profilį, o ne tik horizonto kampus T_x ir R_x stotyse, kaip P.1546. Taip pat po *Ofcom* atliktų eksperimentų paaiškėjo, kad P.1812 modelis turi ir mažesnę klaidos standartinę nuokrypį nei P.1546, tačiau telekomunikacijų pasaulyje šis modelis yra labai šviežias ir reguliuotojai linkę naudoti senbūvį, daugiau nei dešimtmetį naudojamą P.1546[20][23].



24 pav. P.1812 sklaidimo nuostoliai lygios Žemės atveju, kai $f = 100$ MHz, 1 GHz, 10 GHz, o $p = 1\%$, 50% [20]

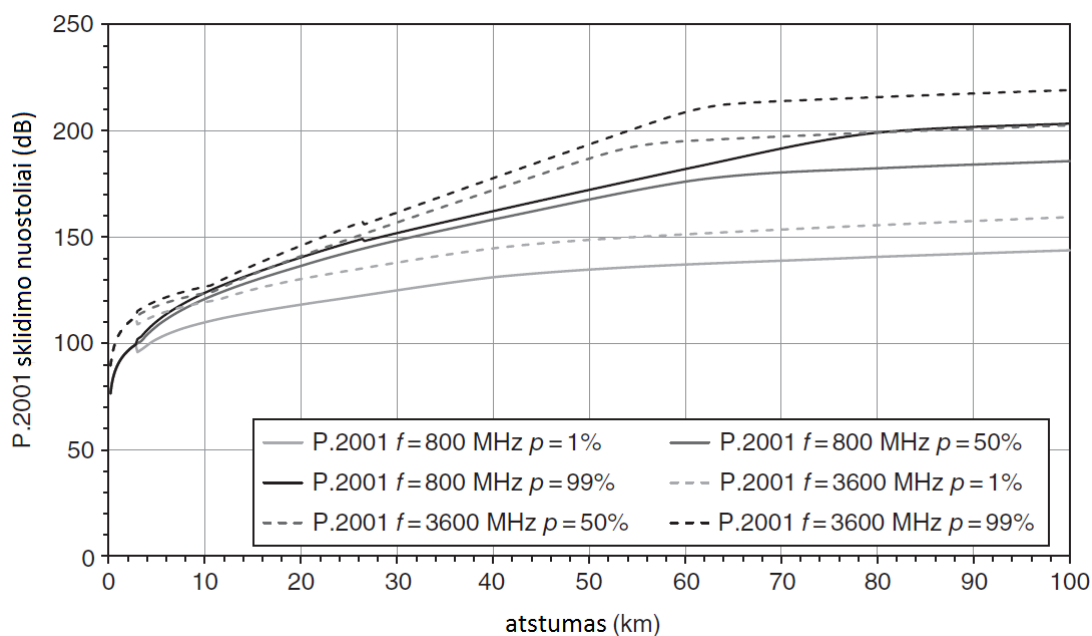
1.4.4 ITU-R rekomendacija P.2001

Gana daug komponentų P.2001 modelis naudoja tokių pačių kaip P.452: pagrindinio kelio nuostoliai, fedingas, difrakcijos nuostoliai, dujinis slopinimas, atspindžiai/refrakcija ir t.t. Unikalus komponentas šiame modelyje yra jonosferinis sklaidimas (angl. *ionospheric propagation by sporadic-E*), kuris gali būti gana svarbus radijo bangai sklindant ilgus atstumus, naudojant žemus dažnius.



25 pav. P.2001 modelyje įskaitomi nuostolių elementai [20]

Kaip matome, P.2001 modelis yra labai panašus į P.452, tik dar pridėtas fedingas (multitrajektorinis ir lietaus) bei sklaidimo jonosferoje modelis. Kuo P.2001 modelis skiriasi nuo kitų? P.452 ir P.1812 sklaidimo modeliai gali būti naudojami tiek taškas-taškas, tiek taškas-plotas sklaidimo analizei, apima didelį plačiai naudojamų dažnių ruožą, įskaito reljefą, klimato parametrus, kliūtines zonas. Tačiau abu turi ribotą laiko tikimybės parametą, kurio didžiausia vertė gali būti tik 50%, todėl su jais negalima sumodeliuoti reikalingo naudingojo signalo sumažinimo, norint išvengti fedingo, tam reikia 99% laiko tikimybės. Taip pat Monte Karlo analizė apima laiko procentų tolygų parinkimą intervale [0,100], todėl naudojant P.452 ar P.1812 modelį analizei būtų gautas tik pusėtina ir netiksli statistika. Iš P.2001 trūkumų galima paminėti, kad jis neturi kliūtinių zonų modelio, tačiau planuojama jį įtraukti ateityje, naudojantis P.452 arba P.1812 pagrindu. Taip pat šiame modelyje nėra vietos kintamumo parametro. Galbūt jis taip pat bus pridėtas ateityje, nes kol kas yra paskelbta tik trečia šio modelio versija, palyginimui P.452 jau turi 16 versijų [20][24].



26 pav. P.2001 sklaidimo nuostoliai lygios Žemės atveju, kai $f = 100 \text{ MHz}$, 1 GHz , 10 GHz , o $p = 1 \%$, 50% [20]

1.4.5 Standartinio nuokrypio ir vidutinės paklaidos reikšmė, renkantis modelį

Standartinis nuokrypis apibrėžiamas taip: tai dydis, nusakantis atsitiktinio dydžio įgyjamų reikšmių sklaidą apie vidurkį. Jį gauname apskaičiavę skirtumo tarp pamatuotos ir apskaičiuotos verčių vidurkį skurtumą pakeliant kvadratu ir ištraukiant šaknį pagal formulę:

$$SD(dB) = 10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (FS_{diff_i} - FS_{diff})^2}{N-1}} \right) \quad (19)$$

Vidutinė paklaida - tai pamatuotų ir paskaičiuotų verčių skirtumo vidurkis:

$$MeanError(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N FS_{eksp.} - FS_{teor.}}{N} \quad (20)$$

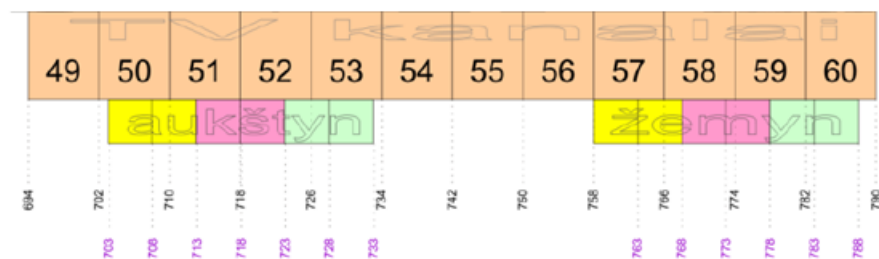
Tiek kuriant naują sklaidimo modelį, tiek derinant jau esamą, tiek renkantis, koks yra tinkamiausias, reikia atsižvelgti, kad rezultatai būtų artimi šiems intervalams: vidutinė paklaida $\in [-2;2] \text{ dB}$, o standartinis nuokrypis $\in [0;7] \text{ dB}$. Pavyzdžiui, jei vidutinė paklaida didelė, tai vidutiniškai skirtumas tarp matavimų ir skaičiavimų irgi yra didelis, tai reiškia modelis netikslus.

2 Tyrimo metodika

Tiek 700 MHz, tiek 3500 MHz radijo dažnių juostų naudojimas 5G Lietuvoje yra gana problematiškas dėl čia veikiančių kitų technologijų ir galimų trukdžių tikimybės dėl sutaptinių bei kaimyninių dažnių naudojimo, todėl svarbu įvertinti, ar naujas tinklas netrukdytų, o jei trukdytų - koks trukdžių mastas.

2.1 Situacija 700 MHz radijo dažnių juostoje

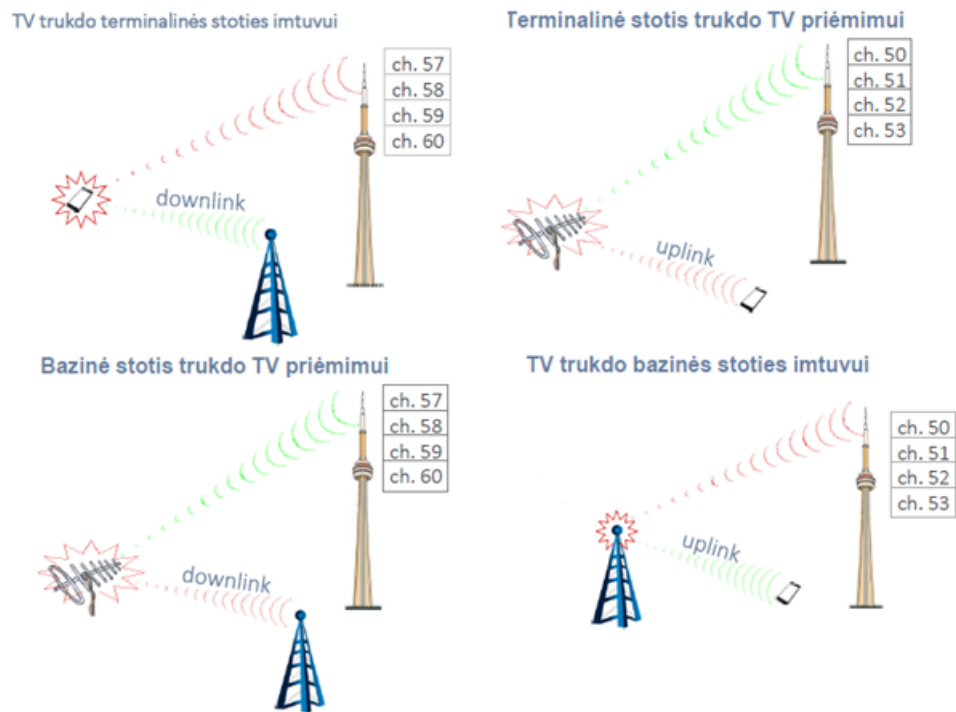
Radijo dažnių juosta 694-790 MHz yra priskirta antžeminės televizijos kanalams (27 pav.). Televizijos stotys šiais dažniais veikia tiek Lietuvoje, tiek kaimyninėse valstybėse. Televizijos kanalų juostos plotis yra 8 MHz (oranžinė spalva), o LTE paprastai 5, 10, 20 MHz. 700 MHz dažnių juostos naudojimo leidimai Lietuvos televizijoms yra išduoti iki 2022 metų, o 5G tinklą vystyti norima jau ateinančiais metais. Į reikalingą 5G diapazoną patenka kanalai nuo 49 iki 60. Paveikslėlyje geltona, rausva ir žalia spalva taip pat pažymėti galimi LTE/5G kanalai, naudojantys dažninį tankinimą, 50-53 kanaluose veiktų aukštynkryptis ryšys, 57-60 kanaluose - žemynkryptis. Reikia pažymėti, kad šiame diapazone dar veikia ARNS (oro navigacijos) tarnyba, tačiau suderinamumas su ja jau yra iširtas ir šiame darbe įvertinsime suderinamumą būtent su televizija.



27 pav. 694-790 MHz juostos pasiskirtymas kanalais

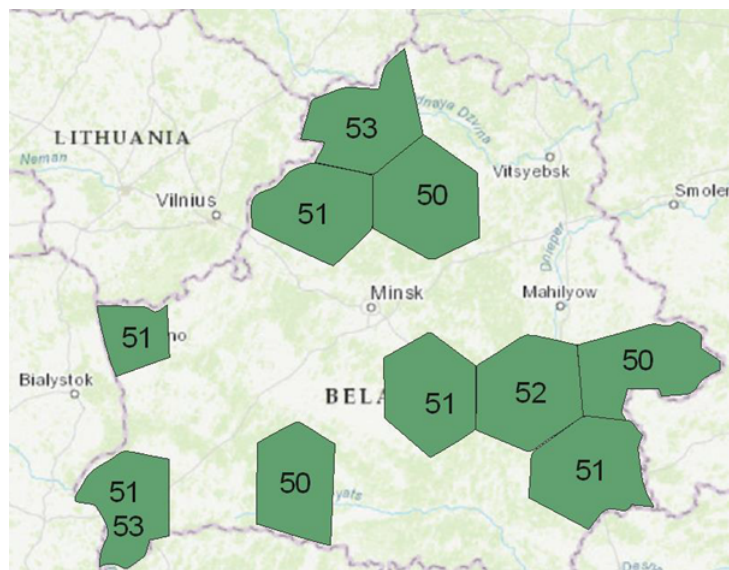
Tam, kad antžeminė televizija ir 5G judrusis ryšys veiktų be trukdžių, reikia išspręsti šias suderinamumo problemas (28 pav):

1. Aukštynkrypčio ryšio pažeidžiamumas (50-53 televizijos kanalai);
2. LTE žemynkrypčio ryšio įtaka televizijos kanalų duplexiniame tarpe (54-56 kanalai) bei 40-49 kanalų priėmimui;
3. LTE aukštynkrypčio ryšio įtaka televizijos priėmimui;
4. LTE žemynkrypčio ir aukštynkrypčio ryšio įtaka kaimyninių valstybių televizijos priėmimui.



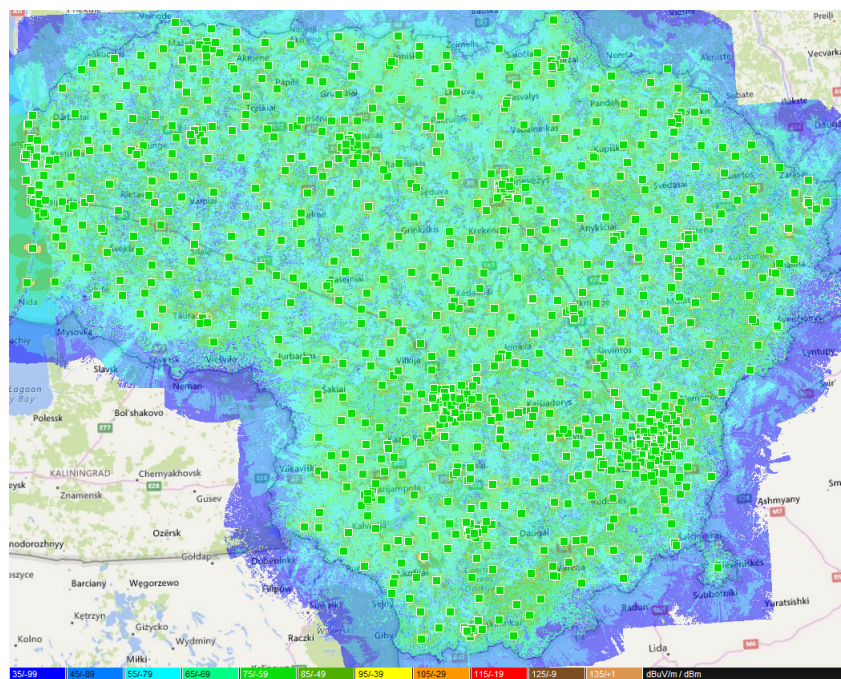
28 pav. Galimų trukdžių 700 MHz juostoje atsiradimo priežastys

Šiame darbe išnagrinėtas atvejis, kaip terminalinė stotis trukdytų TV priėmimui. Programinės įrangos *ICS Telecom* pagalba buvo sumodeliuotas tinklas Lietuvos teritorijoje, kurio terminalinių stočių siųstuvai (aukštynkryptis ryšys) naudoja vieną iš televizijos kanalų dažnių, aktualūs 50-53 kanalai. Buvo naudojamos Operatoriaus X oficialiai registruotos LTE bazinės stotys, veikiančios 800 MHz dažnių juostoje, darant prielaidą, kad ši įranga pagal parametrus gali veikti ir 700 MHz dažniuose. Iš viso buvo skaičiuojama su 3059 bazinėmis stotimis bei pridėtos duomenų bazėje esančios veikiančios televizijos stotys ir realūs jų parametrai. Skaičiavimams paklaidų tikimybė yra nedidelė, nes televizijos stotys, galima sakyti, yra labai netoli Lietuvos pasienio, todėl trukdžius įvertinti yra paprasta, nes nereikia baimintis trukdžių dėl didelio atstumo ar netoli esančios kitos valstybės televizijos stočių.



29 pav. 50-53 kanalų stočių išsidėstymas Baltarusijos teritorijoje

Pirmaisiai reikia apskaičiuoti įprastą terminalinių stočių aukštnkrypčio ryšio aprėptį 1,5 m aukštyje, tam naudojame P.1546-5 rekomendaciją bei 50% laiko tikimybę. Aprėptis gaunasi arti 100% Lietuvos teritorijos. Turint stočių aprėptis bus galima vertinti žalingų trukdžių įtaką ir dėl jų sumažėjusią aprėptį.



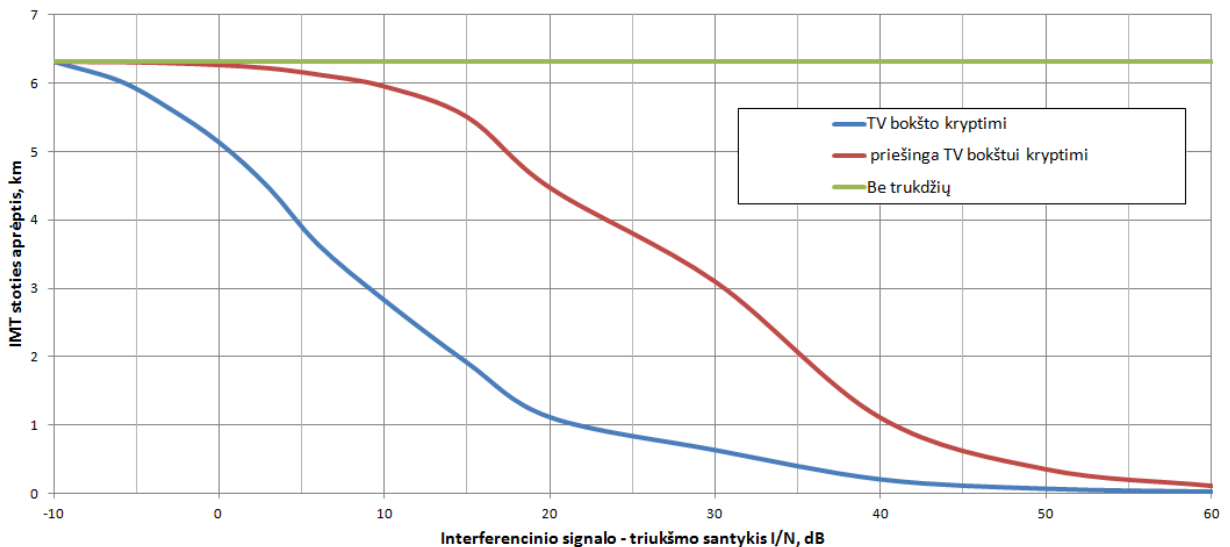
30 pav. 700 MHz aukštnkrypčio ryšio aprėptis, esant 1,5m aukščiui

Jeigu nėra jokių išorinių trukdžių, tai bazinės stoties aprėptis apribota tik nuosavaisiais trukdžiais, tačiau jeigu yra žalingus trukdžius keliantis signalas, atsiranda triukšmai ir dėl jų aprėptis mažėja,

didėjant I/N santykiui. Tuo galima įsitikinti įvertinus šią priklausomybę pagal laisvos erdvės nuostolių formulę:

$$FSPL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_t - G_r \quad (21)$$

kur G_t - siųstuvo stiprinimas, G_r - imtuvo stiprinimas, d - atstumas tarp antenų, f - dažnis. Galima pažiūrėti, kokio atstumo reikia, kad išlaikytume $C/(N+I) = 0$ santykį (minimali sąlyga stočiai veikti). Jei trukdantis signalas nukreiptas bazinės stoties kryptimi, tai atstumas (aprėptis) mažėja sparčiau (31 pav.).



31 pav. IMT radijo ryšio stočių aprėpties priklausomybė nuo I/N santykio

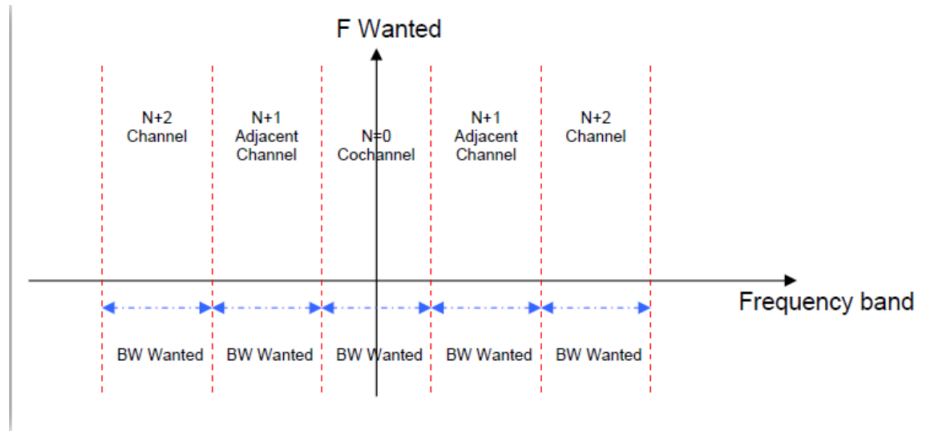
Žalingus trukdžius įvertinti yra daug būdų, vienas iš jų yra stebėti, kaip keičiasi toleruotino trukdžių lygio prastėjimas (angl. *Threshold Degradation*) esant skirtingiems trukdančių televizijos stočių lygiams. Ši funkcija atsižvelgia į visus objektus, esančius žemėlapyje. Kadangi *ICS Telecom* stočių būsenos gali būti dvi - aktyvi ir pasyvi, tai pasirenkame, kad būtų skaičiuojama pasyviųjų (televizijos stočių) įtaka aktyviosioms. Aukštnykrypčio ryšio stočių aprėptis skaičiuota 1,5 metrų aukštyje, kadangi tai yra terminalinė stotis, stočių plotis 5 MHz, taip pat reikia įvertinti šiluminio triukšmo faktorių (angl. *thermal noise floor factor*, kTBF). Jei stotis dirba 10 MHz dažniu, tai kTBF = -110 dBm, jei 5 MHz, tai kTBF = -113 dBm (32 pav.).

32 pav. kTBF skaičiavimas ICS Telecom programoje

Bendrai kalbant, kTBF yra imtuvo jautrumo parametras, priklausantis nuo kanalo pločio bei šiluminio faktoriaus. Taip pat reikia nustatyti, ar skaičiuojame trukdžių lygį tarp sutaptinių dažnių, ar įtraukiame ir gretutinius. ICS Telecom programoje, pasirinkus „Threshold degradation“ skaičiavimo funkciją, atsidaro langas, kuriame galima nustatyti atmetimo parametrus (angl. *rejection factors*), į kuriuos reikia atsižvelgti atliekant trukdžių skaičiavimus naudojant šį metodą (33 pav.).

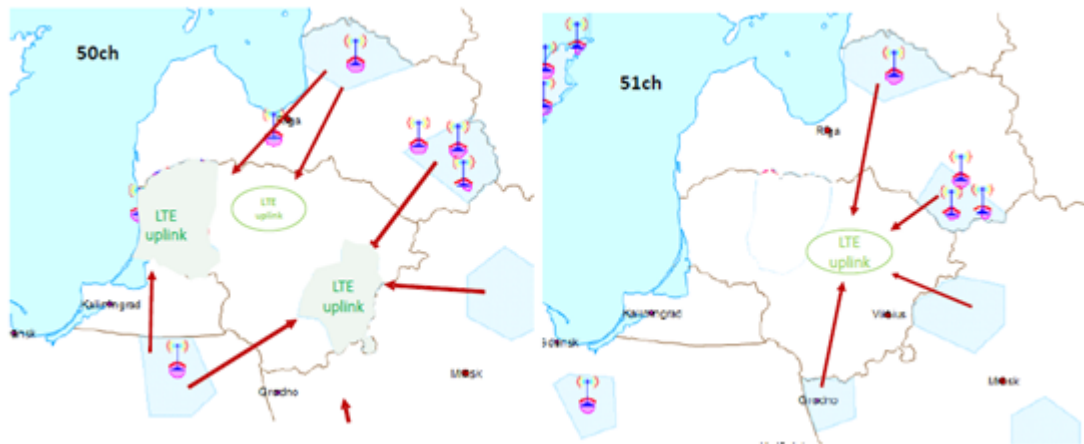
33 pav. ICS Telecom programos langas

Kai pažymėta tik N=0, tai skaičiuojama tik sutaptinių dažnių interferencija, kai N=1, 2, ... n, tai įtraukiami ir kaimyniniai kanalai, kuo N didesnis, tuo platesnis dažnių juostos plotis įtraukiamas ir tuo trukdžių mastas didesnis (34 pav.).



34 pav. Juostos pločio priklausomybė nuo N vertės

Gautus teorinius rezultatus reikia patikrinti ir eksperimentiškai. Su Operatoriaus Y pagalba ir turimu inventoriumi laikinai buvo įjungta bazinė stotis Lietuvos rytiniame pasienyje ir pamatuotas aukštynkrypčio signalo lygis esant žalingiems trukdžiams nuo antžeminių televizijos stočių, esančių Baltarusijoje (35 pav.), taip pat ir RSRP aprėptis (žemynkryptis ryšys). Gauti rezultatai bus pateikti vėliau.

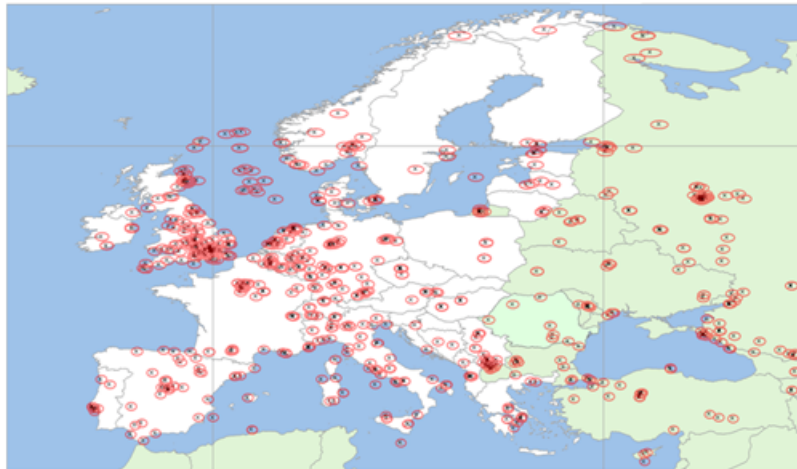


35 pav. Televizijos trukdžiai į aukštynkrypčio ryšio radijo dažnių juostą (703-718 MHz)

2.2 Situacija 3500 MHz radijo dažnių juostoje

Kaip aptarėme anksčiau, 3400-3600 MHz juostoje pirmumo teisę turi tiek fiksuotoji, tiek judrioji tarnybos, tačiau radijo reglamente yra pastaba, kuri jį padaro antrine atžvilgiu Žemės stočių, 3600-4200 MHz juostose pirmumo teisę turi fiksuotoji tarnyba ir tik antrinę - judrioji (1 pav.). Viena iš fiksuotosios tarnybos rūšių yra palydovas-Žemės stotis ryšys. Žemės stotis – tai Žemės paviršiuje arba oro erdvėje esanti stotis, skirta palaikyti ryšiui su viena ar daugiau kosminių stočių arba su viena ar daugiau tos pačios rūšies stočių. 3400 - 4200 MHz radijo dažnių juosta fiksuotoji palydovinė tarnyba (FSS) naudojasi jau daugiau nei 40 metų. Ši spektro dalis yra pigi, negana to, atmosferos sugertis

yra nedidelė, palyginus su kitomis juostomis, ši juosta turi „imunitetą“ krituliams (vandens lašeliams, dulksnai), o tai yra būtina sąlyga jautriems Žemės stočių imtuvams. Be to, technologiją galima naudoti ir drėgnose klimato juostose, pavyzdžiui, tropikuose, jūrinėse valstybėse. Taip pat ši juosta turi gana didelę aprėptį palyginus su kitomis palydoviniam ryšiu skirtomis juostomis, tai lemia pigesnę eksploatavimą ir yra naudinga besivystantiems regionams [25]. Žemės stotys, Europoje veikiančios 3400-4200 MHz dažnių ruože, pavaizduotos 36 pav.



36 pav. Žemės stotys, Europoje veikiančios 3400-4200 MHz dažnių ruože. Raudonai apibrėžtas 35 km spindulys aplink stotį

FSS Žemės stotys paprastai skirstomos į keturias grupes:

1. Žemės stotys, kurių vieta neprivalo būti apibrėžta ir kurioms nereikia koordinavimo su kitomis valstybėmis ar veikimo licencijos;
2. Žemės stotys, kurios turi būti atskirai licencijuojamos/koordinuojamos;
3. Žemės stotys, naudojamos telemetrijai;
4. Žemės stotys, kurios yra judriojo palydovinio ryšio sistemų šaltinis (angl. *feeder*) [26].

Šiame darbe kaip pavyzdį išnagrinėsime trukdžius tarp Karaliaučiaus srityje esančios Žemės stoties, kuri yra koordinuojama ir turi fiksuotą vietą, ir Lietuvoje esančių judriojo ryšio bazinių stočių. Aktualūs trukdžiai, atsirandantys Žemės stoties imtuve, priėmus signalą iš netoli esančio judriosios tarnybos siųstuvo, veikiančio tuo pačiu dažniu. Žemės stotims būdingi parametrai nurodyti 37 pav. Trukdžiai žalingi tuo, kad iškraipoma arba negrįžtamai prarandama informacija signalo, kurį buvo numatyta priimti. Reikia įvertinti, koks yra saugus atstumas statyti bazines stotis, norint išvengti signalų iškraipymo. Situaciją apsunkina tai, kad Žemės stočių imtuvai yra be galo jautrūs. Taip pat pažiūrėsime, kaip atrodytų situacija, remiantis ITU ir CEPT siūlomais kriterijais.

Parametras	Tipinė vertė
Dažnių ruožai	3 400-4 200 MHz, 4 500-4 800 MHz
Antenos skersmuo (m)	1,2, 1,8, 2,4, 3,0, 4,5, 8, 16, 32
Antenos modelis	Nurodytas ir aprašytas ITU-R S.465 rekomendacijoje
Būdingas juostos plotis	40 kHz – 72 MHz
Įmtuvo sistemos triukšmo temperatūra	100 K mažesnėms antenoms (1,2-3 m) 70 K didesnėms antenoms (4,5 metrai ir daugiau)
Vietovės, kuriose gali veikti	Visi regionai, visos vietovės (tiek kaimo, tiek miesto) ¹
Galios srauto tankis Žemės paviršiuje, gaunamas iš palydovo	Remtis RR 21.16 punktu, bei ten pat esančia lentele 21-4

37 pav. Žemės stotims būdingi parametrai

2.3 Situacija 26 GHz radijo dažnių juostoje

WRC-19 metu 26 GHz dažnių juosta pasaulyje priskirta judriajam ryšiui. Šioje juostoje taip pat pirmenybinę teisę turi Žemės stotys, priklausančios Žemės stebėjimo palydovų tarnybai (angl. *Earth Exploration satellite Service*). RRT 2019 metų pabaigoje paskelbus viešąją apklausą dėl 5G plėtros 26 GHz radijo dažnių juostoje, buvo išsiaiškinta, kad realus panaudojimo poreikis gali atsirasti po 3-5 metų, o gal ir dar vėliau, nes šiuo metu prioritetinės radijo dažnių juostos yra 3400-3800 MHz bei 694-790 MHz. Tam, kad 24,25-27,5 GHz dažnių juosta būtų maksimaliai efektyviai išnaudota, operatoriams reiktų bent 800 MHz pločio kanalo, tokio dydžio juostos plotis atitiktų dabartines naudojamos įrangos galimybes [27].

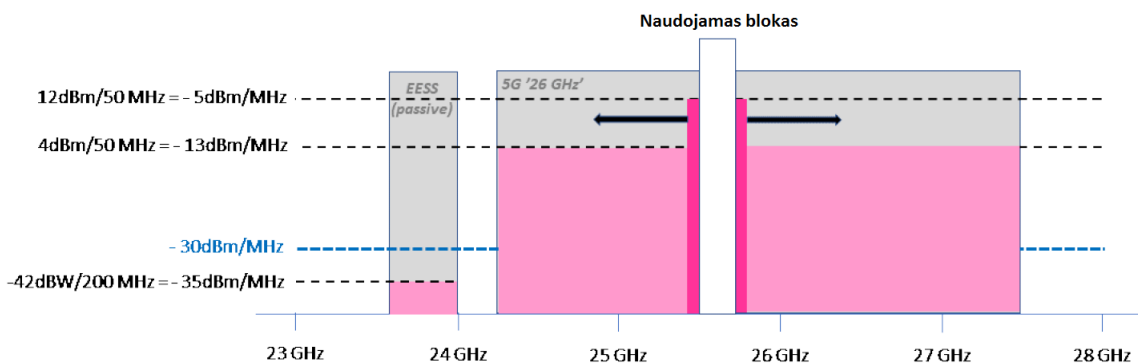
PT1 grupė šiuo metu atlieka studijas 24,25-27,5 GHz juostoje bei turėjo sukurti kanalų išsidėstymo tvarką bei nustatyti minimalias, mažiausiai „varžančias“ technines sąlygas, įvertinti tarpvalstybinio koordinavimo reikalavimus. Rezultatai pateikti CEPT 68 ataskaitoje [28]. Šioje ataskaitoje pažymima, kad 26 GHz dažniausiai naudojama būtų tik tam tikruose taškuose, nedidelėse teritorijose, kur būna didelė tinklo apkrova (pvz. oro uostuose). CEPT ataskaitoje taip pat pateikiamos 26 GHz dažnių juostos naudojimo gairės ir techninės sąlygos, taikomos antžeminėms belaidžio plačiajuosčio elektroninio ryšio paslaugoms, įskaitant 5G, siekiant užtikrinti esamų kosminių ir palydovinių tarnybų bei fiksuotojo ryšio linijų 26 GHz dažnių juostoje ir gretimų juostų tarnybų apsaugą. Šios ataskaitos išvados pateiktos ECC 18(06) sprendime dėl suderintų 24,25-27,5 GHz juostos judriojo/fiksuotojo ryšio tinklų (MFCN) techninių sąlygų bei įgyvendinimo sprendimo projekte RSCOM18-41 [29]. Kalbant apie 26 GHz juostoje veikiančias tarnybas, reiktų paminėti šias:

- Fiksuotoji tarnyba (FS) - fiksuotos mikrobangų jungtys, naudojamos taškas-taškas arba taškas-keli taškai ryšiui. 68 pranešime pažymima, kad kai kuriose CEPT šalyse FS naudojama plačiai, pagrinde miestuose, mobiliųjų tinklų infrastruktūrai.
- Žemės stebėjimo palydovinė tarnyba (angl. *Earth Exploration Satellite Service* (EESS)) ir kosminių tyrimų tarnyba (angl. *Space Research Service* (SRS)) - siunčiami surinkti duomenys iš

palydovų į Žemės stotis (kurios dirba tik kaip imtuvai ir jų yra palyginti nedaug) 25,5-27 GHz juostoje Tarppalydovinė tarnyba (ISS) - ryšys tarp palydovų (paprastai negeostacionarių jutiklių) ir geostacionarių duomenų perdavimo palydovų. Naudojami 24,25-24,75 GHz ir 25,25-27,5 GHz dažniai.

- Fiksuotoji palydovinė tarnyba (FSS) - ryšiui naudojama 24.65-25.25 GHz juosta.
- Automobilių trumpo nuotolio radaras (SRR) - naudojama 24,25–26,65 GHz juosta, tačiau palapsniui pradedama pereiti prie 77–81 GHz dažnio.
- Mažo nuotolio įrenginiai (SRD), įskaitant plačiajuosčius jutiklius, skirtus rezervuarų lygiui nustatyti, kurie visoje juostoje veikia kaip „persiklojanti” (angl. *underlay*) tarnyba, ir transporto bei eismo telematikos prietaisai, tokie kaip automobilių radarai, naudojantys 24,25–24,5 GHz dažnių juostą.
- Sistemos, veikiančios gretimuose dažniuose, pavyzdžiui, pasyvosios palydovinės tarnybos 23,6-24 GHz dažnių juostose.

Minėtuose dokumentuose nurodoma, kad dažnių išdėstymas bus nesuporuotas TDD, kurio bloko dydis 200 MHz. Norint maksimaliai išnaudoti spektrą, galėtų būti naudojami ir mažesni, 50 MHz blokai. TDD veikimas turėtų būti sinchronizuotas tarp operatorių. Techninėse sąlygose daroma prielaida, kad 26 GHz juostoje bus taikomas „individualaus leidimo” principas, kuris leistų išlaikyti kontrolę vystantis 5G tinklams ir leistų koordinuoti vietas, kur stovėtų stotys, su atskiromis Žemės stotimis. Emisijos gaubtinę (angl. *emission mask*) sudaro šie elementai: 50 MHz dažnio gabalėlis virš ir prieš naudojamą kanalą yra apribojamas -12 dBm/50 MHz tam, kad būtų apsaugoti gretimi kanalai. 4 dBm/50 MHz riba, siekiant apsaugoti kitus veikiančius šioje juostoje tinklus; Papildoma -42 dBW/200 MHz riba, siekiant apsaugoti pasyvius palydovinius jutiklius, veikiančius 23,6-24 GHz dažniu, kurią ES jau pakeitė į -39 dBW/200 MHz. 38 paveikslėlyje žemiau yra pavaizduoti šie ribojimai, tariant, kad jie būtų naudojami 5G ryšio perdavimui 200 MHz kanale, kurio centrinis dažnis 25,6 GHz. Visos taikomos galios sunormalizuotos į dBm/MHz. Taip pat nurodyta -30 dBm/MHz riba, įprastai taikoma į juostą nepatenkančiai spinduliuotei, bei terminalo stotims 23,6-24 GHz taikomas 4 dB sumažinimas[28][29].



38 pav. Emisijos gaubtinė, taikoma 26 GHz[30]

Išvengti trukdžių Žemės stotyse padėtų racionalus mąstymas - naujas Žemės stotis įrengti toliau nuo tankiai apgyvendintų vietovių ar ten, kur vykdoma aktyvi žmogaus veikla. Bepiločių orlaivių, tokių kaip dronai, naudojimas eksploatuojant antžeminius belaidžio plačiajuosčio elektroninio ryšio tinklus, veikiančius 26 GHz dažnių juostoje, taip pat galimai trukdytų FSS ir ISS palydoviniams imtuvams. Išėitis būtų užprogramuoti bazinės stotis, kad šios nesijungtų su dronais, tik priimtų signalą iš jų. Tam reikia atlikti papildomą tyrimą, kurį užbaigus gali būti parengtos papildomos suderintos techninės sąlygos.

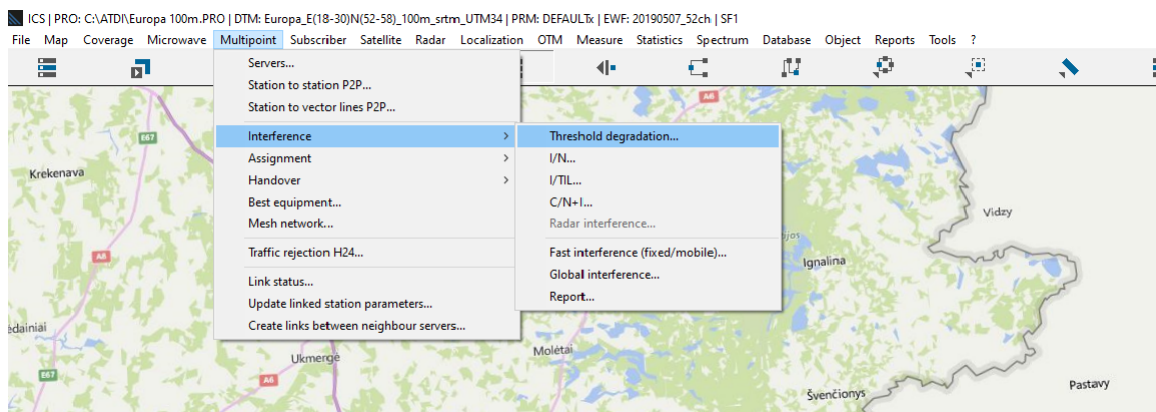
3 Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

Skaičiavimai bus atliekami su radijo ryšio planavimui bei dažnių valdymui naudojama programine įranga *ICS Telecom*, kurioje yra visi reikalingi tyrimui sklidimo modeliai, taip pat galimybė tiksliai įvertinti trukdžius.

3.1 Rezultatai 700 MHz juostoje

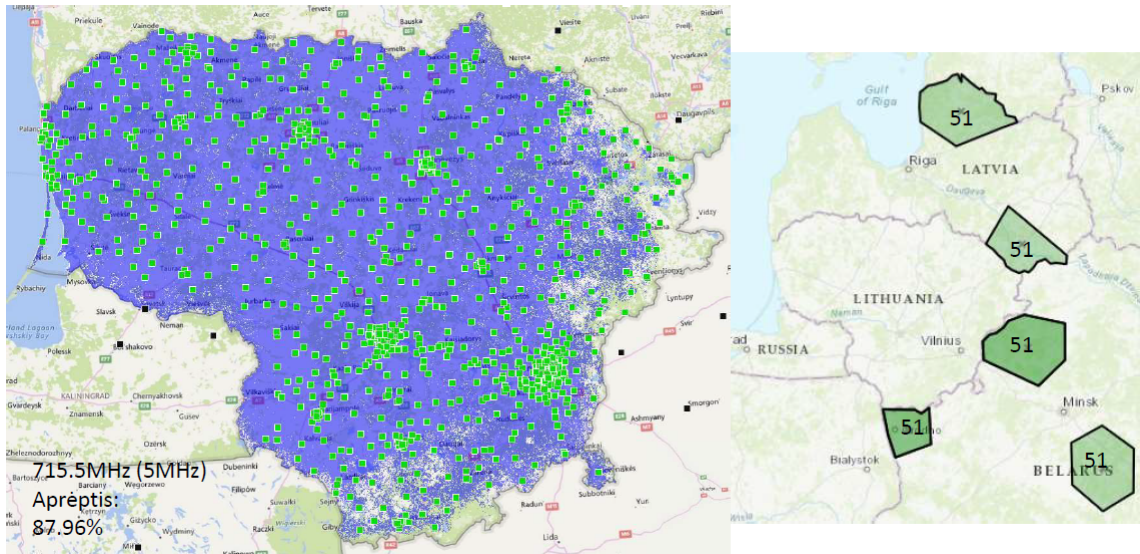
Turėdami pradinę bazinių stočių aprėptį (30 pav.) galime palyginti ją su pakitusia aprėptimi dėl trukdžių. Tai atlikti leidžia *ICS Telecom* programinės įrangos funkcija „*Threshold degradation*“ (39 pav.). Imtuvo slenkstis (threshold) yra apibrėžiamas kaip priimto naudingojo signalo lygis nustatytam klaidingų bitų skaičiui (BER). Atsiradus trukdžius keliančiam signalui, reikia stipresnio naudingojo signalo imtuve, kad būtų išlaikytas tas pats BER. TD skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$TD = 10 \log(1 + 10^{(I-N)/10}) \quad (22)$$



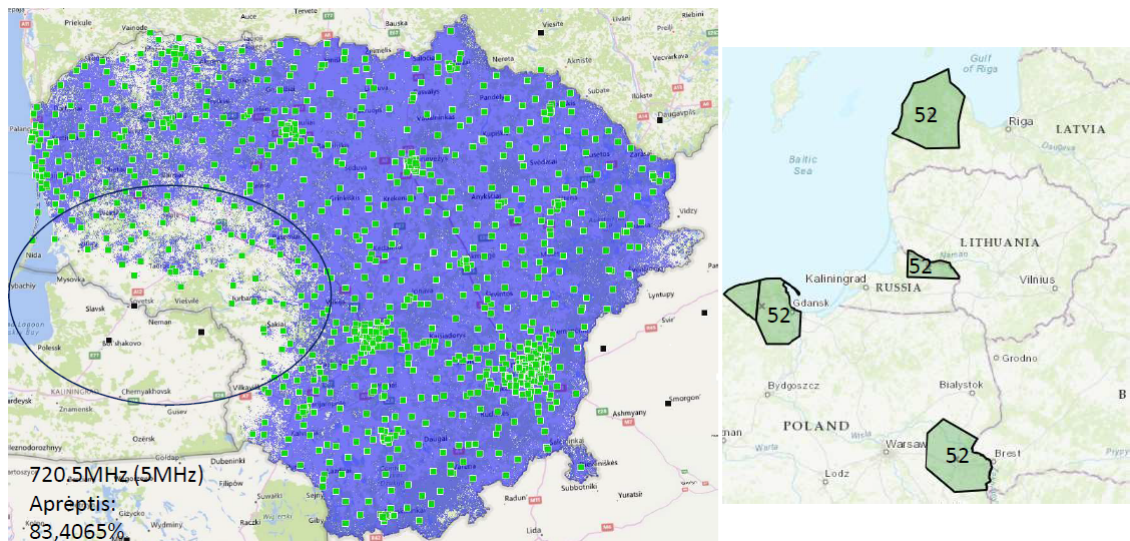
39 pav. „*Threshold degradation*“ funkcija *ICS Telecom*

TD yra skirtumas tarp išaugusio imtuvo priimamo signalo slenkščio dėl interferencijos ir tarp slenkščio vertės be interferencijos, t.y. yra proporcingas triukšmo lygio padidėjimui imtuve dėl žalingų trukdžių. Aukštynkrypčio ryšio stočių aprėptis skaičiuota 1,5 metrų aukštyje, kadangi tai yra terminalinė stotis. Taip pat reikia įvertinti šiluminio triukšmo faktorių (angl. *thermal noise floor factor*, kTBF). Jei stotis dirba 10 MHz dažniu, tai kTBF = -110 dBm, jei 5 MHz, tai kTBF = -113 dBm. Nustatome, kad terminalinės stotys veiktų 713-718 MHz dažniu (centrinis dažnis 715,5 MHz, kanalo plotis 5 MHz, kTBF -113 dBm). Tuomet programoje įvedami tikrų veikiančių televizijos stočių parametrai, jas deaktivuojame, o terminalines stotis aktyvuojame. Programos pagalba paskaičiuojame, kokius trukdžius patirs kiekvienas terminalinės stoties imtuvas ir perskaičiuojame stočių aprėptį, šį kartą įskaičiavę ir TD vertes kiekvienai stotiai. Kaip matome 40 paveiklėlyje, aprėptis ryškiai sumažėjo (87.96% Lietuvos teritorijos aprėptis) dėl čia veikiančio 51 televizijos kanalo.



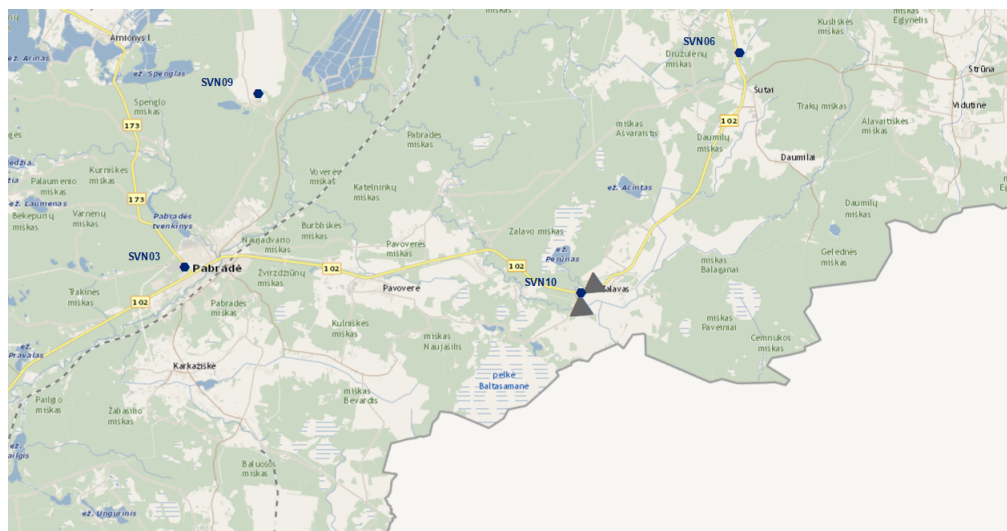
40 pav. Televizijos 51 kanalo trukdžiai į judriojo ryšio stotis, veikiančias 713-718 MHz dažnyje

Kadangi rezultatai prasti, reikia pažiūrėti, gal kitame dažnių ruože trukdžiai būtų mažesni. Nustatome terminalines stotis veikti 718-723 MHz dažniu. Atliekame tuos pačius žingsnius kaip prieš tai. Kaip matome iš 41 paveikslėlio, rytinėje dalyje aprėpties situacija nepalyginamai geresnė, tačiau dabar trukdžius jaustų Lietuvos pietvakarių zona, nes ten turi teisę veikti 52 televizijos kanalas.



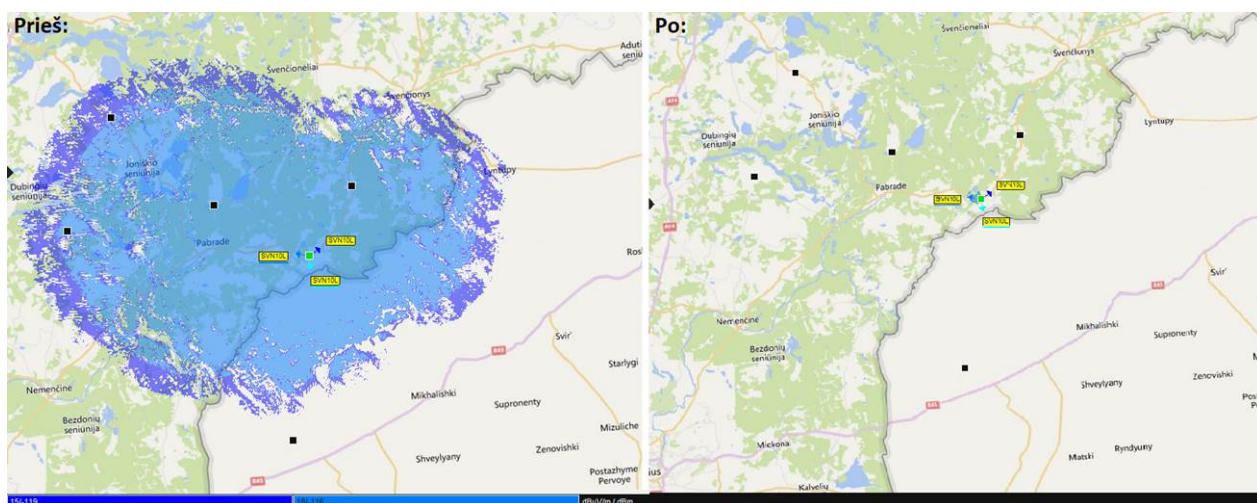
41 pav. Televizijos 52 kanalo trukdžiai į judriojo ryšio stotis, veikiančias 718-723 MHz dažnyje

Teorinius rezultatus galima patikrinti ir eksperimentiškai. Buvo išrinkta jau registruota bazinė stotis, esanti netoli Lietuvos ir Baltarusijos pasienio. Šiai stočiai buvo išduotas laikinas leidimas veikti 700 MHz juostoje, tiksliau, 713-723 MHz dažniuose aukštynkrypčiam ryšiui bei 768-778 MHz žemynkrypčiam. Tuomet parinkome porą jos sektorių, veikiančių 55° ir 175° azimutu, kad antenos būtų orientuotos į 51 kanalo stotį Baltarusijoje, kitaip eksperimentas būtų netikslingas (42 pav.). Nuspręsta eksperimentą atlikti su 5 MHz juostos pločio stotimi, kurios centrinis dažnis 715.5 MHz.



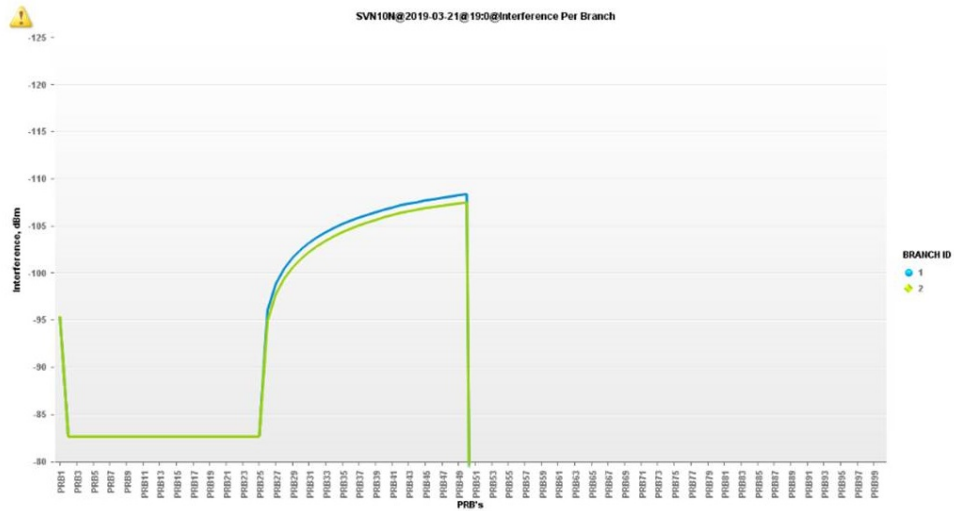
42 pav. Eksperimentinė stotis bei jos sektoriai

Iš arčiau patyrinėjus su programine įranga sumodeliuotą eksperimentinės stoties aprėptį galima matyti, kad ši stotis turėtų visiškai paskęsti trukdžiuose ir nebelikti naudingojo signalo dėl interferencijos su per arti stovinčiais televizijos stotimi, aprėpties zona gaunama apie 1,2 km nuo stoties (43 pav).

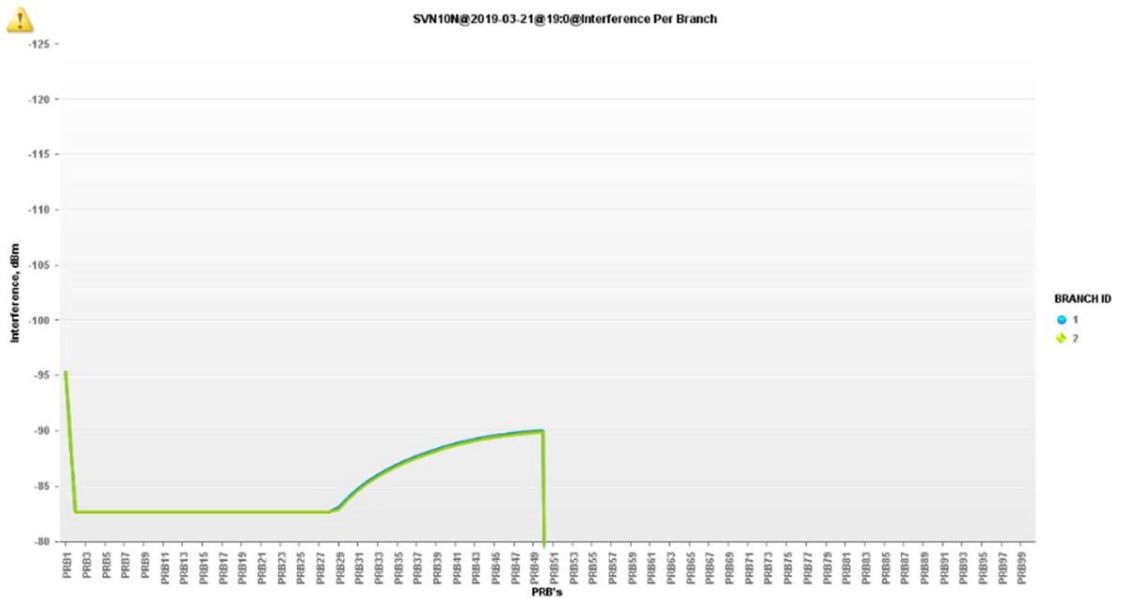


43 pav. Prognozuojama eksperimentinės stoties aprėptis prieš ir po televizijos įtakos

Ir iš tikrųjų gauti rezultatai buvo tokie, kokių tikėtasi. Abiejų sektorių aukštynkrypčio ryšio antenos visą laiką fiksavo interferencijos lygį -83 dBm (kur PBR = 0,2 MHz). LTE800 sistemoje stotyse įprastas trukdžių lygis yra apie -124 dBm arba mažiau, taigi eksperimento metu išmatuotas interferencijos lygis normą viršija virš 40 dB (44-45 pav.).

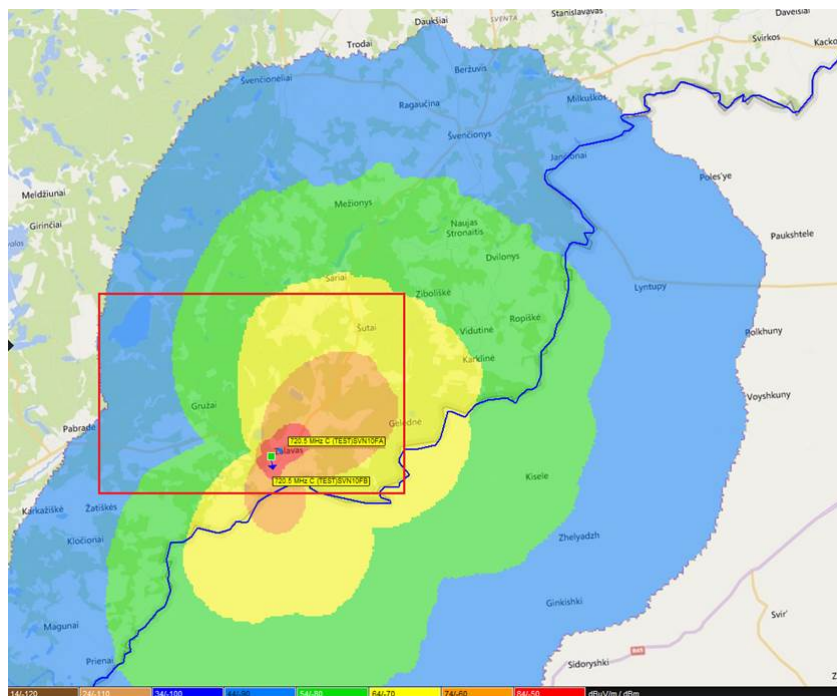


44 pav. 713-718 MHz dažniu veikiančio SVN10(55°) sektoriaus gaunamos interferencijos lygis



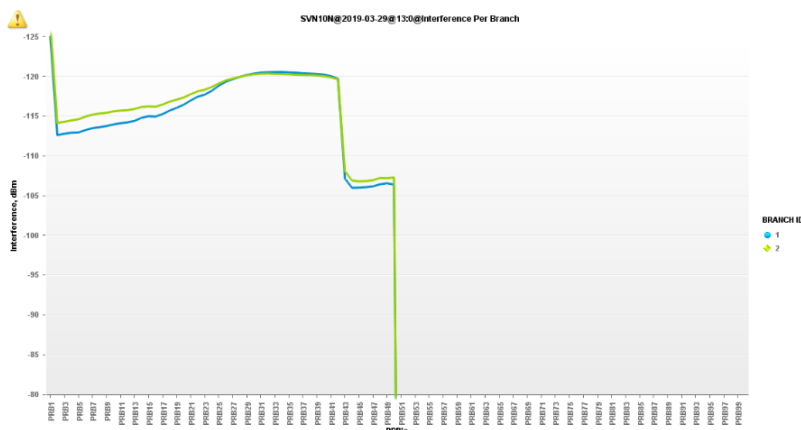
45 pav. 713-718 MHz dažniu veikiančio SVN10(175°) sektoriaus gaunamos interferencijos lygis

Toliau galima patikrinti 52 televizijos kanalo įtaką. Eksperimentinės bazinės stoties dažnius pakeičiame į 718-723 MHz. Šio sprendimo tikslas yra patikrinti, ar toliau nuo sienos esančios stotys turi įtakos Lietuvos bazinėms stotims. Baltarusijoje arti veikiančios 52 kanalo stoties nėra (žr. 41 pav.). Teoriniai rezultatai yra optimistiški, aprėptis turėtų sumažėti minimaliai, apie 3-5 km (46 pav.).

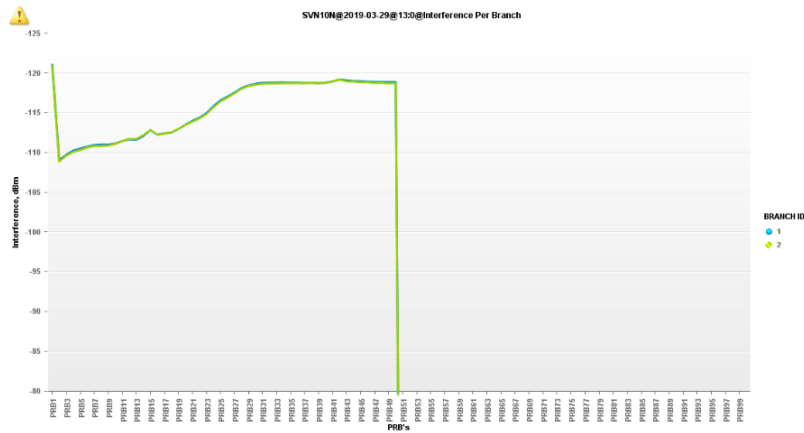


46 pav. Prognozuojama aukštynkrypčio ryšio aprėptis, įjungus tik 52 kanalo TV stotis

Eksperimento metu gauti rezultatai taip pat parodė, kad trukdžių lygis yra pakenčiamas, 55° azimutu veikiančio sektoriaus interferencijos lygis stipriausias buvo -113 dBm (47 pav.), 175° azimutu - šiek tiek didesnis, -109 dBm (48 pav.). Su tokiu žalingų trukdžių fonu bazinės stotys galėtų veikti, tačiau visgi yra didesnė nei įprastai tikimybė, kad bazinės stotys sukels trukdžius televizijos žiūrovams.

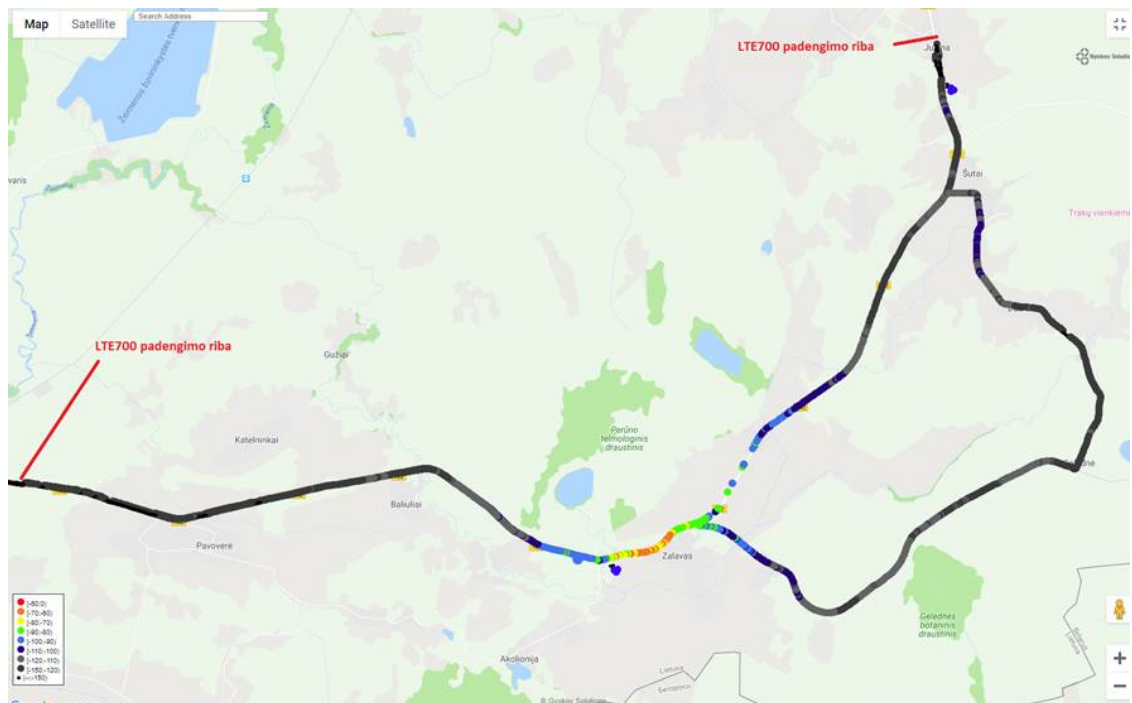


47 pav. 718-723 MHz dažniu veikiančio SVN10(55°) sektoriaus gaunamos interferencijos lygis



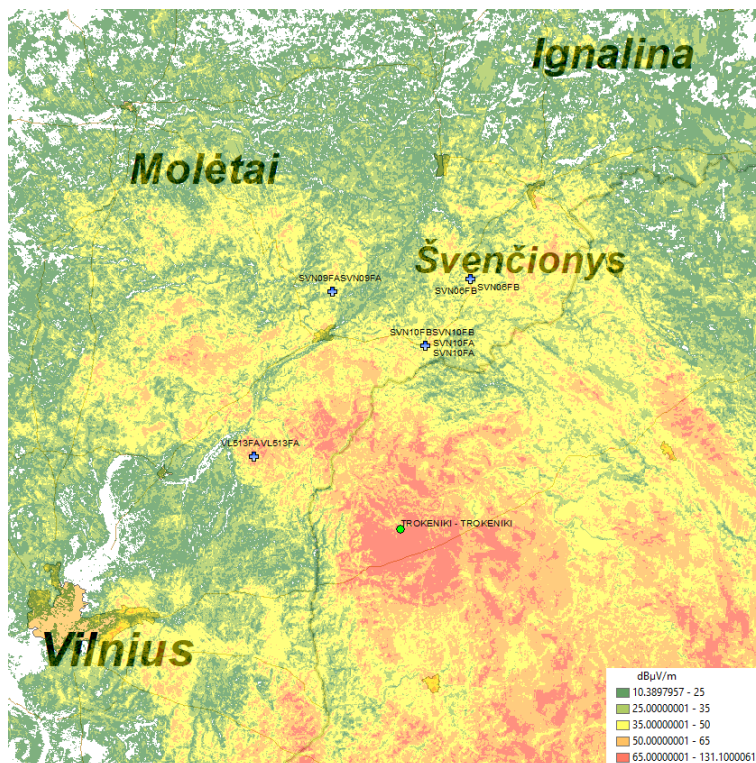
48 pav. 718-723 MHz dažniu veikiančio SVN10(175°) sektoriaus gaunamos interferencijos lygis

Eksperimento metu taip pat buvo išmatuota ir žemynkrypčio ryšio aprėptis (RSRP). Kadangi šiame dažnyje LTE technologija naudoja dažninį tankinimą (FDD), žemynkrypčio ryšio aprėptis, nepaisant to, kad aukštynkrypčio ryšio aprėptis patenkinama, gavosi labai prasta (49 pav.), nes 59 televizijos kanalas, dirbantys 770 MHz dažniu, taip pat yra netoli Lietuvos. 46 paveikslėlyje eksperimentiškai gauta žemynkrypčio ryšio aprėptis apibrėžta raudonu stačiakampiu.



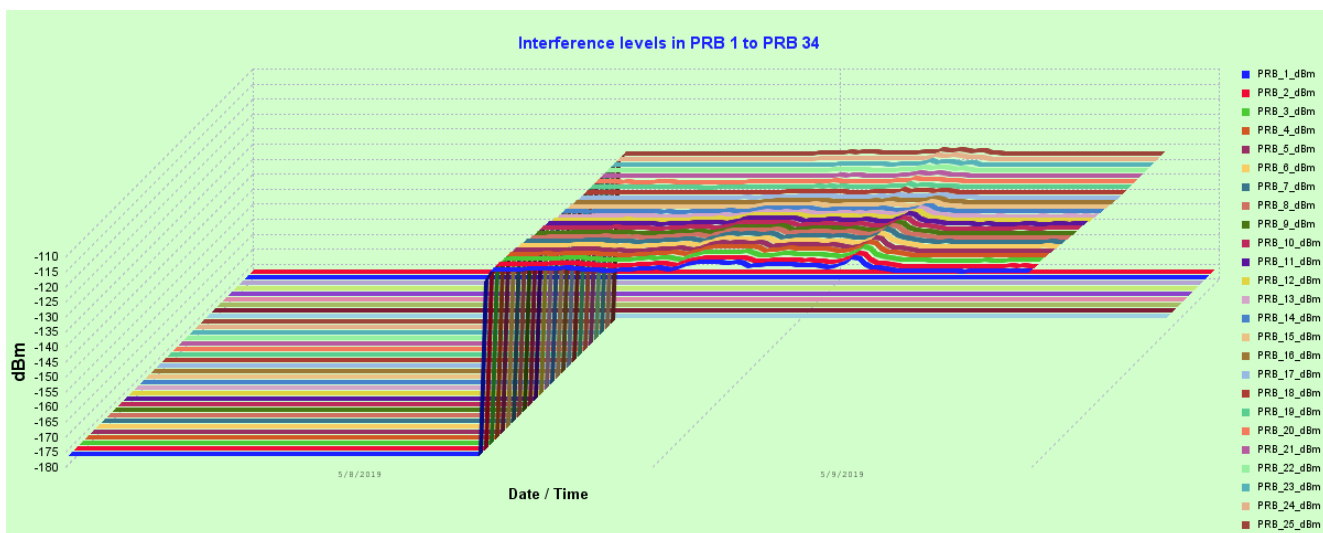
49 pav. Priimamo atskaitinio signalo galios (RSRP) aprėptis

Interferuojančio 59 kanalo aprėptis paskaičiuota teoriškai ir pavaizduota 50 paveikslėlyje. Stiprus signalas pasiekia Lietuvos teritoriją ir bet kokia bazinė stotis, veikianti tuo pačiu arba artimu dažniu sukeltų žalingus trukdžius veikiančiai televizijai, todėl galimybių čia diegti judrųjį ryšį yra labai nedaug, belieka laukti, kol antžeminė televizija bus išjungta ir spektras atsilaisvins.



50 pav. 59 televizijos kanalo aprėptis, skaičiuojant su 50% laiko tikimybe

Eksperimentinės bazinės stoties dažnį dar šiek tiek padidinus iki 720.5-725.5 MHz, trukdžių lygis labai panašus į prieš tai atliktus matavimus, kai dažnis buvo 718-723 MHz, ir siekia vidutiniškai -113 dBm.



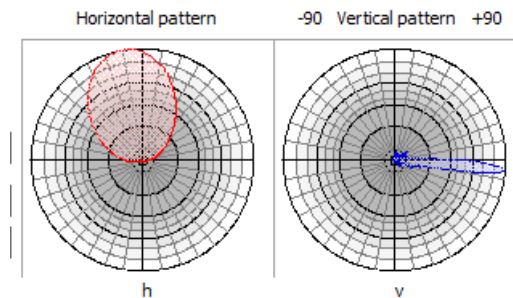
51 pav. 720.5-725.5 MHz dažniu veikiančio SVN10(55°) sektoriaus gaunamos interferencijos lygis

Ir nors teoriniai skaičiavimai rodo, kad IMT bazinės stotys gali veikti, kai $C/(I+N)$ santykis yra

teigiamas, tačiau eksperimentas 700 MHz juostoje parodė, kad aparatūra nedekoduoja naudingo signalo tada, kai I viršija -100 dBm. Šis rezultatas buvo neplanuotas, tačiau labai naudingas ir reikalingas visiems operatoriams planuojant tinklą ir atsargiau renkantis įrangos gamintojus.

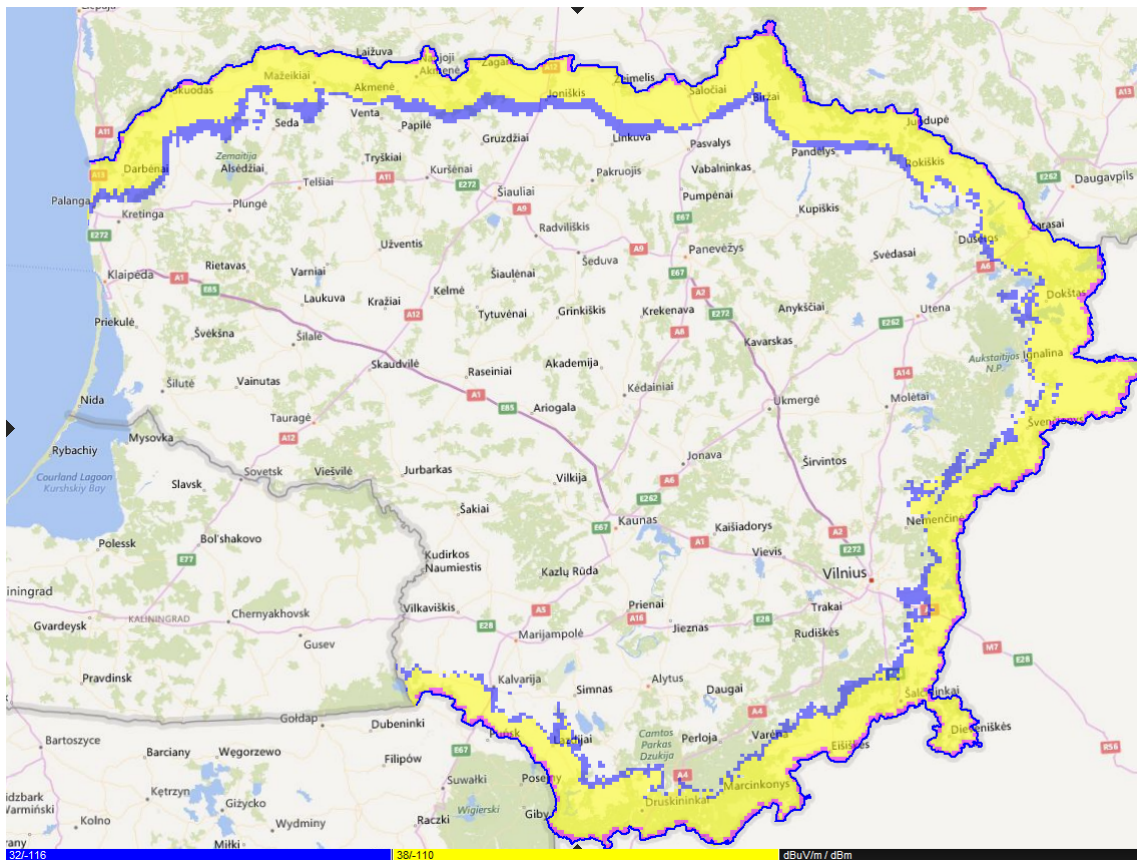
3.2 Rezultatai 3500 MHz juostoje

Kalbant apie 5G įgyvendinimą Lietuvoje 3400-3800 MHz radijo dažnių juostoje pirmiausiai reiktų aptarti situaciją nacionaliniu lygiu bei įsipareigojimus su kaimyninėmis valstybėmis. Lietuvoje šiuo metu 3400-3600 MHz ruožas naudojamas vieno operatoriaus, viešiesiems fiksuoto bevielio ryšio prieigos tinklams, tas pats operatorius turi leidimą ir 3605-3670 MHz diegti radijo ryšio prieigos tinklus, taigi, ne pilnas spektras išnaudojamas[31]. Kalbant apie santykius su kaimyninėmis valstybėmis, RRT praėjusiais metais sudalyvavo derybose su visomis kaimyninėmis valstybėmis, ir su trimis iš jų pavyko pasirašyti labai geras sąlygas naujos kartos ryšiui sudarančias sutartis, tokias pačias, kokios yra naudojamos ir žemesniuose dažniuose judriajam ryšiui. Vaizdžiai rezultatus galima pažiūrėti naudojant *ICS Telecom* programoje esančią funkciją, leidžiančią skaičiuoti stočių aprėptį nuo sukurto vektoriaus, šiuo atveju vektorius yra Lietuvos pasienio ruožas su Latvija, Baltarusija ir Lenkija. Sumodeliuota situacija, kad judriojo ryšio siųstuvai yra 40 m aukščio, naudota *Alpha Wireless* firmos antena su -6 laipsnių polinkiu (tokia antena dabar yra naudojama LTE tinkle 3,6 GHz juostoje, jos diagrama pavaizduota 52 pav.):



52 pav. *Alpha Wireless* firmos antena su -6 laipsnių polinkiu

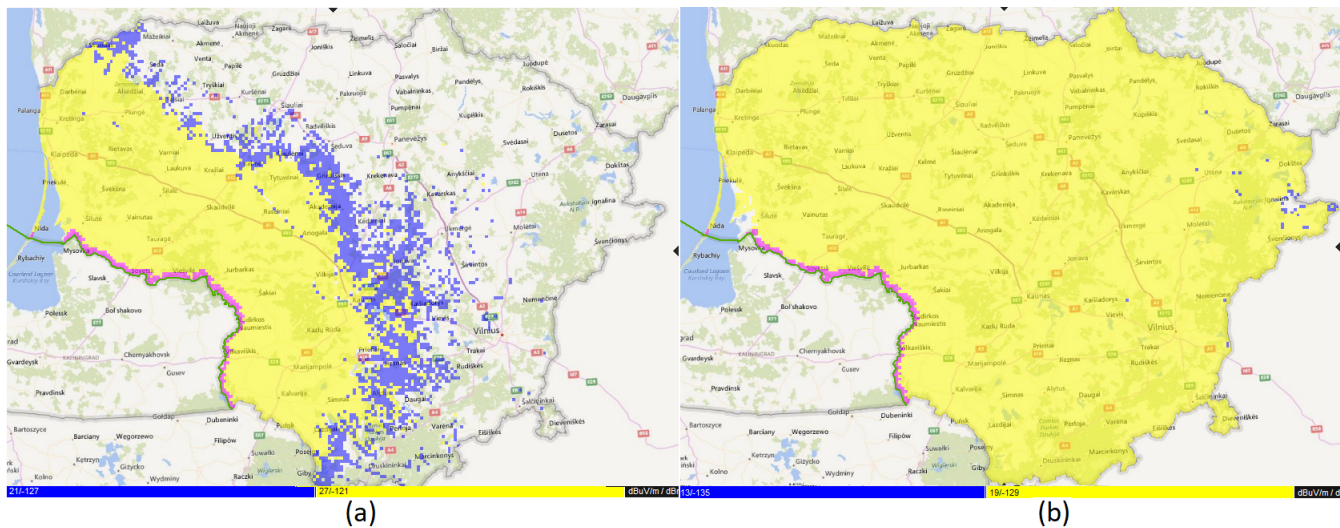
Ekvivalentinė izotropinės spinduliuotės galia paskaičiuota pagal ITU rekomendaciją ir gavosi 41 dBm/1 MHz bei pridėtas 17 dBi antenos stiprinimas, kanalas 5 MHz pločio (sunormuota dėl to, kad nebūtų painiavos lyginti su sutartimi), taigi, EIRP šiam atvejui gavosi 60 dBm / 5 MHz. Imtuvo aukštis pagal sutartį yra 3 metrų aukštyje, naudojamas P.1546 modelis su 10% laiko tikimybe, nenaudojant kliūtinių zonų. Laukas ant sienos neturi viršyti 32 dB μ V/m. Rezultatas pavaizduotas 53 pav.



53 pav. Zona, kurioje ribojamas stočių statymas pagal sudarytus susitarimus

Spalvomis pažymėta zona reiškia teritoriją, kurioje pastačius bazinę stotį ir pasukus azimutą į pasienio pusę, ji sukeltų žalingus trukdžius ir nusižengtų susitarimui. Zona yra vos 20 kilometrų nuo pasienio, tai geras rezultatas. Tačiau tai nereiškia, kad šioje zonoje negalima statyti bazinių stočių - galima, tiesiog reikia pakoreguoti stočių parametrus. Aprėpti sumažintų didesnis elektrinis arba mechaninis polinkis, mažesnė galia, taip pat pati antena, galima ją pakeisti kita. Mėlyna spalva yra standartinės stoties aprėpties zona, kai stoties EIRP = 60dBm / 5 MHz, t.y. kai ji pasiekia maksimalią vertę. Tuo tarpu geltona zona yra numatoma reali stoties aprėpties zona, kai EIRP = 54 dBm/ 5 MHz. Kur dingsta 6 dB? Realiai stoties aukštis gali būti mažesnis nei 40 m (būdinga miestuose). Galima padidinti antenos elektrinį polinkį. Taip pat 5G technologijoje bus naudojamos AAS (angl. *Advanced Antenna Systemas*) antenos su 8 spinduliais po 10-15° pločio 120° horizontaliame sektoriuje, tai naudojant standartinę 120° anteną, jos galią galima sumažinti iki 9 dB. Žemynkrypčio (angl. *downlink*) ir aukštynkrypčio (angl. *uplink*) ryšio santykis TDD IMT sistemose būna apie 0,75, tad dar 1 dB galima sumažinti DL galią. Dabar reikia aptarti, dėl ko nepavyko pasirašyti ketvirtosios sutarties su kaimyne Rusija. Visų pirma, nebuvo sutarta dėl sklidimo modelio, pasak jų administracijos, P.452 modelis 3,5 GHz ryšio reguliavimui yra tinkamesnis, parodantis realią stočių aprėptį ir galimus trukdžius. Kita priežastis - Karaliaučiaus srityje veikiančios Žemės stotys, kurių imtuvai itin jautrūs. Derybose jų pasiūlymas buvo pasirašyti sutartį, kurioje 3400-3600 MHz juostoje leidžiamas lygis 60 km nuo pasienio zonoje būtų -132 dBW/MHz/m^2 ($20,8 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ / 5 MHz), kai imtuvo aukštis yra 20

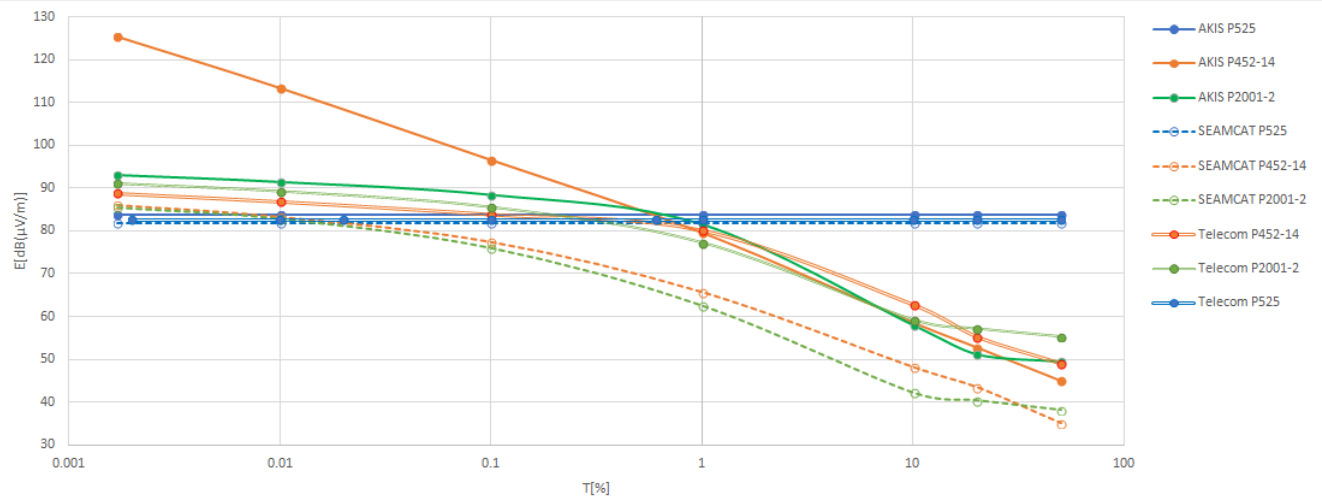
m. Skaičiuoti reiktų su ITU-R P.452 rekomendacija, naudojant $t=1\%$ laiko tikimybę 60 km atstume nuo pasienio ir $t=10\%$ kitu atveju. Nors būtų logiška nustatyti lygį stoties pastatymo vietoje, tačiau šis reikalavimas yra ant pasienio zonos, kur stotys niekada nestovės. Tai reiškia, kad 60 km nuo pasienio dėl trukdžių negalima pastatyti jokios stoties, o, kaip matome iš 54 (a) pav., nuo 80 km galima būtų statyti. Skaičiavimams naudoti tie patys bazinės stoties parametrai ir antenos diagrama, kaip viršuje aprašytame atvejuje. 3600-3800 MHz dažnių juostoje buvo pasiūlyta laikytis $-139.8\text{dBW}/\text{MHz}/\text{m}^2$ ($13\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}/5\text{MHz}$) lygio ant sienos, kai imtuvo aukštis 20 m. Skaičiuoti taip pat su ITU-R P.452, kai laiko tikimybė $t=1\%$. Ši sąlyga yra neišsprendžiama problema Lietuvai, nes visoje šalies teritorijoje nepavyktų pastatyti stoties (54 pav. (b)).



54 pav. (a) 3,4-3,6 GHz situacija pagal RUS pasiūlymą, (b) 3,6-3,8 GHz

Kadangi gyvename tokia amžiuje, kai galime pasinaudoti patikima ir išstobulinta programine įranga, galime susimodeliuoti situaciją Žemės stotiai, esančiai Karaliaučiaus srityje, įvertinti, ar tikrai reikalinga tokia apsauga. Kadangi stoties techniniai parametrai nurodomi duomenų bazėje, galima gauti artimą realiai situacijai rezultatą, įvertinus teoriniame įvade aptartą bangų sklaidimo mechanizmą ir realų reljefą. Pradžiai pabandykime patestuoti keletą programų - jau minėtą *ICS Telecom*, taip pat *AKIS* [32] ir „spekto inžinierinę progresyvią Monte Carlo analizavimo įrangą“ *SEAMCAT* [33]. Svarbu pasitikrinti, ar jos pateikia panašius rezultatus, naudojant tuos pačius sklaidimo modelius, bazinių stočių parametrus. Buvo nuspręsta susimodeliuoti pradinę elektrinio lauko stiprio priklausomybę nuo laiko tikimybės. Į programas įvedami vienodi bazinės stoties parametrai - antenos aukštis 40 metrų, EIRP $41\text{dBm}/\text{MHz} + 17\text{dBi}$ stiprinimas, antena nekryptinė. Radijo ryšio reglamento 5.430A pastraipoje rašoma, kad 3400-3600 MHz dažnių juostos skyrimas judriajam ryšiui, išskyrus aeronautikos judrųjų ryšį, turi remtis 9.21 punktu, kuriame rašoma, kad galios srauto tankis (PFD) pasienio zonoje 3 metrų aukštyje negali viršyti $-154.5\text{dB}(W/m^2\text{kHz})$, esant daugiau nei 20% laiko. Kaip galima matyti 55 pav., visi modeliai prognozuoja tokią pačią signalo silpimo tendenciją atžvilgiu laiko tikimybės. Skaičiuojant su *AKIS* ir naudojant 452-14 modelį stebimos anomalijos 0,001-1% laiko tiki-

mybės ruože, tai yra paklaida, atsirandanti programinėje įrangoje su šiuo modeliu, nes laiko tikimybė yra labai maža ir kažkuriame skaičiavimo proceso žingsnyje atsiranda netiksli aproksimacija. Pasitikrinti elektrinio lauko stiprio lygį su skirtingomis programomis yra būtina prieš svarbius skaičiavimus, nes kartais gali atsirasti programinės įrangos duomenų aprodorojimo klaidų, kurių skaičiuotojas negali pamatyti, nes viskas atrodo įprastai. *SEAMCAT* programinė įranga reikalauja susimodeliuoti visą bazinių stočių tinklą, todėl skaičiavimo būdas šiek tiek kitoks, kaip matome, pradžioje buvo panašios vertės į *AKIS* ir *ICS Telecom*, tačiau su didėjančia laiko tikimybe didėjo ir paklaida.



55 pav. Signalų stiprumo priklausomybė nuo laiko tikimybės, naudojant skirtingus sklaidimo modelius bei programas

Žinant, koks maždaug bus elektrinio lauko stipris, reikia nuspręsti, kokį signalo triukšmo santykį (I/N) naudoti. Šis santykis yra svarbus todėl, kad apsprendžia *Threshold Degradation* (toliau - TD) parametą:

$$TD = 10 \log(1 + 10^{(I-N)/10}) \quad (23)$$

Pasiskaičiavus pagal (23) formulę gavome, kad kai $I/N = -10$, tai $TD = 0.41$ dB, o kai $I/N = -1.3$, tai $TD = 2.41$, šios vertės labai pravers vertinant trukdžių mastą. Žinant, ko tikėtis naudojant skirtingus I/N , sumodeliuojamas bazinių stočių tinklą. Stotys importuotos iš LTE jau egzistuojančio tinklo, iš viso arti 6000 sektorių, jie garantuoja >90% Lietuvos aprėptį. Stotelių parametrai šiek tiek pakeičiami - priskiriamos antenos, galinčios veikti 3500 MHz dažnių juostoje. Antenos aukštį parinkome tokį, koks dažniausiai būdingas - 40 m. Ekvivalentinė izotropinės spinduliuotės galia paskaičiuota pagal ITU rekomendaciją ir gavosi 41 dBm/1 MHz bei pridėtas 17 dBi antenos stiprinimas. Žemės stotiai, kuri žemėlapyje žymima apskritimo forma, palikome parametrus, kurie yra duomenų bazėje, tai yra juostos plotis 36 MHz, stoties aukštis 18 metrų, azimutas 142.15°, antenos stiprinimas -10 dBi. Naudojamas P.452 sklaidimo modelis, kurį siūlo Rusija. Iš pradžių buvo paskaičiuota ilgalaikė interferencija, aptarta 1.3.5 skyriuje, naudojant 20 MHz stočių kanalo plotį.

Leistiną lygį pasiskaičiuojame pagal šią formulę:

$$P_r(p) = 10\log(kT_e B) + N_L + 10\log(10^{M_S/10} - 1) - W = -149,93\text{dBW}/1\text{MHz} = -119,93\text{dBm}/1\text{MHz} \quad (24)$$

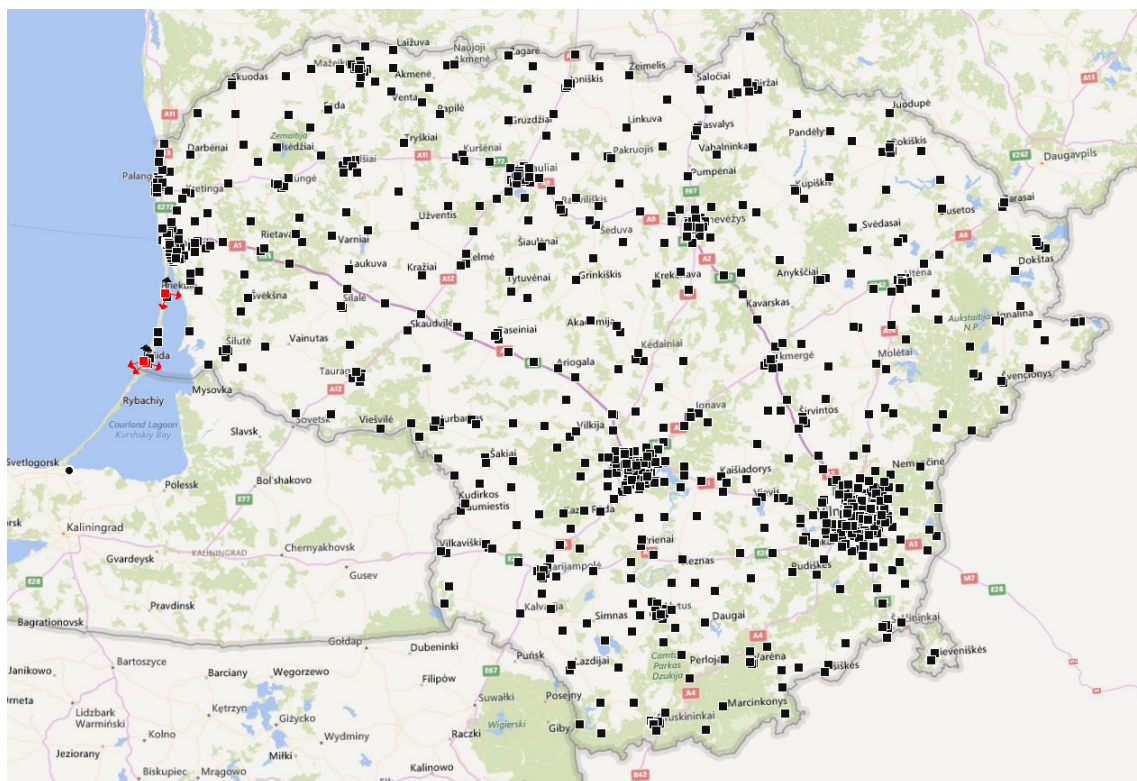
kur N_L – tai koeficientas nusakantis triukšmo indėlį į jungtį (angl. *the noise contribution to the link*), judriojo ryšio tinklo atveju jis lygus 0 dB, M_S – parametras, naudojamas palydovinėse sistemose, nusakantis, kiek gali būti sumažintas priimamo signalo lygis, kad sistemos našumas nekristų žemiau ribinės vertės, šiam atvejui buvo pasinaudota RR nurodyta 2 dB verte.

Gautų rezultatų lentelė atrodo taip:

Laiko tikimybė	Teor. gautas E, dBm	Teor. gautas E, dBuV/m	Kiek viršija slenkstinį E: Long-term (I/N=-10) E - 19.3 (dBuV/m)	Kiek viršija slenkstinį E: Short-term (I/N=-1.3) E - 28 (dBuV/m)	Interferuojančių sekt. kiekis, kai TD>0.41 (I/N=-10)	Interferuojančių BS sektorių kiekis, kai TD>2.409 (I/N=-1.3)
50%	-108.9	39.01	19.71	11.01	4	4
20%	-102.6	45.31	26.01	17.31	10	4
10%	-95.1	52.81	33.51	24.81	147	45
1%	-77.7	70.21	50.91	42.21	700	432
0.10%	-74	73.91	54.61	45.91	1909	1007
0.01%	-71	76.91	57.61	48.91	2664	1809
0.002%	-69.1	78.81	59.51	50.81	2999	2096
Free space	-75.3	72.61	53.31	44.61	3190	2269

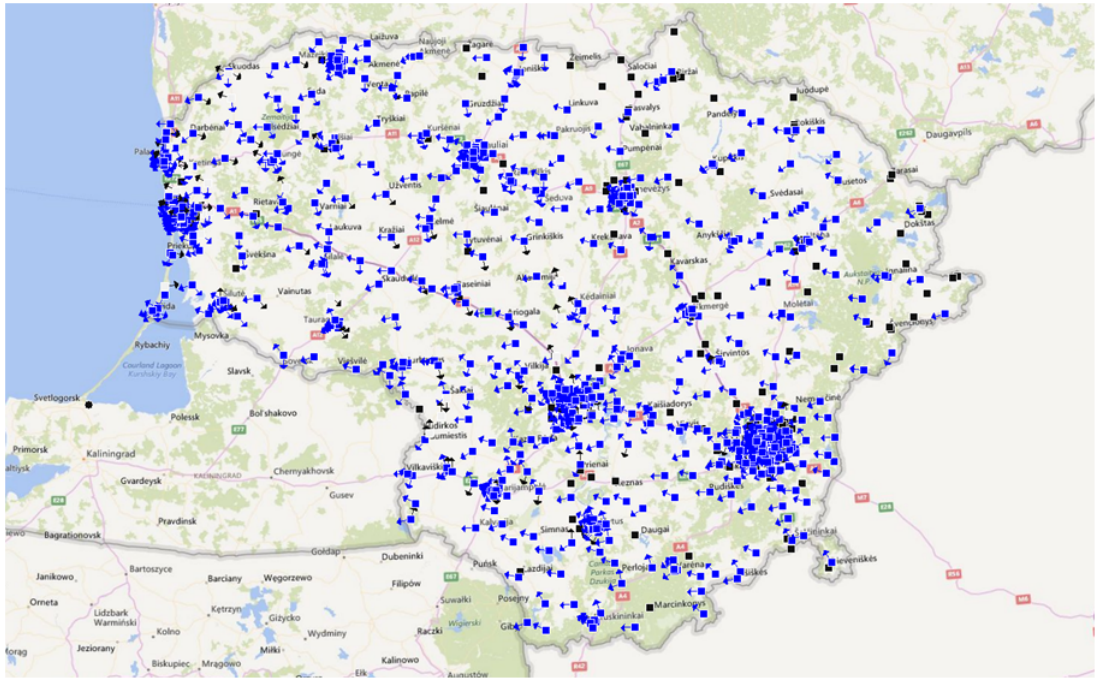
56 pav. Gauti rezultatai, skaičiuojant su skirtingomis laiko tikimybėmis ir slenkstiniais E

Gautus rezultatus nagrinėti ir vertinti šiek tiek lengviau, matant realų vaizdą žemėlapyje (57 pav.).



57 pav. Interferuojančių stočių kiekis (raudona), kai $I/N = -10$, laiko tikimybė 20%

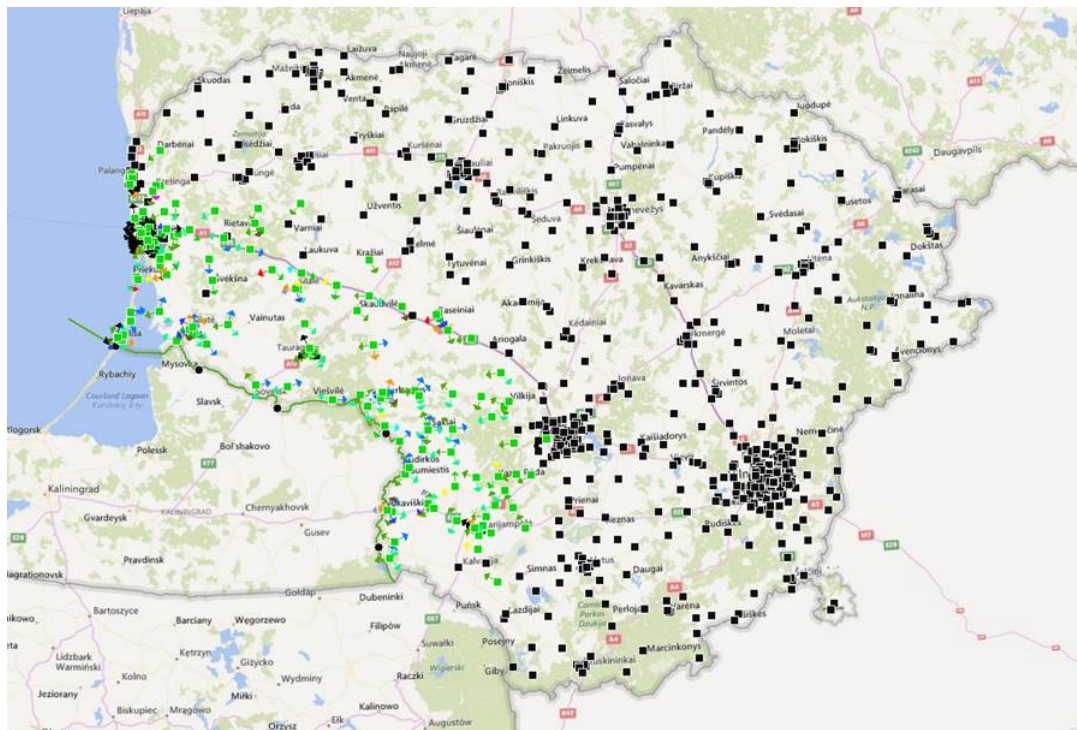
Trukdžius sukeliančios stotys aktyvuotos žemėlapyje (raudona spalva), jų $TD > 0,41$. Kaip galima matyti, trukdytų vos kelios stotys, esančios Nidoje, tačiau interferencinis laukas gavosi $-102,6 \text{ dBm}$ arba $45,31 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$, kai tuo tarpu leidžiamas lygis, esant $I/N = -10$, yra $19,3 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$. Viskas būtų gerai, zona nėra didelė ir būtų galima joje nustatyti griežtesnes sąlygas, tačiau tarpvalstybinėse sutartyse dėl dažnių naudojimo paprastai ilgalaikės interferencijos kriterijus netaikomas dėl „per gerų“ sąlygų. Todėl svarbu įvertinti trumpalaikės interferencijos poveikį, kai laiko tikimybė 0,0017%, o I/N santykis $-1,3$ (58 pav.).



58 pav. Interferuojančių stočių kiekis (mėlyna), $I/N = -1.3$, laiko tikimybė 0.0017%

Kaip matome, trukdžius sukeltų beveik visos Lietuvoje pastatytos bazinės stotys, liktų veikti tik tos, kurių azimutai nukreipti į šiaurę. Suminis interferencinis laukas gavosi $-69,1 \text{ dBm}$ arba $78,81 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$, kai tuo tarpu leidžiamas lygis, esant $I/N = -1.3$, yra $28 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$, vertė viršijama net 50,8 dB! Čia yra viena dalis skaičiavimų, kai buvo paskaičiuotas interferencijos poveikis Žemės stoties imtuve, kai stotis stovi realioje vietoje. Tačiau Rusija nustatė sąlygas pastaboje RR, kad reikia lygį skaičiuoti pasienio ruože. Todėl sukūrėme penkias stotis su tokiais pat parametrais kaip originalios ir pastatėme pasienyje.

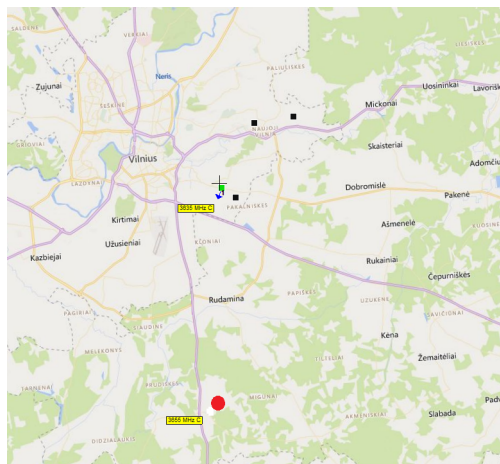
Nustatėme bazines stotis veikti 100 MHz juostos plotyje. Taikant ilgalaikės interferencijos kriterijų, vaizdas pasikeitė, pradėjo interferuoti daugiau sektorių, iš viso 317/6000.



59 pav. Interferuojančių stočių kiekis (žalia), kai Žemės stotys pastatytos pasienio ruože, $I/N = -10$, laiko tikimybė 20%

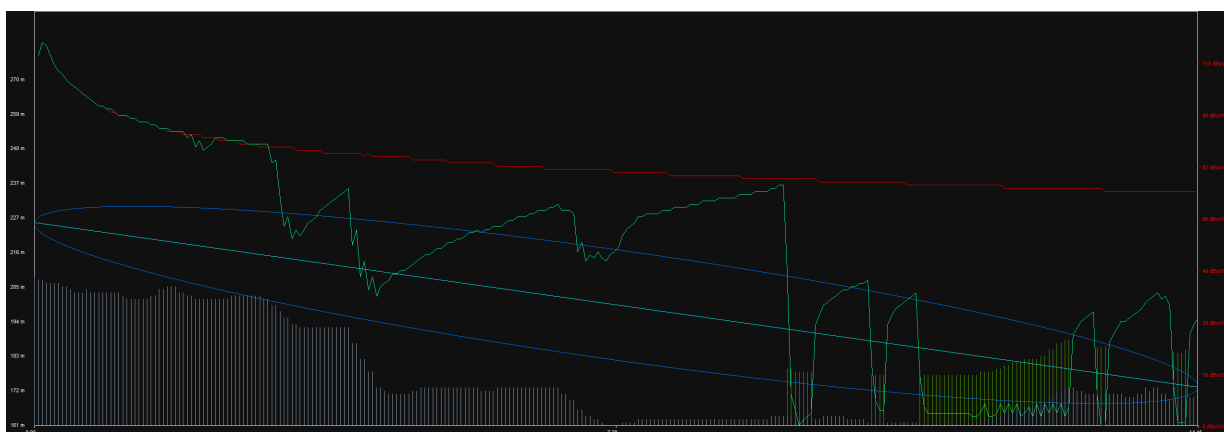
Kaip matome iš 59 paveikslėlio, trukdžius sukeltų stotys, esančios tarp pasienio ir Kauno, o tai yra apie 70 km. Realiai gaunamas rezultatas panašus į Rusijos administracijos pateiktą siūlymą per derybas, jeigu būtų primygtinai reikalaujama 1% laiko tikimybės, tai Lietuvoje 5G negalėtų pilnavertiškai veikti, nekalbant apie Europos Komisijos sprendimą padengti 5G ryšiu *Via Baltica* magistralę, kuri visai šalia Karaliaučiaus srities.

Taigi, ištyrėme pesimistiškiausią variantą - judriojo ryšio bazinių stočių suderinamumą su itin jautria Žemės stotimi. Kitas būdas pažvelgti į susidariusią situaciją yra rasti tiksliausiai realią aprėptį atitinkantį sklidimo modelį ir su juo pradėti modeliuoti tinklą, stengiantis neviršyti nustatyto lygio ant sienos. Kadangi Lietuvoje turime kelias LTE bazines stotis, sklandžiai veikiančias kelerius metus 3,6 GHz dažnyje Vilniuje, galima jas pamatuoti realiu laiku ir palyginti su teorinėmis vertėmis. Žinant tikslus jos parametrus ir antenos diagramą, galima susimodeliuoti teorinę aprėptį ir pažiūrėti, koks bus sklidimo kelio profilis. Stoties galia 163 W bei elektrinis polinkis lygus -6° , ji yra geografiniame taške, kurio altitudė 208 metrų, o antenos aukštis 17 m. Parametrai skaičiavimo metu išliks tokie patys.

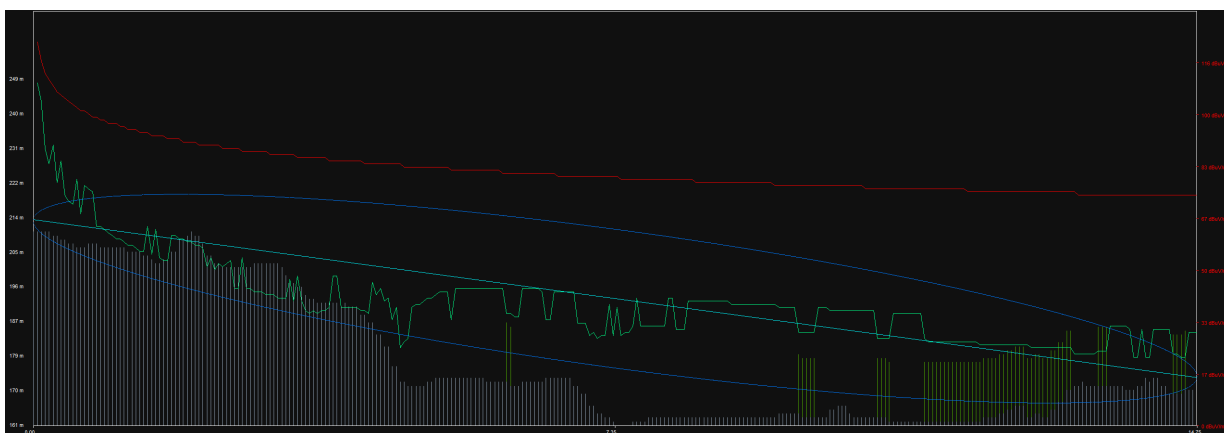


60 pav. Siųstuvo (žalia) ir imtuvo (raudona) padėtys

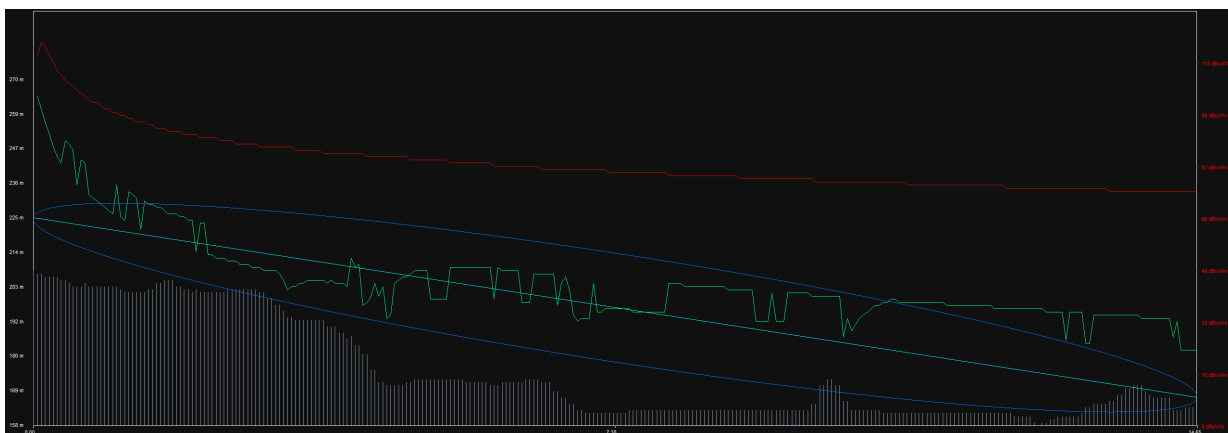
Už 15 km į pietus nuo stoties (60 pav.) pastatome 3 metrų aukščio imtuvą, atstumas tarp minėtos stoties bei minėto imtuvo ir bus profiliui reikalingas atstumas. Šio eksperimento rezultatai parodyti 61-63 paveikslėliuose.



61 pav. Profilis, gautas skaičiuojant su P.452 modeliu, kai laiko tikimybė 10%



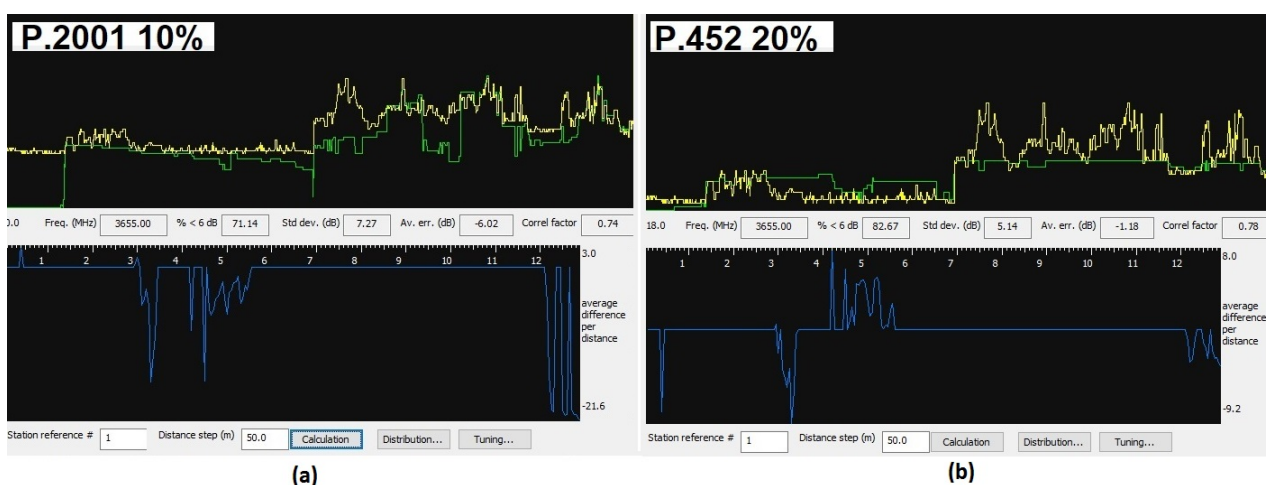
62 pav. Profilis, gautas skaičiuojant su P.2001 modeliu, kai laiko tikimybė 10%



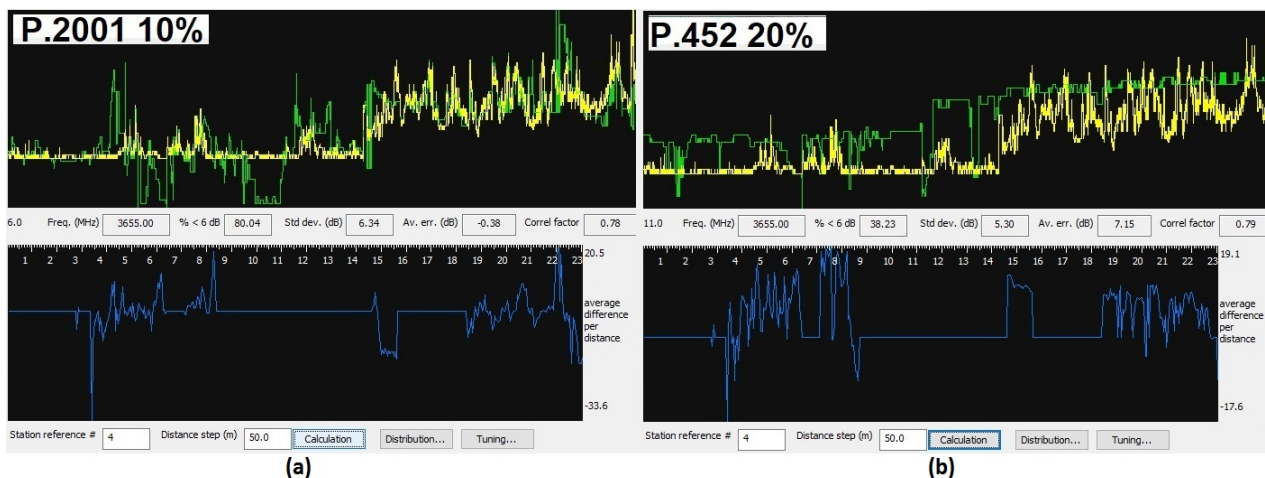
63 pav. Profilis, gautas skaičiuojant su P.1546 modeliu, kai laiko tikimybė 10%

Profilio X ašis – atstumas nuo siųstuvo; Y1 ašis – altitudė; Y2 ašis – lauko stiprumas ($dB\mu V/m$). Raudona linija reiškia sklidimą laisvoje erdvėje, o žalia – sklidimą skaičiuojant su pasirinktu modeliu, atitinkamai P.452, P.2001 arba P.1546. Pirmiems dviems modeliams buvo naudojamas kliūtinių zonų aukštis, o P.1546 modeliui ne. Kaip galima numanyti, tamsiai mėlyna spalva pažymėta pirmoji Fresnelio zona, o šviesiai mėlyna yra tiesioginis matomumas. Brūkšneliai apačioje formuoja realų reljefą iš duomenų bazės, taip pat pridėdamas kliūtinių zonų aukštis. Pirmoji akivaizdi išvada iš rezultatų - P.1546 modelis prognozuoja mažiausią aprėptį, tuo tarpu P.452 ir P.2001 yra pozityvesni. Nagrinėjant P.452 modeliu gautą profilį matyti, kad šis modelis pirmus 3 km vertina kaip sklidimą laisvoje erdvėje. Siųstuvo signalas slopsta netolygiai dėl reljefo įtakos ir elektromagnetinių bangų prigimties.

Sėkmingai pamatavus stočių signalų lygius su RRT turima įranga ir judriąja radijo stebėsenos stotimi [34], juos importuojame (.csv duomenų byla) į *ICS Telecom* programą bei naudojame koreliacijos skaičiavimo metodą. Dalis rezultatų parodyta 64-65 pav.

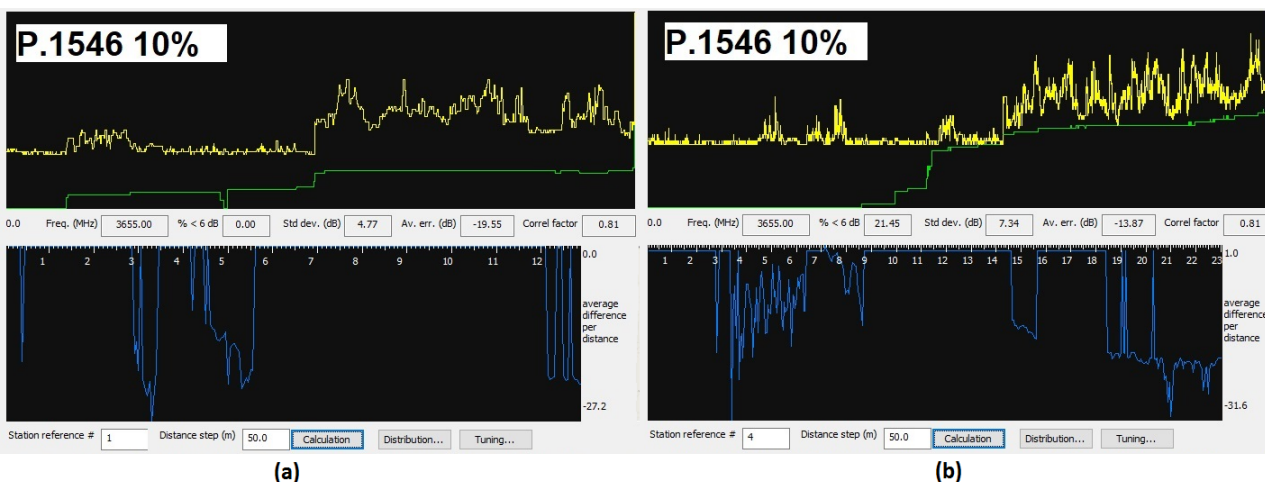


64 pav. Sektoriaus (ID 46211430) teorinių ir eksperimentinių rezultatų koreliacija, kai naudojame P.2001 10% (a) ir P.452 20% (b)



65 pav. Sektoriaus (ID 46223718) teorinių ir eksperimentinių rezultatų koreliacija, kai naudojame P.2001 10% (a) ir P.452 20% (b)

Geltona linija yra eksperimentiškai gauta signalo galios priklausomybė nuo koordinatės, o žalia - teoriškai. Taip pat mėlyna spalva yra vidutinio skirtumo priklausomybė nuo atstumo tarp teoriškai ir eksperimentiškai gautų rezultatų. Šios analizės metu buvo pažiūrėta koreliacija pagrindiniams sklidimo modeliams, kurie galėtų tikti. Išsirinkti geriausią modelį naudinga tiek operatoriams, tiek administracijoms, nes jie praverčia skaičiuojant spartas ir ryšio kokybę, aprėptis. 64 ir 65 pav. parodoti geriausiai tarpusavyje sutampantys rezultatai. Galima daryti išvadą, kad šioje radijo dažnių juostoje geriausiai tiktų P.2001 modelis su 10% laiko tikimybe. Tačiau yra modelių, kurių prognozuojama aprėptis visai neatitinka eksperimentiškai gautų verčių, štai, pavyzdžiui, P.1546 modelis, pavaizduotas 66 pav.



66 pav. Dviejų sektorių (a - ID 46211430, b - 46223718) teorinių ir eksperimentinių rezultatų koreliacija, kai naudojame P.1546 10%

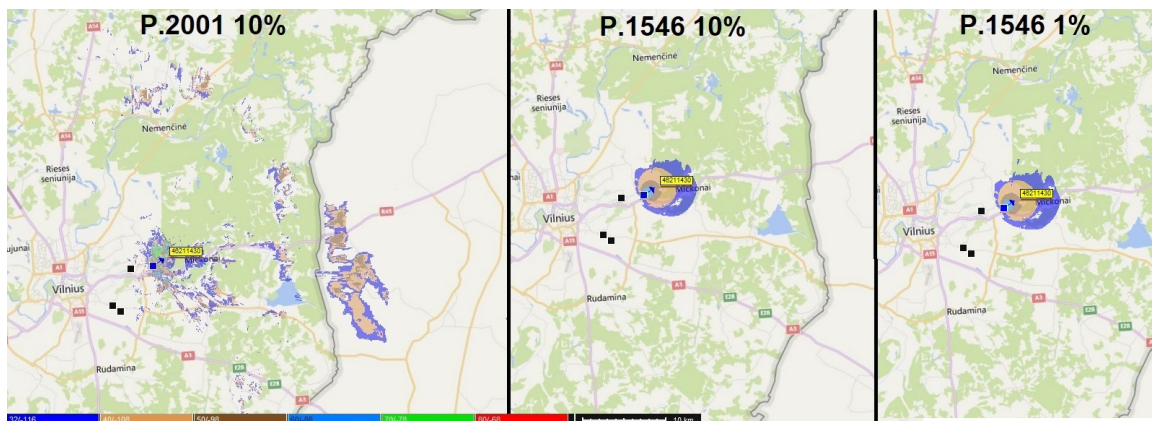
Kaip matome iš 66 pav., vidurkis tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų yra per didelis, todėl reikia rinktis kitą modelį.

Rezultatai su likusiais modeliais surašyti į lentelę (67 pav). Kaip minėta 1.4.5 skyrelyje, siektinas rezultatas yra vidutinė paklaida $\in [-2;2]$ dB ir standartinis nuokrypis $\in [0;7]$ dB.

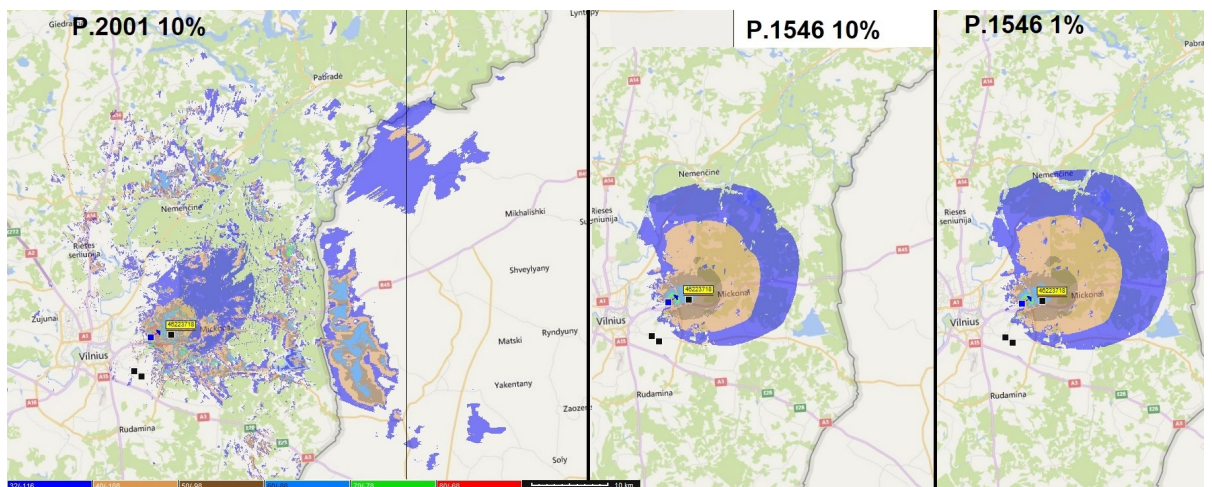
Sektoriaus ID	Taškų kiekis	P.452				P.1812				P.2001						P.1546		Atstumas nuo sektor., km				
		20%		50%		1%		10%		1%		5%		10%		20%						
		Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB	Std.dev., dB	Av.err., dB					
46221168	591	4.45	1.3	4.54	1.22	7.57	-6.93	7.42	-7.28	7.43	-7.29	7.69	0.72	5.22	-1.26	4.96	-1.9	5.09	-1.7	5.07	-21.69	8.7-12.4
46223718	3146	3.05	7.15	2.95	6.36	4	-0.99	3.98	-1.14	3.96	-1.19	5.79	0.73	4.98	-0.1	4.66	-0.17	4.79	-0.42	2.38	-20.99	16.8-22.4
46307174	2042	6.96	2.67	7.07	2.45	7.64	-3.38	7.59	-3.49	7.61	-3.49	3.16	-0.82	2.88	-1.39	2.92	-1.47	2.99	-1.65	5.81	-7.79	3.5-7.3
46307184	966	5.06	0.04	4.91	-0.29	6.94	-4.7	6.94	-4.7	6.94	-4.7	2.58	-1.6	2.89	-2.43	2.97	-2.85	2.97	-2.97	1.48	-16.57	6.3-7.3
46211430	2769	5.14	-1.18	5.12	-1.36	7.79	-15.4	7.81	-15.6	7.8	-15.71	7.26	-3.69	7.49	-5.48	7.27	-6.02	7.51	-6.41	4.77	-19.55	2.8-5.5
46211440	517	2.22	2.1	2.23	1.95	1.69	-0.18	1.72	-0.25	1.69	-0.25	1.81	-1.45	2.15	-1.81	2.23	-1.85	2.28	-1.64	2.1	-13.5	3.2-4
46221168	2134	7.18	4.48	7.15	4.36	4.05	-2.53	4.13	-2.58	4.15	-2.6	2.47	2.53	2.24	2.1	2.16	1.83	2.08	1.66	3.47	-2.6	2-4
46223718	11809	5.3	7.15	5.02	6.7	5.3	-0.56	5.29	-0.71	5.28	-0.74	7.19	0.92	6.66	-0.01	6.34	-0.38	6.56	-0.43	7.34	-13.87	2.8-23
Svor.vidurk.		5.198	5.3016	5.0477	4.973	5.5492	3.062	5.5438	3.206	5.5382	3.238	5.9615	1.384	5.53534	1.124	5.3051	1.3945	5.46141	1.493	5.51241	14.233	-
Vidurkis		3.8789	2.8967	3.8278	2.743	4.1567	3.852	4.1622	3.976	4.1589	3.997	3.3622	1.384	3.25444	1.62	3.1722	1.83	3.80778	1.876	3.03889	12.951	-

67 pav. Koreliacijos rezultatai tarp apskaičiuotų ir pamatuotų verčių, naudojant skirtingus sklidimo modelius

Taip pat galima pažiūrėti, kaip rezultatai atrodo ant žemėlapių. Pasirenkame palyginti „geriausią“ ir „blogiausią“ variantus - P.2001 ir P.1546 (68 ir 69 pav).

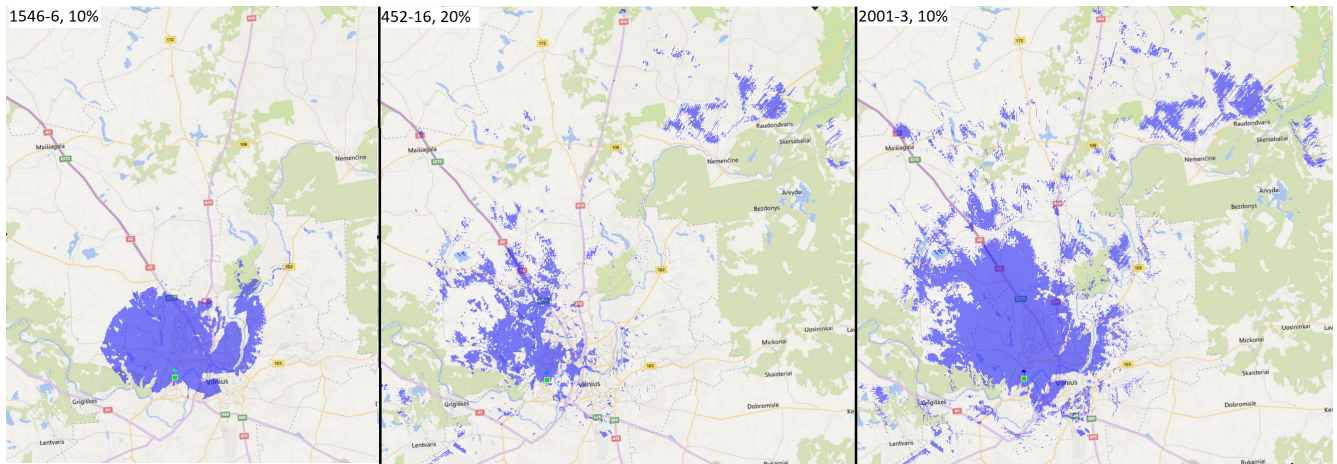


68 pav. P.2001 ir P.1546 modelių trukdžių zonų palyginimas sektoriui, kurio ID 46211430



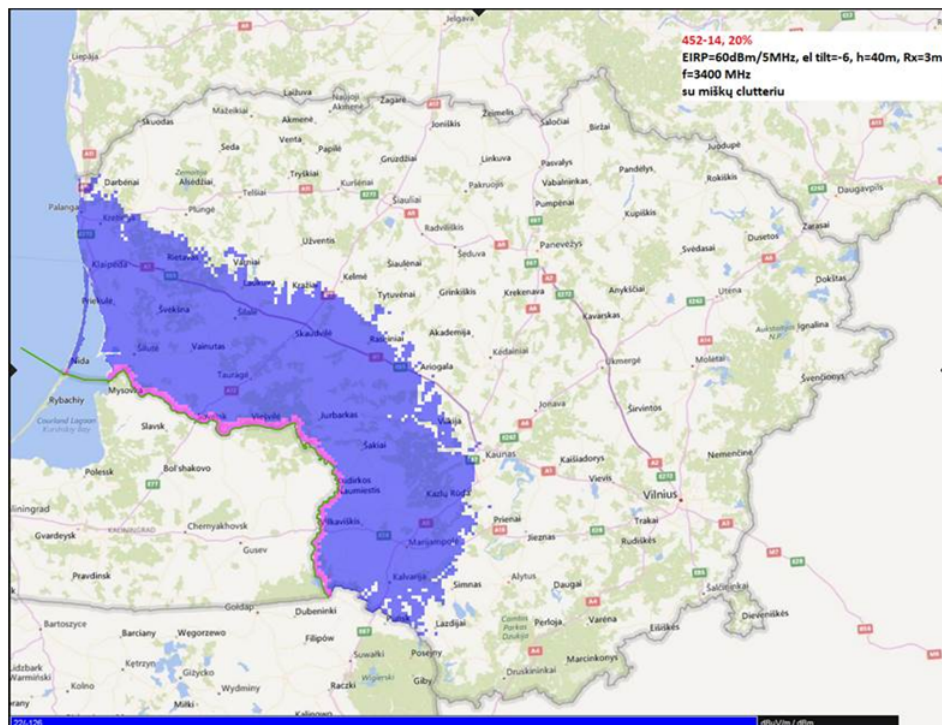
69 pav. P.2001 ir P.1546 modelių trukdžių zonų palyginimas sektoriui, kurio ID 46223718

Kaip matome, P.1546 prognozuojama trukdžių zona nedidelė ir nedidėja sumažinus laiko tikimybės procentą nuo 10% iki 1%. Galima palyginti ir tris svarbiausius modelius: sutartyse naudojamą ir 15(01) rekomendacijoje minimą P.1546 10%, be kliūtinių zonų, tuomet RR 5.430 minimą P.452 20% įskaitant kliūtines zonas, ir trečiąjį, labiausiai atitikusį P.2001 10%, įskaitant kliūtines zonas (70 pav.).



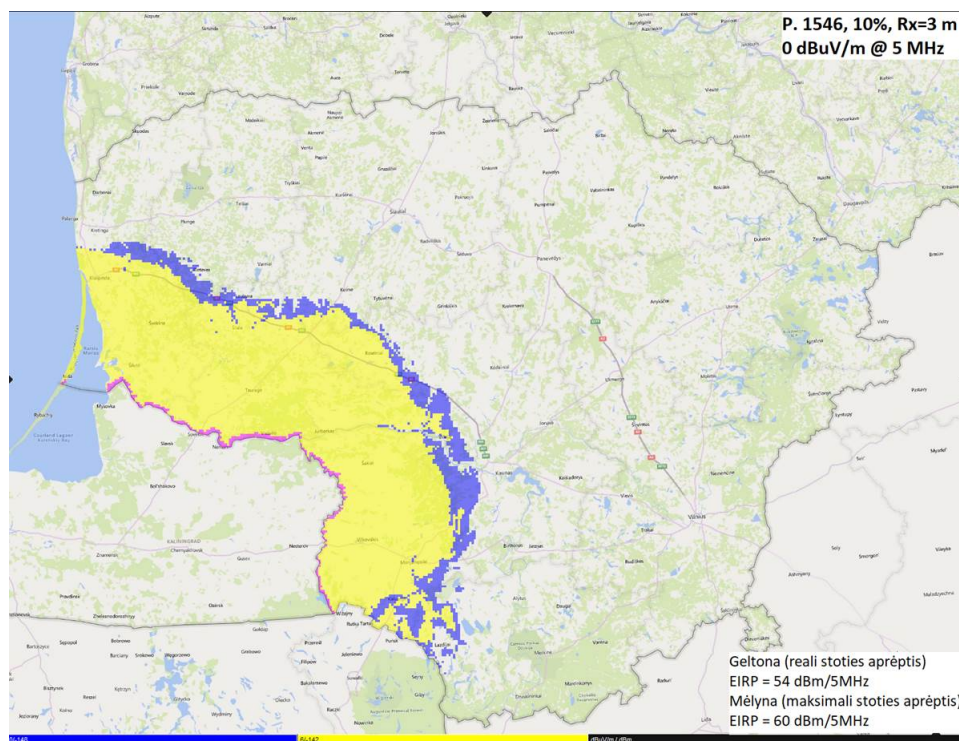
70 pav. Trukdžių zonos naudojant P.1546-6 10%, P.452 20% ir P.2001 10%

Gaila, bet kol kas P.2001 modelis ITU dokumentuose nėra pristatomas kaip patikimas, nes kol kas yra išleista tik 3 jo versija. Tuo tarpu P.452, nors ir ne taip stipriai koreliuoja kaip P.2001, bet taip pat yra minimas radijo reglamento 5.430A pastaboje su 20% laiko tikimybe, kai imtuvas yra 3 m aukštyje ir leidžiamas lygis yra $22,3 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}/5\text{MHz}$, toks variantas pavaizduotas 71 pav.



71 pav. Aprėptis, remiantis RR 5.430A pastaba

Tačiau rezultatas taip pat ganėtinai prastas tokiai mažai valstybei kaip Lietuva, kaip matome, apie 55 km plotas būtų ribojamas. Kol nėra susitarimų su visomis kaimynėmis, labai svarbu kasdien stebėti situaciją Europos Sąjungoje - kokie dokumentai priimami, kokia linkme einama, taip pat aiškiai išdėstyti savo poziciją, tik tokiu būdu galima pasiekti maksimalų spektro efektyvumą. Štai, pavyzdžiui, prieš mažiau nei metus ECC Rekomendacija 15(01) buvo atnaujinta, ir A1.3 skiltyje nesinchronizuotoms TDD sistemoms pasienyje siūloma naudoti $0 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}/5\text{MHz}$ lygį 3 m aukštyje be papildomo koordinavimo. Didelio ploto valstybėms šis pasiūlymas galbūt patogus, tačiau Lietuvai tai turėtų pras-tas pasekmes, susimodeliavus tokią situaciją ir pasirinkus optimistiškiausius rezultatus gaunantį P.1546 modelį gauname tokią situaciją:

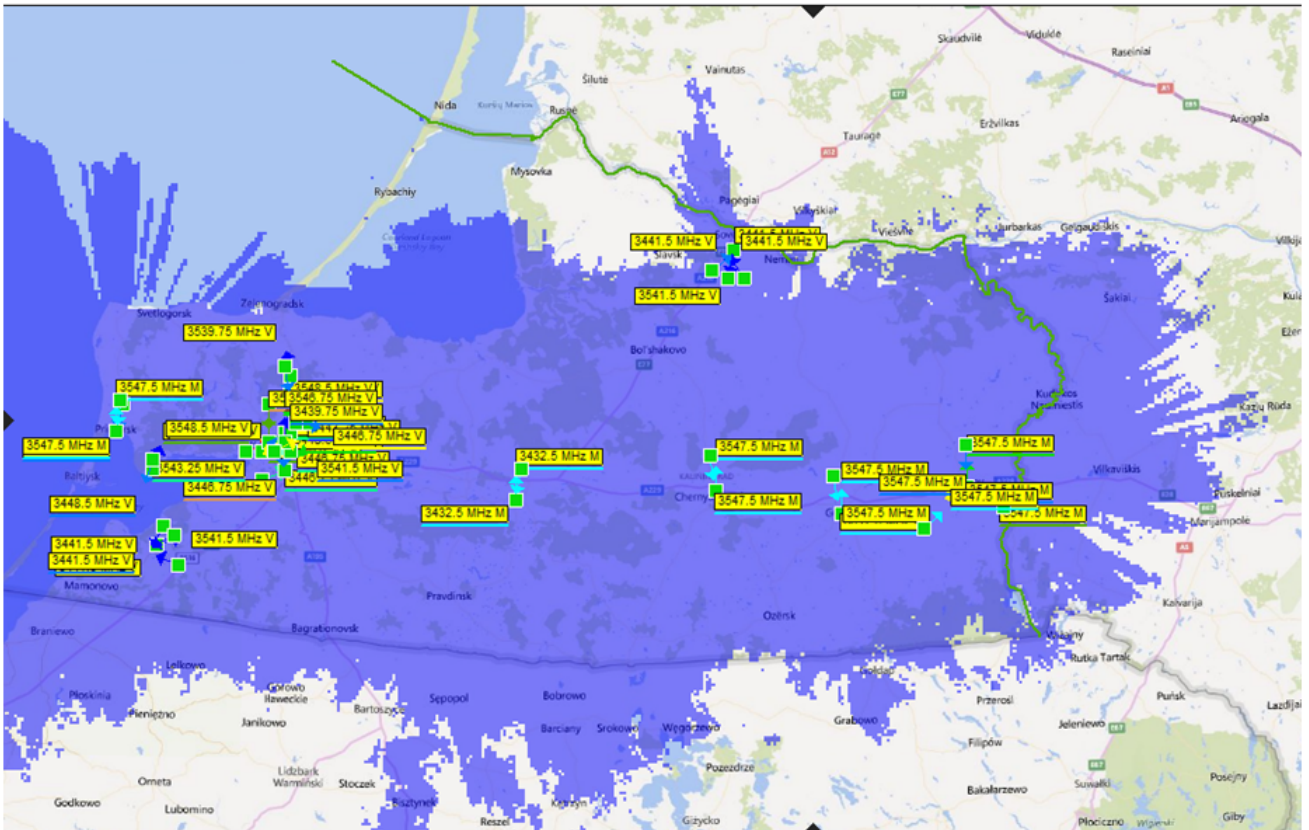


72 pav. Situacija su P.452 modeliu $0 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}/5\text{MHz}$ lygiui ant sienos išsaugoti

Žinant, kad su šia kaimyne sutarti naudoti P.1546 modelį beveik neįmanoma, su P.452 modeliu $0 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}/5\text{MHz}$ lygiui išsaugoti reikėtų stotis riboti dar didesniame plote. Tiesa, vargas ne tik Lietuvai, bet ir likusiomis Baltijos šalimis, taip pat Suomijai, Švedijai, Lenkijai. Išsisukti iš padėties būtų galima naudojant *taškas-daug taškų* technologiją (angl. *point-to-multipoint*), tuomet nebūtų ryšio persijungimo iš vienos bazinės stoties į kitą (angl. *handover*) galimybes.

Visai kraštutinis, bet nebūtinai neteisingas, būdas įvertinti situaciją yra nekreipti dėmesio į Žemės stotis, veikiančias Karaliaučiaus srityje (o gal jos net neveikia?) ir saugoti tik tas stotis, kurios jau yra sukoordinuotos su Lietuva, tai yra fiksuotos tarnybos stotys. Kol kas yra galiojanti, bet sena, 2002 metų, sutartis su Rusija, kurioje nustatytas $-122 \text{ dBW}/\text{MHz}/\text{m}^2$ lygis ant sienos bei dažnių ruožai

suskirstyti į pirmenybinius ir nepirmenybinius. Taigi, paimkime iš duomenų bazės Rusijos fiksuotosios tarnybos stotis, veikiančias jiems priskirtais prioritetiniais dažniais 3430,125–3449,375 MHz ir 3530,125–3549,375 MHz. Panaudokime geriausiai atitinkantį modelį P.2001-3 su 10% laiko tikimybe bei kliūtinėmis zonomis. Lietuvos bazinių stočių EIRP būtų 54 dBm/5MHz, aukštis 40 metrų, elektarinis polinkis -6 laipsniai. Zona, reikalinga išsaugoti RUS stotims $-122 \text{ dBW}/\text{MHz}/\text{m}^2$ nuo LTU 5G stočių atrodytų taip:

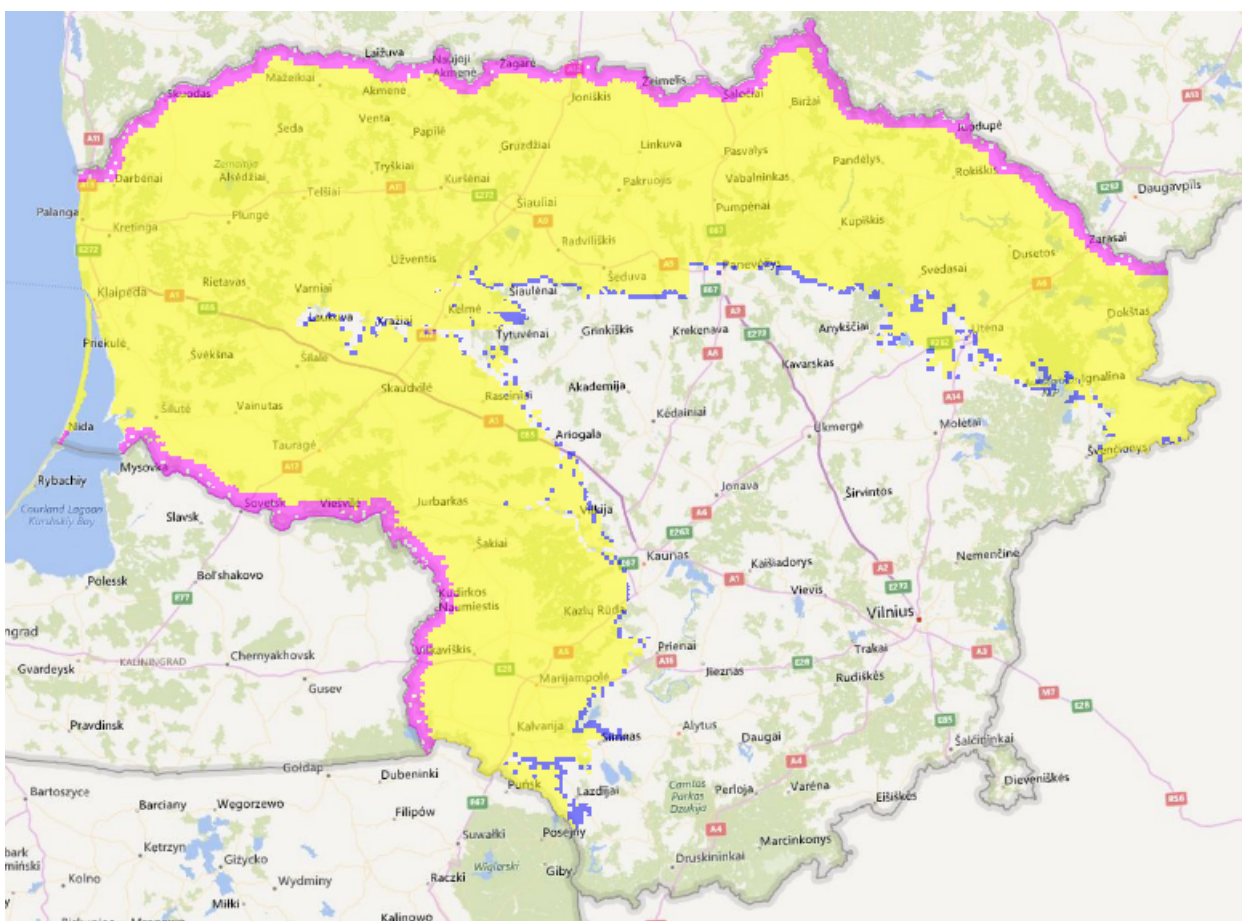


73 pav. Zona, reikalinga išsaugoti RUS stotims $-122 \text{ dBW}/\text{MHz}/\text{m}^2$ nuo LTU 5G stočių

Jeigu būtų priimta vadovautis šiuo principu ir saugoti tik sukoordinuotas fiksuotosios tarnybos stotis, tai būtų pats geriausias variantas po P.1546 modelio naudojimo. Pats prasčiausias scenarijus būtų, jei tektų saugoti jautrias, kariniams tikslams naudojamas Žemės stotis ir taikyti trumpalaikės interferencijos kriterijų. Tačiau kol kas tvirtai pasakyti, kaip bus, negalima, nes 2020 m. liepos mėnesį RRT turėtų sulaukti Rusijos administracijos pažadėtų atlikti papildomų suderinamumo studijų, kurios galbūt parodytų, kad anksčiau siūlytos sąlygos buvo per griežtos. Taip pat RRT šiuo metu bando notifikuoti fiksuotosios *taškas - daug taškų* tarnybos stotis šioje dažnių juostoje ir daug šansų, kad ITU sutiks juos įdėti į pagrindinį tarptautinį radijo dažnių registrą (MIFR).

3.3 Rezultatai 26 GHz juostoje

Lietuva 26 GHz juostoje prieš beveik pora dešimtmečių yra sudariusi sutartis fiksuotai tarnybai veikti su kaimynėmis Latvija ir Rusija. Su Latvija 2003 m. sudaryta sutartis, kurioje nustatyta, kad zonoje, kuri yra toliau nei 32 km nuo pasienio ir neviršija -127 dBW/MHz/m^2 , koordinavimo nereikia. Skaičiavimams sutarta naudoti P.452 modelį su 20% laiko tikimybe, kai imtuvas yra 30 m aukštyje. Su Rusija 2002 m. sudaryta sutartis panaši, skaičiavimams taikomi tie patys kriterijai, tik leidžiamas lygis ant sienos yra -125 dBW/MHz/m^2 ir koordinuoti nereikia tik tada, jei naudojant pirmenybinius dažnius stotis yra 80 km arba toliau nuo sienos, o nepirmenybinius - 100 km arba toliau. Sumodeliavus tokią situaciją ir pasirinkus naudoti 100 MHz kanalo pločio stotis bei 73 dBm EIRP, kai stoties aukštis 40 m, o antena nekryptinė, gaunamas rezultatas, pavaizduotas 74 pav.



74 pav. Galimų trukdžių zona, remiantis sutartimis, sudarytomis su Rusija ir Latvija

Geltona spalva žymi -127 dBW/MHz/m^2 lygį, o mėlyna -125 dBW/MHz/m^2 . Kaip matoma, žalingų trukdžių rizika išlieka 60 km. Žinoma, stoties galią, anteną galima keisti, ir zona būtų mažesnė. Trukdžių zoną sumažinti padėtų judriojo ryšio sistemų (šiuo atveju 5G) sinchronizacija, jei ir kaimyninės šalys diegtų šią technologiją. Šiuo metu yra pateikta paraiška sutarčiai su Rusija nutraukti.

Tačiau technologijos tobulėja, o Europos Sąjungoje reikia užtikrinti efektyvų 24,25–27,5 GHz dažnių juostos naudojimą antžeminėms sistemoms, kurias naudojant galima teikti belaidžio plačiajuosčio elektroninio ryšio paslaugas. Svarbiausia ištirti, koks yra suderinamumas tarp judriojo ryšio sistemų bei gretimose juostose veikiančių sistemų, visų pirma (pasyviosios) palydovinės Žemės tyrimo radijo ryšio tarnybos ir radioastronomijos tarnybos sistemos 23,6–24,0 GHz dažnių juostoje. Šia tema kilo daug diskusijų, pykčių, spekuliacijų. Kiekviena valstybė narė turi savo tikslų, tačiau labiausiai nesutarinama, koks turi būti tinkamas už kanalo esantis (angl. *out-of-band*) bazinių stočių emisijos lygis - -42 dBm/200 MHz ar -39 dBm/200 MHz. Būtų naudinga aptarti kelis valstybių atliktus tyrimus.

JK atliktas tyrimas yra deterministinis. Jame išnagrinėtas suderinamumas tarp vienos perduodančios IMT-2020 stoties (bazinės stoties ir vartotojo įrangos) ir Jodrell Bank, esančios Mančesteryje, radioastronomijos stoties. Siekiant apsaugoti Jodrell Bank stotį, buvo numatyti orientaciniai atskyrimo atstumai, remiantis už kanalo esančiu bazinių stočių emisijos lygiu -42 dB(W/200 MHz)/ -35 dB(m/MHz) bei vartotojo įrangos emisijos lygiu -38 dB(W/200 MHz)/ -31 dB(m/MHz). Nors buvo svarstoma apie -195 dB(W/400 MHz) apsaugą, buvo nuspręsta 23,6-24 GHz dažnių juostoje nustatyti -210 dB(W/250 kHz) apsauginį slenkstinį lygį, nes bet kokio radioastronomijos matavimo, naudojant labai ilgą pradinę interferometriją (angl. *very-long-baseline interferometry*, toliau - VLBI) atskyrimo atstumai dažniausiai būna mažesni nei ištisinių ir spektrinių linijų matavimuose dėl ne tokio griežto VLBI slenksčio, nurodyto ITU-RA.769-2 rekomendacijoje „Apsaugos kriterijai radioastronominiams matavimams”, pavaizduota 75 pav. [35].

Centrinis dažnis (MHz)	Slenkstinis lygis (dB(W/m ² · Hz))
325.3	-217
611	-212
1 413.5	-211
2 695	-205
4 995	-200
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
86 000	-172

75 pav. Slenkstinis trukdžių lygis VLBI stebėjimams [37]

Kaip bebūtų, radioastronomijos apsauga yra nacionalinė problema ir kiekviena stotis yra unikali ir turi būti nagrinėjama atskirai. Tyrime naudoti parametrai buvo paskaičiuoti pagal ITU-R M.2101-0 rekomendaciją, antena sumodeliuota blogiausiam scenarijui - su žymiai didesniu pagrindinio lapelio stiprinimu. Naudoti parametrai pavaizduoti 76 pav.

Kai bazinės stoties elektrinis polinkis 8,2 laipsnio ir mechaninis polinkis 10 laipsnių, tai ji gali susijungti su vartotojo įranga, nutolusia 142 metrų. Tyrime naudota Jodrell Bank stoties imtuvo parametrai buvo tokie: dažnis 23,8 GHz, aukštis 50,5 m, antena yra nekryptinė, o trukdžių kriterijus,

Bazinė stotis		Vartotojo įranga	
Parametras	Vertė	Parametras	Vertė
Antenos pagrindinio lapelio stiprinimas	23 dBi	Antenos pagrindinio lapelio stiprinimas	17 dBi
Bendra išėjimo galia (po ominių nuostolių)	-42 dB(W/200 MHz) = -35 dB(m/MHz)	Antenos elemento galia (prieš ominius nuostolius)	10 dBm
Antenos aukštis	6 m	Bendra išėjimo galia	-38 dB(W/200 MHz) = -31 dB(m/MHz)
Antenos mechaninis polinkis	10 laipsniai	Antenos aukštis	1.5 m
Antenos azimutas	link radijo astronomijos stoties	Antenos azimutas	link radijo astronomijos stoties
Antenos elektinis polinkis	8.2 laipsniai	Antenos polinkis	link radijo astronomijos stoties
Antenos diagrama	ITU-R M.2101 rekomendacija	Antenos elektinis polinkis	nėra
Antenos santykinis stiprinimas nuo smailės horizonto link	-0.2 dB	Antenos diagrama	ITU-R M.2101 rekomendacija
		Antenos santykinis stiprinimas nuo smailės horizonto link	0 dB
		Nuostoliai	3 dB

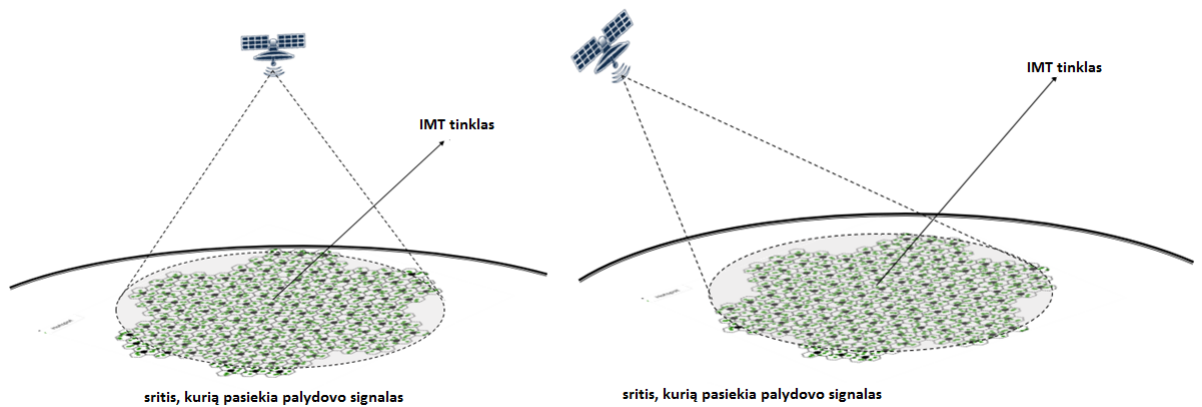
76 pav. Bazinės stoties ir vartotojo įrangos parametrai, naudoti tyrime [37]

kaip minėta, -210 dB(W/250 kHz), naudojant P.452-16 modelį su kliūtinėmis zonomis ir 2% laiko tikimybe. Įskaitoma vieta, atstumas ir dažnis. Šiame tyrime buvo naudojama 1% vietos tikimybė. Buvo padaryta prielaida, kad IMT-2020 sistemos, veikiančios 26 GHz dažniu, bus statomos miestuose ir priemiesčiuose. Gauti rezultatai parodė, kad bazinių stočių atveju išlaikyti nustatytą slenkstinį lygį reiktų iki 9 km atskyrimo atstumo (angl. *separation distance*), vartotojo įrangos atveju - 5 km.

Brazilija atliko turbūt didžiausią kol kas tyrimą, kuriame dirbo daugybė mokslininkų. Jie tyrė suderinamumą tarp EESS (pasyvios) kosminės stoties imtuvo (kaip aukos) ir IMT bazinės stoties siųstuvo bei IMT vartotojo įrangos siųstuvo. Tinklas sudarytas iš 19 makro narvelių (veikiančių žemesniuose dažniuose), kiekviename iš jų yra karštieji tinklo taškai (hotspots), atsirandantys atsižvelgiant į trijų tipų jutiklių (kūginio nuskaitymo, mechaninio nuskaitymo ir “push-broom”) tankį, Ra, Rb ir aprėptį. Bazinė stotis ir ir vartotojo įranga kiekvieną kartą atsiranda vis kitoje vietoje ir skaičiuojami nuostoliai tarp jų. Tuomet simuliacija atlieka „išteklių planavimą” ir galios valdymą, kad būtų galima apskaičiuoti trukdžius tarp sistemų. Taip renkami sistemos efektyvumo rodikliai ir ši procedūra kartojama iš naujo. Iš viso padaryta net 5000 bandymų.

EESS pasyvieji jutikliai – radiometrai yra mažo triukšmo imtuvai ir fiksuoja elektromagnetinę energiją, išsklaidytą nuo Žemės ir atmosferoje esančių vandens garų, kurie dėl aukštos sugerties 23-24 GHz dažnių diapazone veikia kaip spinduliuotės slopintuvai, kartu iškraipantys per juos siunčiamus signalus. Pasyvių jutiklių pagalba registruojama informacija apie atmosferoje vykstančius gamtos reiškinius, todėl šis diapazonas yra labai svarbus užtikrinant tikslių radiometrų veikimą [36]. Jų iš viso yra 8, sužymėti nuo F1 iki F8. F1-F3 ir F6, F8 jutikliai skirti kūginiam nuskaitymui, F4-F5 mechaniniam. Tarpusavyje jie skiriasi savo veikimo pasikartojimo periodo trukme, lapelio stiprinimu, poliarizacija ir t.t. Jų techniniai parametrai plačiau aprašyti ITU-R RS.1861 rekomendacijoje.

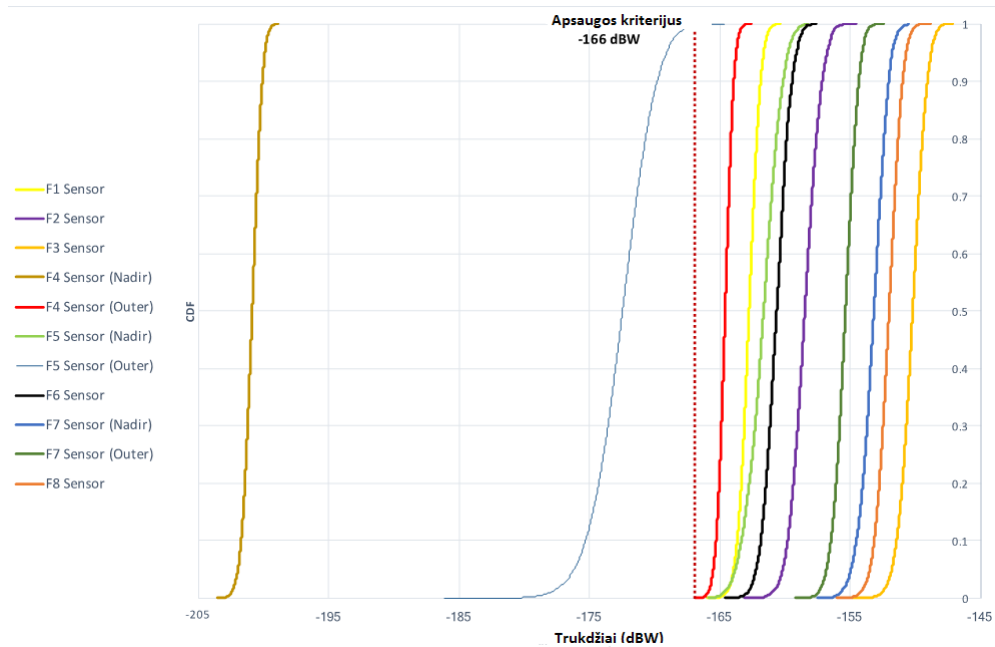
Įvertinti EESS jutiklius yra 2 būdai. Pirmasis nagrinėja IMT tinklą nadyre (dangaus sferos taškas, priešingas zenitui), pavyzdžiui, F4 ir F5 jutiklių atveju. Likusiems jutikliams reikia įvertinti jų pasvirimą IMT tinklo atžvilgiu taip, kad būtų paskaičiuotas antenų stiprinimas. Abu atvejai pavaizduoti 77 pav.



77 pav. EESS palydovo stoties padėtis IMT tinklo atžvilgiu nadyre esantiems jautkliams ir pasvirus [37]

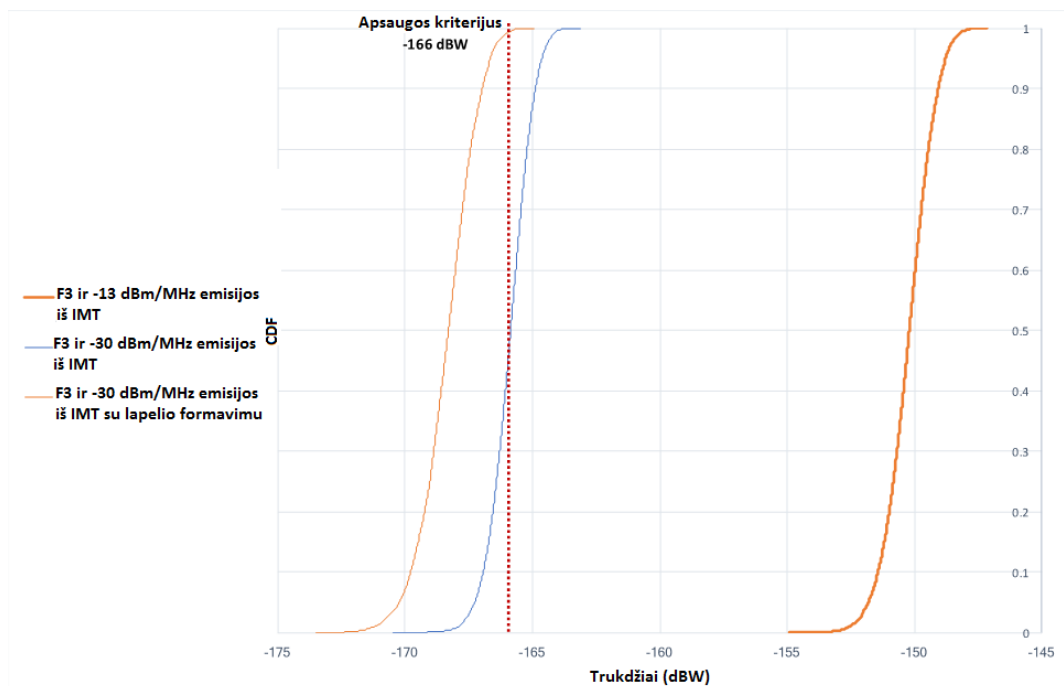
F3 jutiklis pagal atliktus tyrimus yra jautriausias, todėl reikia daugiau dėmesio atkreipti į jį kaip į „blogiausią scenarijų“. Šioje studijoje nustatytas reikalingas apsaugos kriterijus yra $-166 \text{ dB(W/200 MHz)}$, esant blogiausiam trukdžių atvejui F3 jutiklis patirtų lygį net $21,4 \text{ dB}$ viršijančius trukdžius (78 pav.). F3 jutiklio trukdžių lygis pažymėtas oranžine spalva (pirmas nuo dešinės), o raudona punktyrine linija pažymėtas apsaugos kriterijus -166 dBW . Dėl to pateikiama papildoma analizė atsižvelgiant į 150 MHz IMT kanalo poslinkį, kad būtų užtikrinta bendra 400 MHz apsauginė juosta tarp dviejų sistemų. Yra du būdai sumažinti F3 keliamus trukdžius:

- IMT emisijos (angl. *spurious emission*) sumažinimas iki -30 dBm/MHz (lygus -7 dBm/200 MHz arba 37 dB(W/200MHz));
- Lapelio formavimo tobulinimas.



78 pav. EESS stoties jutiklių patiriami trukdžiai iš IMT BS ir UE [37]

Minėti būdai pabandomi praktiškai ir dabar rezultatai atrodo šiek tiek geriau (79 pav.). Ryškiai oranžinė linija yra pradinis rezultatas, mėlsvas - sumažinus emisiją iki -30 dBm/MHz, o švelniai oranžinis - sumažinus emisiją ir formuojant lapelį.



79 pav. Rezultatai, pritaikius trukdžių mažinimo būdus [37]

Kaip matome iš 79 pav., trukdžių sušvelninimas blogiausio scenarijaus atvejui taikant emisijos mažinimą ir lapelio formavimą nėra pakankamas ir vis tiek dar reikėtų 1,1 dB sumažinti trukdžius[37].

Išvados

1. 700 MHz juostoje atlikti aukštynkrypčiame ryšyje atsirandančių trukdžių įtakos bazinėms stotims tiek teoriniai, tiek eksperimentiniai rezultatai parodė, kad 713-718 MHz diapazone IMT tinklų įgyvendinimas dėl didelių trukdžių iš kaimyninių šalių antžeminės televizijos neįmanomas. 718-723 MHz bei 720.5-725.5 MHz ruožuose trukdžių lygis yra priimtinas veikti sistemai, tačiau dėl 770 MHz dažniu veikiančių televizijos stočių, kurios reikalauja griežtos apsaugos, IMT bazinių stočių signalo lygis turi būti sumažintas, dėl to ženkliai sumažėja paslaugos aptarnavimo zona. Taigi, kol veikia antžeminė televizija, tol 5G ryšį įgyvendinti būtų labai sudėtinga.
2. Nors teoriniai skaičiavimai rodo, kad IMT bazinės stotys gali veikti, kai $C/(I+N)$ santykis yra teigiamas, tačiau eksperimentas 700 MHz juostoje parodė, kad aparatūra nedekoduoja naudingo signalo tada, kai I viršija -100 dBm. Iš to galima paaiškinti tam tikrą nesutapimą stiprių trukdžių zonose tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų.
3. 3500 MHz radijo dažnių juostoje teoriniai ir eksperimentiniai elektrinio lauko priklausomybės nuo atstumo rezultatai atitinka labiausiai naudojant P.2001 rekomendaciją ir 10% laiko tikimybę, o mažiausiai - P.1546 rekomendaciją ir 10% laiko tikimybę.
4. 3500 MHz juostoje atlikti teoriniai skaičiavimai parodė, kad judrųjų ryšių šiame dažnių ruože įgyvendinti nepasirašius susitarimo su Rusija nėra galimybių - skaičiuojant su ITU-R P.452 sklidimo modeliu, dėl žalingų trukdžių Lietuvos teritorijoje, neįmanoma pastatyti jokios judriosios tarnybos stoties bent 170 km nuo Rusijos sienos. Ilgalaikių žalingų trukdžių metodu skaičiuojant, trukdžių lygis jautriame Žemės stoties imtuve buvo 26 dB didesnis už leidžiamą, o trumpalaikių trukdžių atveju - 50,8 dB. Vienintelė galimybė yra diegti 5G fiksuotam priėmimui.
5. Pagal turimas sutarčių sąlygas fiksuotajai tarnybai veikti 26 GHz Lietuvoje, rizika patirti žalingus trukdžius 5G sistemoms yra 60 km., tokiu atveju diegiant 5G sistemas ir kaimyninėse šalyse, būtų tikslinga šias sistemas sinchronizuoti.

Literatūra

- [1] RRT 2019 m. IV ketvirčio ataskaita, https://www.rrt.lt/wp-content/uploads/2020/04/Ataskaita_2019_IV_ketvirtis.pdf [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [2] ITU įstatai, <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.94492?jfwid=-je7i1sz4g> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [3] Radijo reglamentas, <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2016> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [4] Dažnių lentelė ir naudojimo planas, <https://www.rrt.lt/radijo-spektras/radijo-dazniu-valdymas/dazniu-lentele-ir-naudojimo-planas/> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [5] https://www.rrt.lt/wp-content/uploads/2018/10/Nokia_5G_Deployment_below_6GHz_White_Paper_EN.pdf [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [6] https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/05/5G-Implementation-Guidelines_v1_nonconfidential-R1.pdf [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [7] GHOSH A. *Essentials of LTE and LTE-A. The Cambridge Wireless Essentials Series*, Cambridge University Press, 2011, 264 p.
- [8] 5G iššūkiai. https://en.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/Report-5G-issues-challenges-march2017.pdf
- [9] <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=GB&lc=eng&ckey=2954737&nid=-34466.977662&id=2954737> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [10] NAM Y. H., NG B. L., SAYANA K., ZHANG Y. Li, J., KIM Y., and LEE J. *Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology*, IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 6, pp. 172–179, Jun. 2013.
- [11] „IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans“, Press Release No. 208, May 2011.
- [12] BARACCA P., WEBER A., WILD T., GRANGEAT C. *A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems*.
- [13] <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=GB&lc=eng&ckey=2954737&nid=-34466.977662> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [14] KEŽIONIS, A. *Radijo sąsaja judriojo ryšio sistemose*. Paskaitų konspektas, Vilnius 2008
- [15] HENRY S., ALSOHAILY A., SOUSA E. *5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System With the ITU IMT-2020 Requirements*, Mar. 2020

- [16] ŽILINSKAS M. *Taikomoji elektrodinamika*, Vilnius 2006
- [17] *REPORT ITU-R S.2368 Sharing studies between International Mobile Telecommunication-Advanced systems and geostationary satellite networks in the fixed-satellite service in the 3 400-4 200 MHz and 4 500-4 800 MHz frequency bands in the WRC study cycle leading to WRC-15*, <http://www.itu.int/pub/R-REP-S.2368> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [18] *Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1432/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [19] *SF.1006 : Determination of the interference potential between earth stations of the fixed-satellite service and stations in the fixed service*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-SF.1006/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [20] PAHL J. *Interference analysis. Modelling radio systems for spectrum management*. Wiley, 2016, 561 p
- [21] *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [22] *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [23] *P.1812: A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1812/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [24] *P.2001 : A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz*, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2001/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [25] *Sharing studies between IMT Advanced systems and geostationary satellite networks in the fixed-satellite service in the 3 400-4 200 and 4 500-4 800 MHz frequency bands*, <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2109> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [26] *REPORT ITU-R S.2368 Sharing studies between International Mobile Telecommunication-Advanced systems and geostationary satellite networks in the fixed-satellite service in the 3 400-4 200 MHz and 4 500-4 800 MHz frequency bands in the WRC study cycle leading to WRC-15*, <http://www.itu.int/pub/R-REP-S.2368> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [27] <https://www.rrt.lt/rrt-skelbia-viesaja-apklausa-del-5g-pletros-26-ghz-radijo-dazniu-juostoje/>
- [28] *Harmonised technical conditions for the 24.25-27.5 GHz ('26 GHz') frequency band*, <https://www.eco-docdb.dk/download/647092ab-e807/CEPT%20Report%2068.pdf> [Žiūr. 2020 - 05- 28]

- [29] *ECC Decision of 6 July 2018 on the harmonised technical conditions for Mobile/Fixed Communications Networks (MFCN) in the band 24.25-27.5 GHz*, <https://www.ecodocdb.dk/download/5e74d0b8-fbab/ECCDec1806.pdf> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [30] https://en.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/Report-5G-issues-challenges-march2017.pdf [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [31] <https://www.rrt.lt/radijo-spektras/radijo-dazniu-naudojimas/leidimai-naudoti-radijo-daznius/> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [32] http://www.akis.mii.lt/?fuseaction=apie_programa.browse [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [33] <https://www.cept.org/eco/eco-tools-and-services/seamcat-spectrum-engineering-advanced-monte-carlo-analysis-tool> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [34] <https://www.rrt.lt/radijo-spektras/radijo-spektro-stebesena/> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [35] <https://www.itu.int/rec/R-REC-RA.769-2-200305-I/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [36] https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/09/sem.wmo/c/R09-SEM.WMO-C-0010!!PDF-E.pdf [Žiūr. 2020 - 05- 28]
- [37] *Sharing and compatibility of passive services in adjacent bands and IMT operating in the 24.25-27.5 GHz frequency range*, <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1.AR-C-0228/en> [Žiūr. 2020 - 05- 28]

Santrauka

Neprabėgus nei dešimtmečiui po to, kai Lietuvos rinkoje startavo ketvirtosios kartos ryšys, telekomunikacijų industrija ruošiasi penktosios kartos standartui. Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnybos duomenimis, 2019 metų IV ketvirtį išsiųstų ir priimtų duomenų kiekis siekė 138 219 TB (iš kurių net 130 293 TB duomenų naudojant 4G), palyginimui, prieš metus buvo 92 115 TB. Taigi, turime net 50% didesnę suvartotą duomenų kiekį [1]. Jei tokios tendencijos išliks, 4G tinklas nebeturės pakankamai resursų aptarnauti visus vartotojus. Šią problemą galėtų išspręsti 5G - tai penktos kartos belaidžio plačiajuosčio ryšio technologija. Europos Sąjungoje yra nurodyti trys pirmenybiniai radijo dažnių ruožai 5G ryšiui - 700 MHz, 3500 MHz bei 26 GHz, juose dar nėra veikusios judriosios tarnybos stotys. 700 MHz juostoje šiuo metu veikia antžeminė televizija, 3500 MHz radijo dažnių juostoje veikia Žemės stotys. 26 GHz dažnyje reikia užtikrinti pasyviosios Žemės tyrimo radijo ryšio tarnybos (EESS) apsaugą 23,6–24,0 GHz dažnių juostoje. Šio darbo tikslas yra apžvelgti visų trijų ES prioritetinių 5G dažnių plusus ir minusus diegiant judrųjų ryšį bei atlikti suderinamumo su ten jau veikiančiomis tarnybomis analizę ir įvertinti, ar yra galimybė Lietuvoje šiuos dažnius naudoti 5G technologijai.

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados yra:

1. 700 MHz juostoje atlikti aukštynkrypčiame ryšyje atsirandančių trukdžių įtakos bazinėms stotims tiek teoriniai, tiek eksperimentiniai rezultatai parodė, kad 713-718 MHz diapazone IMT tinklų įgyvendinimas dėl didelių trukdžių iš kaimyninių šalių antžeminės televizijos neįmanomas. 718-723 MHz bei 720.5-725.5 MHz ruožuose trukdžių lygis yra priimtinas veikti sistemai, tačiau dėl 770 MHz dažniu veikiančių televizijos stočių, kurios reikalauja griežtos apsaugos, IMT bazinių stočių signalo lygis turi būti sumažintas, ko pasekoje ženkliai sumažėja paslaugos aptarnavimo zona. Taigi, kol veikia antžeminė televizija, tol 5G ryšį įgyvendinti būtų labai sudėtinga.
2. Nors teoriniai skaičiavimai rodo, kad IMT bazinės stotys gali veikti, kai $C/(I+N)$ santykis yra teigiamas, tačiau eksperimentas 700 MHz juostoje parodė, kad aparatūra nedekoduoja naudingo signalo tada, kai I viršija -100 dBm. Iš to galima paaiškinti tam tikrą nesutapimą didelės interferencijos zonose tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų.
3. 3500 MHz radijo dažnių juostoje teoriniai ir eksperimentiniai elektrinio lauko priklausomybės nuo atstumo rezultatai atitinka labiausiai naudojant P.2001 rekomendaciją ir 10% laiko tikimybę, o mažiausiai - P.1546 rekomendaciją ir 10% laiko tikimybę.
4. 3500 MHz juostoje atlikti teoriniai skaičiavimai parodė, kad judrųjų ryšį šiame dažnių ruože įgyvendinti nepasirašius susitarimo su Rusija nėra galimybių - skaičiuojant su ITU-R P.452 sklidimo modeliu, dėl žalingų trukdžių Lietuvos teritorijoje, neįmanoma pastatyti jokios judriosios tarnybos stoties bent 170 km nuo Rusijos sienos. Ilgalaikių žalingų trukdžių metodu skaičiuojant,

trukdžių lygis jautriame Žemės stoties imtuve buvo 26 dB didesnis už leidžiamą, o trumpalaikių trukdžių atveju - 50,8 dB. Vienintelė galimybė yra diegti 5G fiksuotam priėmimui.

5. Pagal turimas sutarčių sąlygas fiksuotajai tarnybai veikti 26 GHz Lietuvoje, rizika patirti žalingus trukdžius 5G sistemoms yra 60 km., tokiu atveju diegiant 5G sistemas ir kaimyninėse šalyse, būtų tikslinga šias sistemas sinchronizuoti.

Summary

Within less than 10 years since 4G technology has started, there is already a demand for high data traffic in many spheres of industry and casual life. The load of the mobile network is growing every year in Lithuania and other countries. This problem could be overcome with implementation of new 5G network technology, which could provide communications with much higher data transfer speed and applications in many industrial spheres as well. The pioneer frequency bands in EU are 700 MHz, 3500 MHz and 26 GHz where no mobile networks were used before. It is still a task to implement these bands with existing networks and minimal interference with non-EU countries that use these bands for different purposes. The aim of this work is to overview all three pioneer frequency bands designed for 5G communication to be established in EU by analyzing implementation on mobile connectivity and compatibility with already used communication networks in Lithuania and evaluating the prospects of 5G technology installation in the region.

The main conclusions of this work are:

1. Theoretical and experimental results on the 700 MHz band have shown that there is high level of harmful interference in 713-718 MHz band because of neighbouring non-EU countries terrestrial television use, therefore the IMT network cannot be used in the region. With bands of 718-723 MHz and 720.5-725.5 MHz the interference levels are lower so the 5G network could be established, however due to television use on band 770 MHz, the power of these antennas should be lowered but with loss of servicing zone. So, the implementation of 5G in Lithuania in 700 MHz band is very complicated if terrestrial television is still in use.

2. Even though theoretical calculations show that IMT base stations should work when $C/(I+N)$ ratio positive, the experimental results on 700 MHz band show that signals from the network are not recognized if I is above -100 dBm. This can be concluded that in zones of high level interference there is high disagreement between experiment and theoretical results.

3. On radio frequency band of 3500 MHz the theoretical and experimental results best coincide when using P.2001 recommendation and 10% time probability. The worst results are obtained when using P.1546 recommendation and 10% time probability.

4. Theoretical calculations on 3500 MHz band show that the establishing of mobile network in Lithuania is not likely possible without common agreement with Russia – according to calculations on ITU-R P.452 propagation model, due to high levels of interference the closest mobile stations must be further than 170 km away from Russia border. Based on long term interference method the distortion in terrestrial station was 26 dB higher than allowed, and in short term - 50,8 dB than allowed. The only possibility of 5G network use could be fixed service stations.

5. Based on international agreements on 26 GHz band in Lithuania, harmful interference appears in 60 km zone from the border. Synchronisation could solve this problem.