



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Julius Akučka

E-JUOSTOS MIKROBANGIŲ SISTEMŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vitas Grimaila

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA

E-JUOSTOS MIKROBANGIŲ SISTEMŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Vitas Grimaila
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Saulius Japertas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Julius Akučka
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Julius Akučka

(Studento vardas, pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „E-juostos mikrobangių sistemų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Juliaus Akučkos**, baigiamasis projektas tema „E-juostos mikrobangių sistemų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Akučka, Julius. E-juostos Mikrobangių Sistemų Tyrimas. Telekomunikacijų inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *E-juosta*.

Kaunas, 2017. 71 p.

SANTRAUKA

Darbo tikslas – atlikti E-juostos mikrobangių sistemų analizę bei eksperimentinius 71 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimus.

Analitinėje dalyje apžvelgiamos E-juostos diapazone veikiančių mikrobangių sistemų savitos radijo ryšio signalo ir duomenų perdavimo savybės bei galimos panaudojimo sritys. Taipogi nagrinėjama meteorologinių sąlygų įtaka milimetrinių bangų sklidimui bei atliekama esamų radijo bangų sklidimo nuostolius įvertinančių modelių ir pagrindinių E-juostos mikrobangių sistemų ryšio parametrų analizė.

Tiriamajoje dalyje atliekami eksperimentiniai 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimai, kurių metu buvo stebima priimamo signalo galios priklausomybė nuo siunčiamo signalo lygio ir jo dažnio. Taipogi tuo pat metu buvo registruojama vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos priklausomybė nuo siunčiamos radijo bangos galios bei dažnio. Matavimų metu surinkti duomenys galiausiai buvo apdoroti ir palyginti su teorinių modelių rezultatais.

Akučka, Julius. Investigation of E-band Microwave Systems: Master's thesis in Telecommunications engineering master degree / supervisor assoc. prof. Vitas Grimaila. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *E-band*.

Kaunas, 2017. 71 p.

SUMMARY

Work objective – the analysis of E-band microwave systems and experimental radio wave propagation measurements in the 71 – 86 GHz range.

In the analytical part the radio communication signals of microwave systems operating in the E-band range are examined, specifically – the signal's strength, it's data transfer properties and possible fields of use. In addition, the influence of weather conditions on millimeter wave propagation, existing radio wave propagation loss assessment models and primary E-band microwave system's radio parameters are analyzed.

In the research part experimental measurements of radio wave propagation in 71 – 76 GHz and 81 – 86 GHz ranges are taken, during which the incoming signal strength dependency on the level and frequency of the transmitted signal was being observed. At the same time the mean square error dependency on the signal strength and frequency of the transmitted radio wave was recorded. The data gathered from the measurements was then processed and compared to the results of theoretical models.

Turinys

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas.....	8
Įvadas.....	10
1. E-juostos apžvalga.....	12
1.1 Trumpa E-juostos atsiradimo istorija.....	13
2. E-juostos pagrindiniai privalumai	14
2.1 Didesnė nei 2,5 Gbit/s duomenų perdavimo sparta	14
2.2 Nedidelė interferencijos rizika.....	15
2.3 Supaprastintas licencijavimas	16
3. Panaudojimo sritys	17
3.1 Transportinis tinklas	18
3.2 Paskirstytų antenų sistemos	20
3.3 Laikinas paslaugų teikimo atkūrimas nelaimės atveju.....	22
3.4 Vietinio tinklo tiltai.....	23
3.5 Optinio ryšio tinklo praplėtimas	24
4. E-juostos ruožo transiveriai.....	25
4.1 Siųstuvo dalis.....	26
4.2 Imtuvo dalis	26
5. Meteorologinių sąlygų įtaka elektromagnetinių bangų sklidimui.....	26
5.1 Atmosferos dujų įtaka radijo bangų sklidimui.....	27
5.2 Lietaus įtaka radijo bangų sklidimui.....	27
5.3 Rūko įtaka radijo bangų sklidimui.....	29
6. Radijo ryšio bangų sklidimo modelių apžvalga	30
6.1 Laisvos erdvės nuostolius įvertinantis modelis	30
6.2 Logaritminis atstumo nuostolius įvertinantis modelis.....	31
6.3 ITU-R atmosferos dujų įtaką įvertinantis modelis.....	32
6.4 ITU-R lietaus įtaką įvertinantis modelis.....	34
6.5 ITU-R rūko ir debesų įtaką įvertinantis modelis	37
7. Pagrindiniai E-juostos mikrobangių sistemų parametrai.....	38
8. E-juostos diapazono elektromagnetinių bangų sklidimo matavimai.....	40
8.1 Matavimų atlikimo vieta.....	41
8.2 Matavimuose naudota įranga bei jos konfigūracija	42
8.3 Atlikti matavimai ir jų rezultatai.....	46
8.4 Surinktų duomenų apdorojimas ir rezultatų pateikimas	55
Išvados ir pasiūlymai.....	66

Informacinių šaltinių sąrašas	68
Priedai.....	72
1 priedas. Spektroskopiniai duomenys deguonies slopinimui apskaičiuoti.....	72
2 priedas. Spektroskopiniai duomenys vandens garų slopinimui apskaičiuoti.....	73
3 priedas. k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų dydžiai prie fiksuoto bangos dažnio	74
4 priedas. Hidrometeorologinės stotelės kodas.....	77
5 priedas. Išmatuotų RSL ir MSE parametrų priklausomybė nuo TSL ir dažnio verčių.....	78
6 priedas. Apskaičiuotų parametrų priklausomybė nuo TSL ir dažnio verčių	80
7 priedas. Apskaičiuotų parametrų priklausomybė nuo TSL ir dažnio verčių	83

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas

BER	klaidingų bitų santykis (angl. <i>Bit Error Rate</i>)
BPF	Berklio paketinis filtras (angl. <i>Berkeley Packet Filter</i>)
BPSK	dvejetainė fazės moduliacija (angl. <i>Binary Phase Shift Keying</i>)
BTS	bazinė stotis (angl. <i>Base transceiver Station</i>)
CEPT	Europos pašto ir telekomunikacijų administracijų konferencija (angl. <i>European Conference for Postal and Telecommunications Administrations</i>)
DAS	paskirstytų antenų sistema (angl. <i>Distributed Antenna System</i>)
DL	žemakryptis ryšys (angl. <i>Downlink</i>)
ECC	Europos valdymo konferencija (angl. <i>European Control Conference</i>)
ES	klaidinga sekundė (angl. <i>Errored Second</i>)
ETSI	Europos telekomunikacijų standartizacijos institutas (angl. <i>European Telecommunications Standards Institute</i>)
FCC	Federalinė ryšių komisija (angl. <i>Federal Communications Commission</i>)
FDD	dvipusis dažnių dalijimas (angl. <i>Frequency Division Duplex</i>)
FPGA	perkonfiguruojama loginių elementų matrica (angl. <i>Field Programmable Gate Array</i>)
FSL	nuostoliai laisvoje erdvėje (angl. <i>Free Space Loss</i>)
HDFS	didelio tankio fiksuotos paslaugos (angl. <i>High Density Fixed Services</i>)
IF	tarpinis dažnis (angl. <i>Intermediate Frequency</i>)
IP	interneto protokolas (angl. <i>Internet Protocol</i>)
ITU	Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (angl. <i>International Telecommunication Union</i>)
LAN	vietinis kompiuterinis tinklas (angl. <i>Local Area Network</i>)
LO	vietinis generatorius (angl. <i>Local Oscillator</i>)
LTE	ilgalaikės evoliucijos technologija (angl. <i>Long Term Evolution</i>)
MIMO	daugybiniis įėjimas ir daugybiniis išėjimas (angl. <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>)
MSE	vidutinė kvadratinė paklaida (angl. <i>Mean Square Error</i>)

PLR	prarastų paketų santykis (angl. <i>Packet Loss Rate</i>)
PoP	buvimo taškas (angl. <i>Point of Presence</i>)
QAM	kvadratūrinė amplitudinė moduliacija (angl. <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
QPSK	kvadratūrinė fazės moduliacija (angl. <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)
RRU	nutolęs radijo blokas (angl. <i>Remote Radio Unit</i>)
RSL	priimamas signalo lygis (angl. <i>Receive Signal Level</i>)
TDD	dvipusis laiko dalijimas (angl. <i>Time Division Duplex</i>)
TSL	siųstuvo išspinduliuoto signalo galios lygis (angl. <i>Transmit Signal Level</i>)
UAS	nepasiekiamos sekundės (angl. <i>Unavailable Seconds</i>)
UL	aukštakryptis ryšys (angl. <i>Uplink</i>)
WRC	Pasaulinė radijo ryšio konferencija (angl. <i>World Radiocommunication Conference</i>)

Įvadas

Kiekvienais metais kompiuterių, išmaniųjų telefonų, televizorių ir kitų, fiksuotą ar judrųjį ryšį naudojančių, įrenginių funkcionalumas plečiasi. Kartu didėja įrenginių integracija, kuri keičia vartotojų bendravimo, informacijos ieškojimo bei naršymo internete įpročius. Mobilųjų paslaugų vartotojai būdami gamtoje, važiuodami autobusu ar vaikščiodami miesto gatvėmis gali apsikeisti tekstiniais ir balsiniais pranešimais, naršyti internete, parsisiųsti norimus failus, žaisti realaus laiko žaidimus, stebėti aukštos kokybės vaizdo transliacijas bei naudotis kitomis, didelės duomenų perdavimo spartos reikalaujančiomis, paslaugomis. Tobulėjančios technologijos, augantis duomenų apdorojimo našumas bei esamų ir naujai kuriamų paslaugų įvairovė skatina nuolatinį suvartojamų duomenų augimą.

Nemaža šių duomenų dalis tenka fiksuotoms belaidžio ryšio sistemoms, kurios paprastai apjungia korinio ryšio bazines stotis, įmonių pastatus ar praplečia esamo tinklo infrastruktūrą vietiniais ir privačiais kompiuteriniais tinklais. Iki šiol naudotos tradicinės, žemesniame dažnių ruože (6 – 38 GHz) veikiančios, mikrobangės sistemos nebeužtikrina naujos kartos paslaugų keliamų reikalavimų. Perduodama duomenų kiekį galima padidinti, pakeičiant tradicines mikrobanges sistemas šviesolaidiniu ryšiu, tačiau neretai optinių skaidulų infrastruktūros aprėptis yra ribota, o naujų optinių linijų tiesimas yra per brangus. Optinių skaidulų ir tradicinių radijo ryšio relinių linijų keliamas problemas išsprendžia E juostos diapazone veikiančios mikrobangės sistemos, kurių perdavimo sparta, taikant paprastą QSPK moduliaciją, viršija 1 Gbit/s.

E juosta yra 10 GHz pločio elektromagnetinio spektro ruožas, susidedantis iš dviejų 5 GHz pločio dažnių juostų. Pirmoji juosta driekiasi 71 – 76 GHz ribose, o antroji – 81 – 86 GHz. Dėl išskirtinių milimetrinių bangų sklidimo savybių, 70/80 GHz diapazono radijo siųstuvų išsiųsto signalo spinduliuotės plotis paprastai neviršija 4 laipsnių. Ypač aukštų dažnių bangų sklidimo savybės leido supaprastinti dažnių planavimą bei sumažinti gretimų E juostos siųstuvų interferencijos tikimybę.

Didžioji dalis E juostos ruože veikiančių radijo ryšio sistemų yra naudojamos lauke. Priklausomai nuo 70/80 GHz ruožo sistemų geografinės padėties, transiverių kelyje gali atsirasti įvairių meteorologinių kliūčių, kurios skirtingai paveiks elektromagnetinių bangų sklidimą. Giedro oro sąlygomis, ore esančių natūralių dujų sukeliamas elektromagnetinių bangų slopinimas yra dominuojantis veiksnys įtakojantis radijo bangų skverbimą. Tačiau atmosferoje kurioje yra debesų ar lietaus pavidalu sukaupto vandens, vandens dariniai yra pagrindinė radijo bangų nuostolių priežastis. Visų šių elektromagnetinių bangų nuostolius sukeliančių veiksnių įtaką galima įvertinti remiantis radijo bangų sklidimo modeliais.

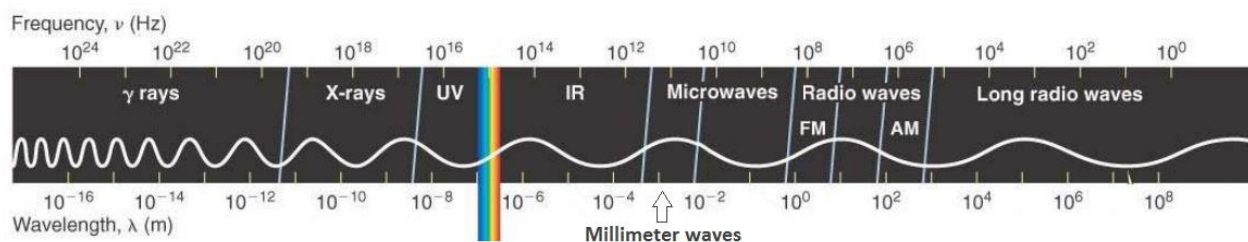
Darbo tikslas – atlikti E-juostos mikrobangių sistemų analizę bei eksperimentinius 71 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimus.

Darbo uždaviniai:

- Apžvelgti E-juostos mikrobangių sistemų savybes ir taikymo sritis.
- Išnagrinėti meteorologinių sąlygų įtaką milimetrinių bangų sklidimui.
- Atlikti esamų radijo bangų sklidimo nuostolius įvertinančių modelių analizę.
- Išanalizuoti pagrindinius E-juostos mikrobangių sistemų ryšio parametrus ir sudaryti matavimų schemą.
- Atlikti eksperimentinius 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimus ir gautus rezultatus palyginti su teoriniais modeliais.

1. E-juostos apžvalga

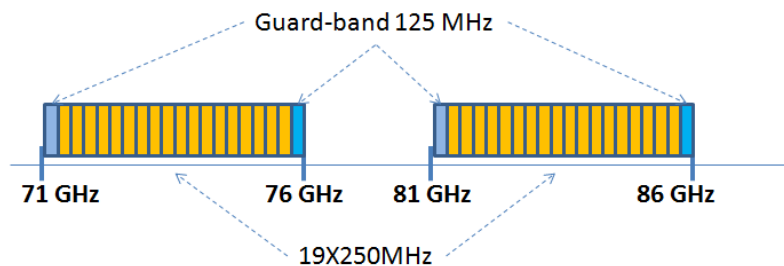
E-juosta yra 10 GHz pločio elektromagnetinio spektro ruožas, susidedantis iš dviejų 5 GHz pločio dažnių juostų. Pirmoji juosta driekiasi 71 – 76 GHz ribose, o antroji – 81 – 86 GHz. Tarpusavyje jos yra atskirtos 5 GHz pločio ruožu, kuris prasideda nuo 76 GHz ir tęsiasi iki 81 GHz [1]. Šis ruožas šiuo metu naudojamas su valstybės gynyba susijusiems radiolokacijos poreikiams tenkinti, radijo mėgėjų stotims, mažojo nuotolio radijo ryšio įrenginiams ir radarams [2]. E-juosta priklauso milimetriniam bangų ruožui arba kitaip – ypač aukštų dažnių diapazonui. Šio diapazono bangų ilgis svyruoja nuo 1 centimetro iki 1 milimetro [3] (1 pav.).



1 pav. Elektromagnetinių bangų spektras

2003 metais Europos valdymo konferencija (ECC) pateikė radijo kanalų paskirstymo fiksuoto ryšio paslaugų sistemoms, veikiančioms 71 – 76 ir 81 – 86 GHz diapazonuose, rekomendaciją. Tačiau rekomendacijoje nebuvo numatytas konkretus kanalų paskirstymas ir jų apjungimas, neskaitant bendrinio dažnių juostos suskirstymo į 250 MHz pločio kanalus. Toks kanalų suskirstymas kiekvienoje 5 GHz pločio juostoje leidžia turėti 19 ryšio kanalų ir po 1 užtvartinį 125 MHz pločio ruožą iš abiejų 5 GHz juostos pusių.

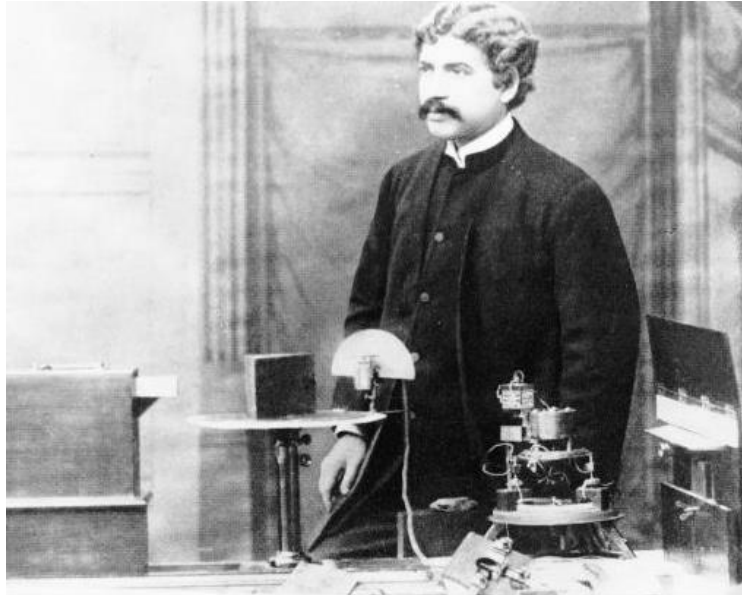
2009 metais ECC išleido 2003-ųjų metų rekomendacijos reviziją su konkretesnėmis kanalų paskirstymo gairėmis. Joje buvo nurodytas naudotinas radijo kanalų plotis, pagal kurį abu 5 GHz pločio ruožai gali būti suskirstyti į 250 – 4750 MHz pločio kanalus (2 pav.). Lankstus kanalo pločio parinkimas leidžia naudoti dvipusį laiko (TDD) arba dažnio dalijimą (FDD), priklausomai nuo turimo spektro ruožo ir teikiamų paslaugų tipo [1].



2 pav. Kanalų paskirstymas 71 – 76 ir 81 – 86 GHz diapazonuose

1.1 Trumpa E-juostos atsiradimo istorija

Indų kilmės mokslininkas J.C. Bose (3 pav.), susidomėjęs kitų mokslininkų tyrimais apie elektromagnetinį spektrą, 1890-ųjų dešimtmetyje atrado milimetrines bangas [4]. Beveik po 50 metų tolimesnių eksperimentų universiteto ir vyriausybės laboratorijose, milimetrinių bangų technologija buvo pradėta taikyti radijo astronomijoje, o dar po 10 – karinėje pramonėje [5].



3 pav. J.C. Bose demonstruoja milimetrines bangas

1979 metais per pasaulinę radijo ryšio konferenciją (WRC) tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (ITU) priskyrė fiksuoto belaidžio ryšio paslaugoms 71 – 76 ir 81 – 86 GHz dažnių diapazoną. Tačiau iki 90-ųjų metų pabaigos šis diapazonas nesulaukė komercinio dėmesio. Visa tai pasikeitė, kai federalinė ryšių komisija publikavo straipsnį apie milimetrinių bangų panaudojimą radijo paslaugų vystymui.

2000 metais vykusioje WRC konferencijoje ITU delegatai diskutavo apie didelio tankio fiksuotas paslaugas (HDFS) ypač aukštų dažnių srityje. Tais pačiais metais vyko keletas kitų renginių, kurie dar labiau padidino susidomėjimą E-juosta. Susidomėjimo augimą taipogi paskatino atsiradusios pažangios technologijos, kurios leido komerciškai gaminti komponentus, operuojančius milimetrinių bangų ruože. Prie viso to prisidėjo ir naudojamų dažnių juostų užimtumas, kuris vertė pradėti ieškoti alternatyvių dažnių ruožų.

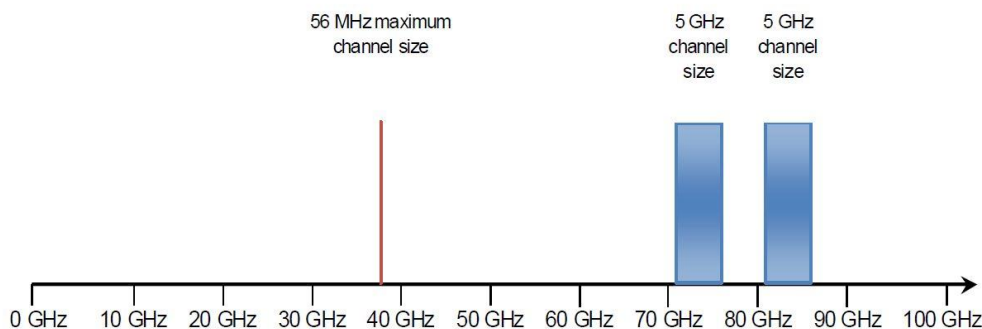
2002 metais FCC pasiūlė reglamentą dėl 71 – 76, 81 – 86 ir 92 – 95 GHz dažnių juostų valdymo taisyklių, kuris 2003 metais buvo priimtas. Toliau sekė lengvo dažnių licencijavimo schema, kuri buvo pristatyta 2005 metais. Tais pačiais 2005 metais Europa pasekė Jungtinių Valstijų pavyzdžiu ir Europos pašto ir telekomunikacijų administracijų konferencija (CEPT) išleido panašaus tipo reglamentą. Tuo tarpu 2006 metais ETSI pateikė techninės įrangos, veikiančios 71 – 76 ir 81 – 86 GHz ruožuose, taisykles [6].

2. E-juostos pagrindiniai privalumai

Keletas skirtingų belaidžio plačiajuosčio ryšio technologijų varžosi tarpusavyje, tačiau 70/80 GHz diapazono sistemos gerokai jas lenkia. Atskirtį tarp šiuo metu vyraujančių technologijų lemia E-juostos ruožo sistemoms priskirtas elektromagnetinio spektro ruožo plotis ir jo vieta spektre. Dėl kurio E-juostos mikrobangių sistemų duomenų perdavimo sparta, naudojant paprastą moduliaciją siekia keletą Gbit/s. Taipogi dėl išskirtinių milimetrinių bangų sklidimo savybių, 70/80 GHz diapazono radijo siųstuvų išsiųsto signalo spinduliuotės plotis paprastai neviršija 4 laipsnių. Unikalioms ypač aukštų dažnių perdavimo savybės leido supaprastinti dažnių planavimą bei sumažinti gretimų E-juostos siųstuvų interferencijos tikimybę. Dėl šių priežasčių koordinavimo ir licencijavimo institucijos priėmė 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono „lengvo licencijavimo“ nuostatas, kurios garantuoja interferencijos apsaugą bei greitą ir pigų licencijos išdavimą. Tuo pat metu E-juostos mikrobangės sistemos išliko universalios, santykinai pigios ir greit įdiegiamos.

2.1 Didesnė nei 2,5 Gbit/s duomenų perdavimo sparta

Belaidėmis ryšio linijomis perduodamų duomenų sparta tiesiogiai priklauso nuo dažnių juostos pločio, kuria šie duomenys yra perduodami. Kuo dažnių juosta platesnė, tuo didesnę duomenų kiekį galima ja perduoti. E-juostai priklausantis 10 GHz pločio elektromagnetinio spektro diapazonas, susidedantis iš dviejų 5 GHz pločio dažnių juostų (71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz), yra didžiausias kada nors belaidžio ryšio technologijai paskirtas elektromagnetinio spektro ruožas [7]. Šis ruožas atitinkamai gali būti suskirstytas į 250 – 4750 MHz pločio kanalus. Sąlyginai nevaržomas kanalo pločio parinkimas leidžia suprojektuoti itin didelės perdavimo spartos dvipusį dažnių dalijimą naudojančią belaidžio ryšio sistemą. Tuo tarpu 6 – 38 GHz diapazono mikrobangių sistemų didžiausias leistinas kanalo dydis be grupavimo yra 56 MHz, t.y. beveik 5 kartus mažesnis už 71 – 86 GHz diapazone numatytą pradinį kanalo plotį [8].



4 pav. Didžiausi leistini kanalų pločiai 6 – 38 ir 71 – 86 GHz diapazonuose

6 – 38 GHz diapazono mikrobangės sistemos maksimali kanalo talpa, naudojant 256 QAM aukšto lygmens moduliaciją, siekia 350 – 500 Mbit/s. Tokia perdavimo sparta, kasmet nepaliaujamai

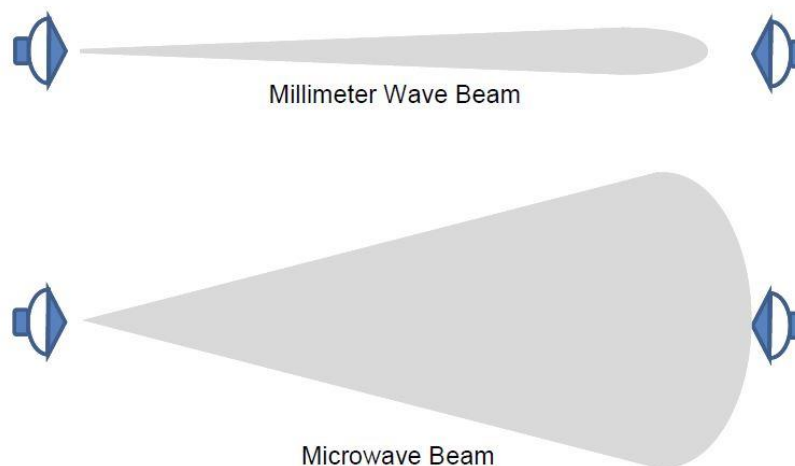
augant suvartojamam duomenų kiekiui, netenkina paslaugų teikėjų reikalavimų. Šią problemą išsprendžia 71 – 86 GHz radijo ryšio sistemos, kurių perdavimo sparta, taikant paprastą QSPK moduliaciją, viršija Gbit/s. Didesnės duomenų perdavimo spartos pasiekiamos plečiant kanalo juostos plotį, naudojant aukštesnio lygio moduliacijas bei MIMO technologiją [9].

1 lent. Duomenų perdavimo spartos priklausomybė nuo moduliacijos tipo ir kanalo pločio

MODULATION TYPE	CHANNEL BANDWIDTH	PEAK THROUGHPUT RATE
QPSK Strong	250 MHz	530 Mbit/s
	500 MHz	1,000 Mbit/s
QPSK Standard	250 MHz	1,000 Mbit/s
	500 MHz	1,800 Mbit/s
16QAM	250 MHz	1,900 Mbit/s
	500 MHz	2,500 Mbit/s
32QAM	250 MHz	2,300 Mbit/s
	500 MHz	≥2,500 Mbit/s
64QAM	250 MHz	≥2,500 Mbit/s
	500 MHz	≥2,500 Mbit/s

2.2 Nedidelė interferencijos rizika

Tradicinių, žemesniame dažnių ruože (6 – 38 GHz) naudojamų, mikrobangių sistemų spinduliuotės diagrama yra gerokai platesnė, lyginant su E-juostos diapazone veikiančių radijo ryšio sistemų diagramomis (5 pav.). Naudojant ekvivalentišką anteną, spinduliavimo plotis tarp 18 ir 80 GHz diapazono sistemų skiriasi keturis kartus [5]. Tai patvirtina difrakcijos dėsnis, kuris teigia, jog spinduliuotės plotis yra atvirkščiai proporcingas sklindančios bangos dažniui. E-juostos siūstuvų spinduliavimo diagrama dažnai vadinama „pencil beam“, kadangi jos plotis paprastai neviršija 4 laipsnių. Siauras spinduliuotės plotis leidžia įrengti mikrobanges sistemas arti viena kitos užtikrinant mažą interferenciją tarp jų.



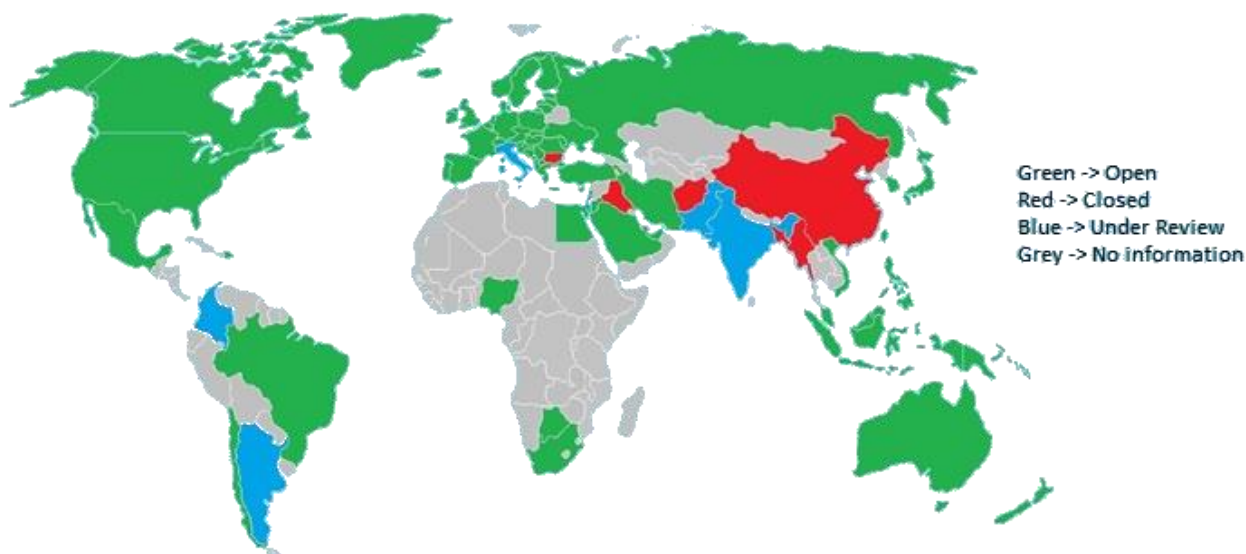
5 pav. Tradicinių ir milimetrinių radijo ryšio sistemų spinduliavimo diagramos

Spinduliuotės energijos skirstinio dydis lemia pakartotinį spektro panaudojimą apibrėžtoje geografinėje teritorijoje. Kuo jis siauresnis, tuo mažesnė kanalų interferencijos tikimybė tarp gretimų 71 – 86 GHz ruože veikiančių radijo ryšio siūstuvų. Dėl šios priežasties E-juostos mikrobangoms sistemoms nėra būtinas detalus radijo ryšio tinklo planavimas, kuris tuo tarpu žemesnio dažnių ruožo sistemoms yra privalomas [9]. Visa tai leidžia sumažinti planavimo išlaidas ir paspartinti įrangos diegimą.

Taipogi interferencijos tikimybę tarp gretimų 71 – 86 GHz ruože veikiančių radijo ryšio siūstuvų sumažina E-juostos licencijavimo metodika, pagal kurią vartotojai, norintys užregistruoti 70/80 GHz diapazono mikrobangę sistemą, privalo koordinavimo ir licencijavimo institucijai pateikti sistemos geografinę padėtį, spinduliavimo galią ir kitą informaciją. Iš pateiktų duomenų dažnių koordinavimo ir licencijavimo institucija nustato interferencijos tikimybę tarp planuojamos įdiegti ir anksčiau užregistruotos radijo ryšio sistemos [1]. Interferencijos atveju, atitinkamos institucijos turi teisę pašalinti interferencijos šaltinį, tokiu būdu apsaugodamos užregistruotos radijo ryšio linijos kokybę [5].

2.3 Supaprastintas licencijavimas

1979 metais vykusioje pasaulinėje radijo ryšio konferencijoje (WRC), tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (ITU) priskyrė fiksuoto belaidžio ryšio paslaugoms 71 – 76 ir 81 – 86 GHz diapazoną. Nuo tada E-juostos dažnių ruožo koordinacija ir licencijavimas skirtinguose regionuose yra valdomos atitinkamų institucijų. Kai kuriuose pasaulio šalyse 70/80 GHz diapazonas naudojamas valstybiniais ar kitais tikslais, tačiau daugelyje šalių E-juostos ruožas yra paskirtas visuomeniniam naudojimui [5]. Žemiau pateiktame paveikslėlyje nurodytas pasaulinis E-juostos prieinamumas.



6 pav. Pasaulinis E-juostos prieinamumas

Dėl ypač aukštų dažnių ruožo ir siauros rinkos E-juosta nesulaukė komercinio dėmesio. Siekiant paskatinti 70/80 GHz diapazono taikymą fiksuoto belaidžio ryšio paslaugoms, FCC su kitomis įvairiomis dažnių koordinavimo ir licencijavimo institucijomis supaprastino 71 – 76 ir 81 – 86 GHz ruožų licencijavimo taisykles pastebėjusios, jog sistemos veikiančios E-juostos elektromagnetinių bangų ruože turi savybių, kurios nėra būdingos žemesnio dažnių diapazono mikrobangėms sistemoms:

- aukšto darbinio dažnio E-juostos sistemos naudoja didelio kryptingumo antenas, kurių spinduliavimo diagramos plotis paprastai neviršija 4 laipsnių.
- 10 GHz spektro ruožas padalintas į dvi 71 – 76 ir 81 – 86 GHz dažnių juostas, kurias galima naudoti kaip 2 atskirus ryšio kanalus.

Unikalios ypač aukštų dažnių milimetrinių bangų perdavimo savybės leidžia supaprastinti dažnių planavimą bei sumažinti gretimų E-juostos siųstuvų interferencijos tikimybę. Viso to nebūtų galima pasiekti su žemesniame dažnių ruože veikiančiomis sistemomis. Dėl šių išvardintų priežasčių koordinavimo ir licencijavimo institucijos priėmė „lengvo licencijavimo“ nuostatas, kurios garantuoja interferencijos apsaugą bei greitą ir pigų licencijos išdavimą [9].

„Lengvo licencijavimo“ metodas pagrįstas eiliškumo principu – „pirmas atėjai, pirmas gavai“. Juo vadovaujantis pirmiausia užregistruojama ta E-juostos ruože veikianti radijo ryšio linija, kuri pirma pateikia tam paraišką. Norint užregistruoti 70/80 GHz diapazono mikrobangę sistemą būtina informuoti dažnių koordinavimo ir licencijavimo instituciją apie diegiamos sistemos charakteristikas ir geografinę padėtį. Koordinavimo ir licencijavimo institucija, gavusi reikalingus duomenis, patikrina juos veikiančių mikrobangių sistemų duomenų bazėje ir nusprendžia ar atitinkamų parametrų sistemą galima užregistruoti [1]. Registracijos proceso metu nustatoma interferencijos tikimybė tarp naujai diegiamos ir prieš tai užregistruotos mikrobangės sistemos. Tokiu būdu anksčiau užregistruotai radijo ryšio linijai suteikiama „lengvo licencijavimo“ nuostatų numatyta interferencijos apsauga nuo ateityje planuojamų įrengti radijo ryšio sistemų [5]. Mažai tikėtina interferencijos atveju tarp gretimų E-juostos siųstuvų, koordinavimo ir licencijavimo institucija turi teisę įidentifikuoti ir pašalinti interferencijos šaltinį. Šios priemonės leidžia užtikrinti atskirų vartotojų E-juostos spektro apsaugą ir supaprastinti dažnių planavimą [7].

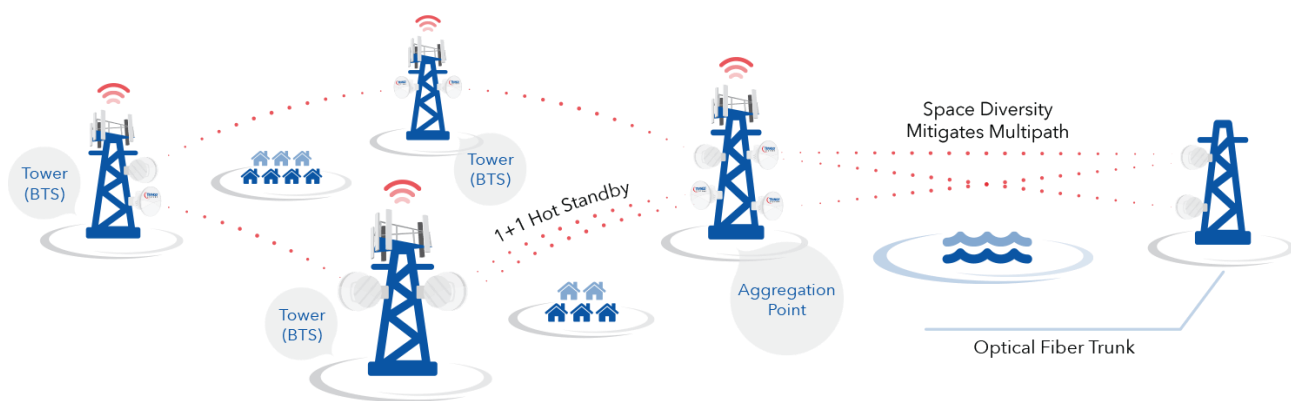
3. Panaudojimo sritys

1979 metais per pasaulinę radijo ryšio konferenciją (WRC) tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (ITU) priskyrė itin didelės talpos fiksuoto belaidžio ryšio paslaugoms 71 – 76 ir 81 – 86 GHz dažnių diapazoną, plačiau žinomą E-juostos pavadinimu. Nuo 2000 metų atsirado nemažai 70/80 GHz diapazono panaudojimo sričių, kurių bėgant laikui pasirodo vis daugiau, kadangi E-juostos

ruože veikiančių mikrobangių sistemų duomenų perdavimo sparta, naudojant paprastą moduliaciją siekia keletą Gbit/s. Taipogi naujų didelės duomenų perdavimo spartos reikalaujančių paslaugų atsiradimas ir santykinai nebrangus bei spartus sistemos įdiegimas dar labiau paskatino E-juostos taikymą belaidžio plačiajuosčio ryšio sistemose. Dabar E-juostos ruože veikiančios mikrobangės sistemos panaudojamos judriojo ryšio transportiniuose tinkluose, paskirstytų antenų sistemose, ryšio tinklo praplėtime, informacinių ryšio linijų rezervavime, LAN tiltuose ir kitur.

3.1 Transportinis tinklas

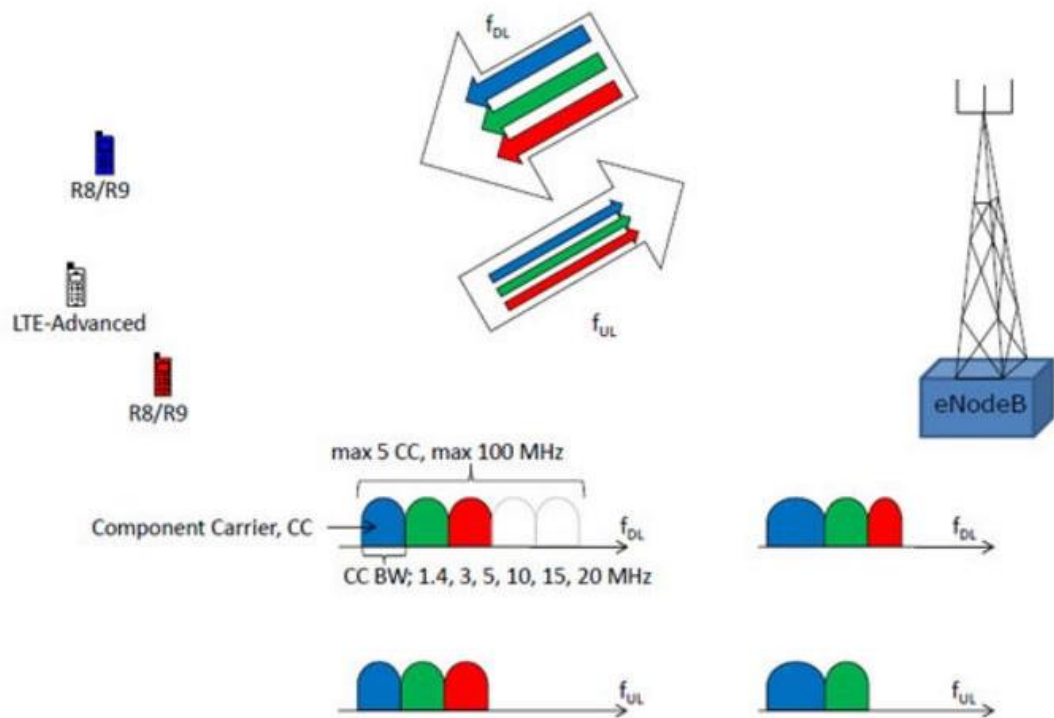
Kiekvienais metais išmaniųjų telefonų, planšetinių kompiuterių ir kitų, plačiajuosčių judrųjų ryši naudojančių, mobiliųjų įrenginių funkcionalumas plečiasi. Kartu didėja įrenginių integracija, kuri keičia vartotojų bendravimo, informacijos ieškojimo bei naršymo internete įpročius. Mobilųjų paslaugų vartotojai būdami gamtoje, važiuodami autobusu ar vaikščiodami miesto gatvėmis gali apsiekti tekstiniais ir balsiniais pranešimais, naršyti internete, parsisiųsti norimus failus, žaisti realaus laiko žaidimus, stebėti aukštos kokybės vaizdo transliacijas bei naudotis kitomis, didelės duomenų perdavimo spartos reikalaujančiomis, paslaugomis. Esamų ir naujai kuriamų paslaugų įvairovė bei jų prieinamumas skatina nuolatinį suvartojamų duomenų augimą. Dėl šios priežasties plačiajuosčio judriojo ryšio operatoriai nuolat ieško naujų būdų, kuriais galėtų padidinti transportiniu tinklu perduodamų duomenų talpą, kadangi tradicinių, žemesniame dažnių ruože (6 - 38 GHz) veikiančių, mikrobangių sistemų charakteristikos neužtikrina naujos kartos paslaugų keliamų reikalavimų [10].



7 pav. Transportinis tinklas paremtas belaidžio ryšio technologija

Šiuo metu vyrauja trečioji ir ketvirtoji mobiliųjų tinklų karta, sutrumpintai vadinamos 3G bei 4G. Trečiajai mobiliųjų tinklų kartai priklauso LTE technologija, kuri perduoti informacijai naudoja skirtingo dažnių juostos pločio kanalus – nuo 1,25 MHz iki 20 MHz. Taip pat ji palaiko iki 4×4 MIMO technologiją, kurios būdu yra pagerinama radijo ryšio kokybė bei duomenų perdavimo sparta, DL kryptimi siekianti 300 Mbit/s, o UL – 75 Mbit/s [11].

Ketvirtajai mobiliųjų tinklų kartai priklauso LTE Advanced ir LTE Advanced Pro technologijos. LTE Advanced naudoja kintamo dydžio nešlius, kurių dažnių juostos plotis svyruoja tarp 1,4, 3, 5, 10, 15 ar 20 MHz. Atskiri nešliai gali būti apjungiami, siekiant padidinti bendrą kanalo plotį. Maksimalus 5 nešlių apjungimas leidžia praplėsti suminio kanalo dydį iki 100 MHz. Naudojant kanalų apjungimą, buvo pasiekta pikinė 3 Gbit/s DL kryptimi ir 1,5 Gbit/s UL kryptimi perdavimo sparta [12].



8 pav. LTE Advanced kanalų apjungimas

Vieno LTE bazinės stoties sektoriaus, naudojancio 4×4 MIMO ir 20 MHz pločio kanalą, pikinė greitaveika yra 300 Mbps. Tuo tarpu vidutinė – randama padauginus kanalo plotį iš spektrinio efektyvumo. Tokių būdu LTE sektoriaus vidutinė greitaveika yra lygi: $2,67 \cdot 20 = 53,4$ Mbit/s. LTE bazinei stočiai reikalingą vidutinę ir pikinę duomenų perdavimo talpą galima apskaičiuoti padauginus BTS sektorių skaičių iš atitinkamos sektoriaus greitaveikos. Atlikus skaičiavimus matyti, jog vidutinė LTE bazinės stoties talpa yra 160 Mbit/s, o pikinė – 900 Mbit/s. Analogiškai atliekami LTE Advanced BTS vidutinės ir pikinės talpos skaičiavimai. Dažnai mikrobangių sistemų projektuotojai, taupydami turimus resursus, nesilaiko keliamų pikinės talpos reikalavimų, kadangi tikimybė, kad visi trys bazinės stoties sektoriai veiks pilnu pajėgumu yra labai maža [9].

Tradicinės 6 – 38 GHz diapazono mikrobangės sistemos maksimali kanalo talpa, naudojant 256 QAM lygmens moduliaciją, siekia 350 – 500 Mbit/s. Tokia duomenų perdavimo sparta tenkina vidutinę LTE bazinės stoties sukuriama apkrovą. Netolimoje ateityje pasirodysianti penktos kartos mobiliųjų tinklų technologija, trumpiau vadinama 5G, pareikalaus gerokai didesnės duomenų perdavimo kanalo talpos, kurios nepavyks užtikrinti 6 – 38 GHz diapazono sistemoms. Dėl tradicinių

sistemų neužtikrinamos reikiamos kanalo talpos gali pasireikšti duomenų praradimas ir kiti teikiamų paslaugų sutrikimai. Tai atsitinka dėl to, kad transportiniame tinkle naudojama mikrobangė įranga nesugeba perduoti BTS sukuriamos apkrovos, kurios vertė artėja prie jos pikinės reikšmės [10]. Tradicinės mikrobangės sistemos talpą galima padidinti, lygiagrečiai sumontuojant du atskirus 6 – 38 GHz diapazono siųstuvus, tokiu būdu realizuojant 2+0 konfigūraciją. Vis dėlto toks 6 – 38 GHz diapazono sistemų talpos praplėtimas yra nepakankamas kokybiškam 5G mobiliųjų tinklų paslaugų teikimui. Tranzitinių tinklų talpą taipogi galima padidinti, pakeičiant tradicines mikrobanges sistemas šviesolaidiniu ryšiu, tačiau neretai optinių skaidulų infrastruktūros aprėptis yra ribota, o naujų optinių linijų tiesimas brangus, todėl mobiliojo ryšio operatoriai dažnai renkasi belaidžio ryšio sistemas. Žemiau pateiktame paveikslėlyje nurodyta Lietuvos šviesolaidinio tinklo infrastruktūra.



9 pav. Lietuvos šviesolaidinio tinklo infrastruktūra

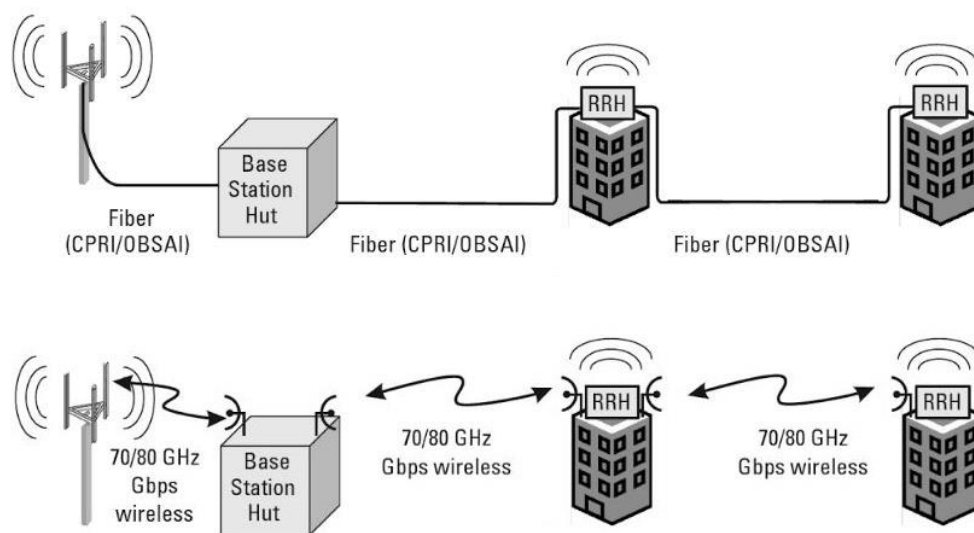
Optinių skaidulų ir tradicinių radijo ryšio relinių linijų keliamas problemas išsprendžia 71 – 86 GHz mikrobangės sistemos, kurių perdavimo sparta, taikant paprastą QSPK moduliaciją, viršija 1 Gbit/s. Didesnės duomenų perdavimo spartos pasiekiamos plečiant kanalo juostos plotį, naudojant aukštesnio lygio moduliacijas bei MIMO technologiją [9].

3.2 Paskirstytų antenų sistemos

Dėl E-juostos ruože veikiančių radijo ryšio sistemoms būdingų duomenų perdavimo savybių, 70/80 GHz diapazonas gali būti puikiai pritaikomas paskirstytų antenų sistemose, trumpiau

vardinamose DAS. Paskirstytų antenų sistemos pagrindinė paskirtis yra praplėsti korinio ryšio aprėptį tam tikroje geografinėje zonoje. Aprėpties išplėtimas pasiekiamas, pakeičiant bazinės stoties anteną į keletą atskirų, mažesnę aprėptį turinčių antenų, strategiškai išdėstytų atitinkamoje geografinėje teritorijoje. Tarp kiekvienos mažesnės aprėpties antenos ir bazinės stoties sudaromas sujungimas. Priklausomai nuo konkrečios situacijos, sujungimas gali būti atliekamas naudojant laidinį ar radijo ryšį, tačiau dažniausiai pasirenkamas belaidis ryšys, kadangi optinių ar kitų laidinio ryšio linijų tiesimas gali užimti daug laiko ir pareikalauti nemažai išlaidų [13].

Paskirstant spinduliuojamą galią tarp keleto atskirų antenų, galima pasiekti numatytą teritorijos aprėptį su mažesniu galios poreikiu ir aukštesniu patikimumu, kadangi yra sumažinamas ekranavimo reiškinių tikėtinumai bei išspinduliuoto signalo sklidimo atstumas iki imtuvo. Dėl strategiškai erdvėje išdėstytų antenų, dažniau pasitaikančios tiesioginio matomumo zonos leidžia sumažinti signalo nykimą ir jo vėlinimą. Siekiant padidinti paskirstytų antenų sistemos našumą, DAS dažnai montuojama kartu su nutolusiu radijo bloku, sutrumpintai vadinamu RRU. Visi nutolę radijo blokai kartu su prie jų prijungtomis antenomis, optinėmis ryšio linijomis per CPRI ar OBSAI optines sąsajas, sujungiami su bazine stotimi. CPRI sąsajos greitaveika yra $m \times 768$ Mbit/s, o OBSAI – $n \times 614,4$ Mbit/s, čia $n = 1, 2$ ar 4 ; $m = 1, 2, 4, 5, 8$ ar 10 . Iš pateiktų greitaveikų matyti, kad duomenų perdavimo spartos CPRI ar OBSAI optinėmis sąsajomis gali siekti keletą Gbit/s [14]. Šias spartas galima pasiekti ir 71 - 86 GHz radijo ryšio sistemos, kurių greitaveika, taikant paprastą QSPK moduliaciją, viršija Gbit/s. Didesnės duomenų perdavimo spartos pasiekiamos plečiant kanalo juostos plotį, naudojant aukštesnio lygio moduliacijas bei MIMO technologiją [9]. Todėl labai tikėtina, kad E-juostos ruože veikiančios mikrobangės sistemos pakeis šiuo metu, sujungimui tarp BTS ir DAS įrangos, naudojamas optines skaidulas. Žemiau esančiame paveikslėlyje pateikta DAS realizacija optinėmis ir 70/80 GHz diapazono radijo ryšio sistemomis.



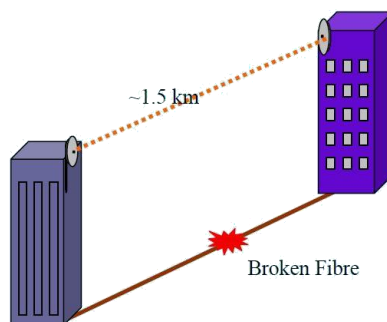
10 pav. DAS realizacija optinėmis ir 70/80 GHz diapazono radijo ryšio sistemomis

3.3 Laikinas paslaugų teikimo atkūrimas nelaimės atveju

Jau daugelį metų šviesolaidinių tinklų infrastruktūra plečiasi visame pasaulyje. Daugėja nacionalinių ir tarptautinių optinio ryšio linijų. Nepaisant per tą laiką nutiestos optinių skaidulų gausos, didžioji dalis pastatų, verslo įmonių ir kitų kompanijų iki šiol neturi prieigos prie šviesolaidinio tinklo. Vis dėlto ten, kur prieiga galima dažnu atveju itin aukštos duomenų perdavimo spartos reikalaujančios paslaugos yra teikiamos šviesolaidiniais tinklais [14].

Nesąmoningai pažeidus optinę skaidulą, pavyzdžiui, kasant tranšėją, galima staiga nutraukti kritinės svarbos tinklo veiklą neterminuotam laikotarpiui. Priklausomai nuo tinklu teikiamų paslaugų tipo, nutrūkęs ryšys gali pridaryti finansinių nuostolių, sumažinti pasitikėjimą ar net nusinešti kažkieno gyvybę. Dėl šios priežasties svarbu atlikti optinės ryšio linijos rezervavimą, kuris padėtų atsitikus panašaus pobūdžio incidentui sumažinti nelaimės padarinius ar net jų visiškai išvengti.

Milimetriniame bangų ruože veikiančios radijo ryšio sistemos gali būti nesunkiai panaudotos realizuojant ryšio linijų rezervavimą. Pateiktame pavyzdyje nurodyta konkreti iliustracija, kaip 70/80 GHz diapazono mikrobangę sistemą galima pritaikyti šviesolaidinio ryšio rezervacijai. Duomenų centras, optinėmis skaidulomis ir tuo pačiu metu didelės talpos milimetriniame bangų ruože veikiančia mikrobange sistema, sujungtas su tinklo paslaugų tiekėjo buvimo tašku, trumpiau vadinamu PoP. Įvykus netikėtam optinės ryšio linijos pažeidimui, optinėmis skaidulomis perduodamas duomenų srautas būtų nukreipiamas į 70/80 GHz diapazono mikrobangę sistemą, tokiu būdu išvengiant didelio duomenų kiekio praradimo ir neigiamos įtakos tinklo patikimumui. Optinio tinklo gedimo atveju paslaugų teikimo atstatymo laikas, remiantis E-juostos ruože veikiančioms mikrobangėmis sistemomis, yra kur kas mažesnis nei laikas, kuris gali būti reikalingas pažeistos optinės ryšio linijos atstatymui. Tiesiant „virtualias optines skaidulas“ tarp dviejų ar daugiau tinklų, kurie jau yra tarpusavyje sujungti optinio ryšio linijomis yra prarandama ekonominė nauda ir įrangos pakartotinio panaudojimo universalumas, lyginant su E-juostos radijo ryšio sistemomis. 70/80 GHz diapazono mikrobangės sistemos leidžia nesunkiai pasiekti didesnes nei 1 Gbit/s spartas bei rinktis tarp keletos skirtingų ryšio linijų rezervavimo būdų [15]. Žemiau pateiktame paveikslėlyje parodytas optinio ryšio rezervavimas mikrobange sistema.

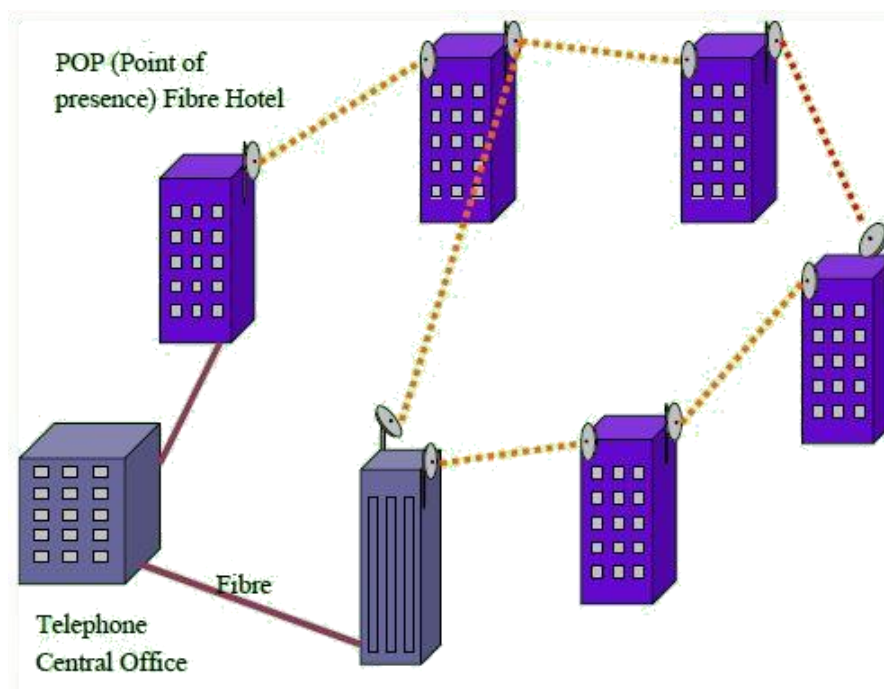


11 pav. Tinklo rezervavimas naudojant radijo ryšio sistemą

3.4 Vietinio tinklo tiltai

Universiteto miestelio vietinius kompiuterinius tinklus prižiūrintys administratoriai dažnai susiduria su problema, kai reikia sudaryti privatų, aukštą greitaveiką užtikrinantį sujungimą tarp atskirų miesteliui priklausančių pastatų. Siekiant perkelti atsargines failų kopijas į išorinius serverius, išplėsti vietinį tinklą, perduoti tinklui priklausančių vartotojų duomenis bei persiųsti mokesčių rekvizitus ar kokią kitą svarbią informaciją. Privatų, aukštą greitaveiką užtikrinantį sujungimą tarp atskirų universiteto miesteliui priklausančių pastatų galima sudaryti nutiesiant optines ryšio linijas, tačiau tai yra brangus, daug laiko ir pastangų reikalaujantis projektas, kadangi dažnu atveju optinės skaidulos yra tiesiamos po žeme. Todėl vienu nuo kitų nutolusių objektų apjungimui galima pritaikyti 70/80 GHz diapazono mikrobanges sistemas.

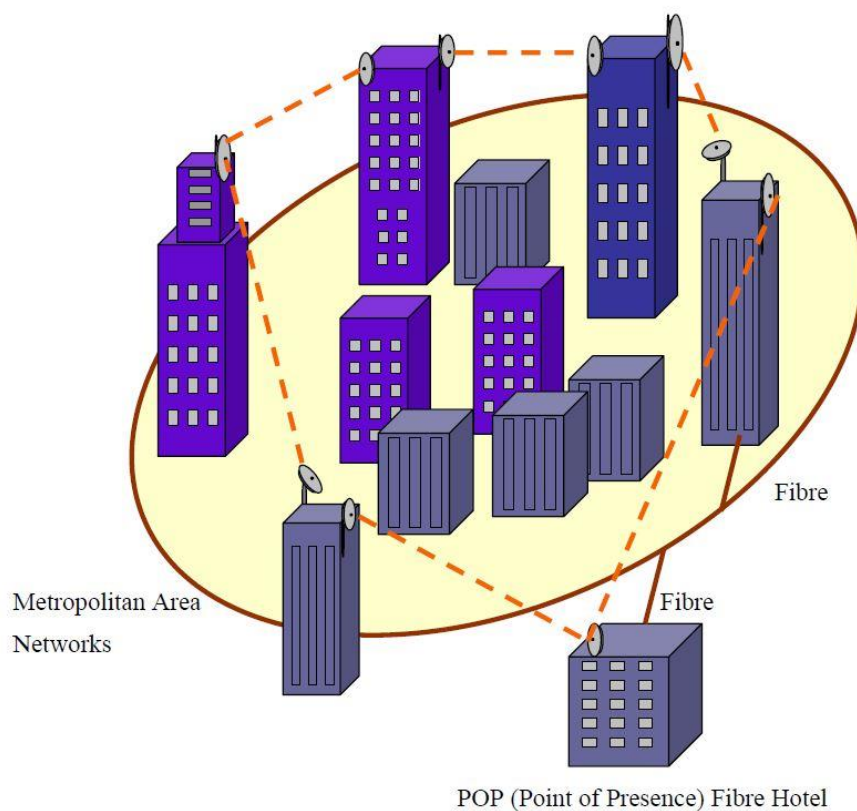
E-juostos ruože veikiančias radijo ryšio sistemas leidžia greitai sudaryti saugų ir lankstų vietinio kompiuterinio tinklo tiltą tarp atskirų universiteto miesteliui priklausančių pastatų. Žemiau esančiame paveikslėlyje pateiktas konkretus pavyzdys, kaip keli vienas nuo kito nutolę objektai gali būti apjungiami, gigabitinę greitaveiką, aukštą paslaugų patikimumą ir duomenų saugumą užtikrinančiomis, mikrobangėmis sistemomis. Taipogi 70/80 GHz diapazono plačiajuosčio radijo ryšio technologija suteikia galimybę belaidžiu būdu praplėsti esamą optinio ryšio tinklą vietiniais ir privačiais kompiuteriniais tinklais. Šviesolaidinio tinklo praplėtimo atveju aukšta duomenų perdavimo sparta išlaikoma tiek belaidžio, tiek optinio ryšio tinklo dalyje [16].



12 pav. Atskirų pastatų apjungimas 70/80 GHz diapazono mikrobangėmis sistemomis

3.5 Optinio ryšio tinklo praplėtimas

Laikui bėgant įmonių poreikis kompiuterinių tinklų pralaidumui nepaliaujamai auga, kadangi šiuolaikinė ekonomika tampa vis labiau priklausoma nuo informacijos perdavimo. Vis dėlto dauguma komercinių įmonių statinių „nepriklauso žiedui“, kitaip tariant, įmonėms priklausantys pastatai nėra prijungti prie po žeme esančio teritorinio šviesolaidinio tinklo žiedo. Reali situacija nėra tokia bloga, kadangi didžioji šių pastatų dalis yra netoli minėtos žiedo infrastruktūros. Dėl to didelio pralaidumo teritorinių šviesolaidinio tinklo žiedų duomenų perdavimo ypatybės gali būti prieinamos ir toms įmonėms, kurios nėra tiesiogiai sujungtos su teritoriniu tinklo žiedu. Kadangi E-juostos ruože veikianti plačiajuosčio radijo ryšio technologija, komercines įmones ir kitus subjektus, įgalina ekonomiškai efektyviu būdu prisijungti prie teritorinio žiedo ir tokiu būdu padidinti duomenų perdavimo našumą. Turint omenyje, kad viena milimetrinių bangų ruožo mikrobangė sistema geba aptarnauti aukštus pralaidumo reikalavimus keliančią įmonę. Žemiau esančiame paveikslėlyje pateiktas konkretus pavyzdys, kaip 70/80 GHz diapazono mikrobangė sistema leidžia prijungti korporacijos pastatą prie didelio pralaidumo teritorinio šviesolaidinio tinklo žiedo. Tokiu būdu paslaugų teikėjai perduodami duomenis tarp jiems ir vartotojams priklausančių pastatų ant kurių yra sumontuota E-juostos mikrobangė sistema, gali išplėsti esamą optinio ryšio tinklą [17].

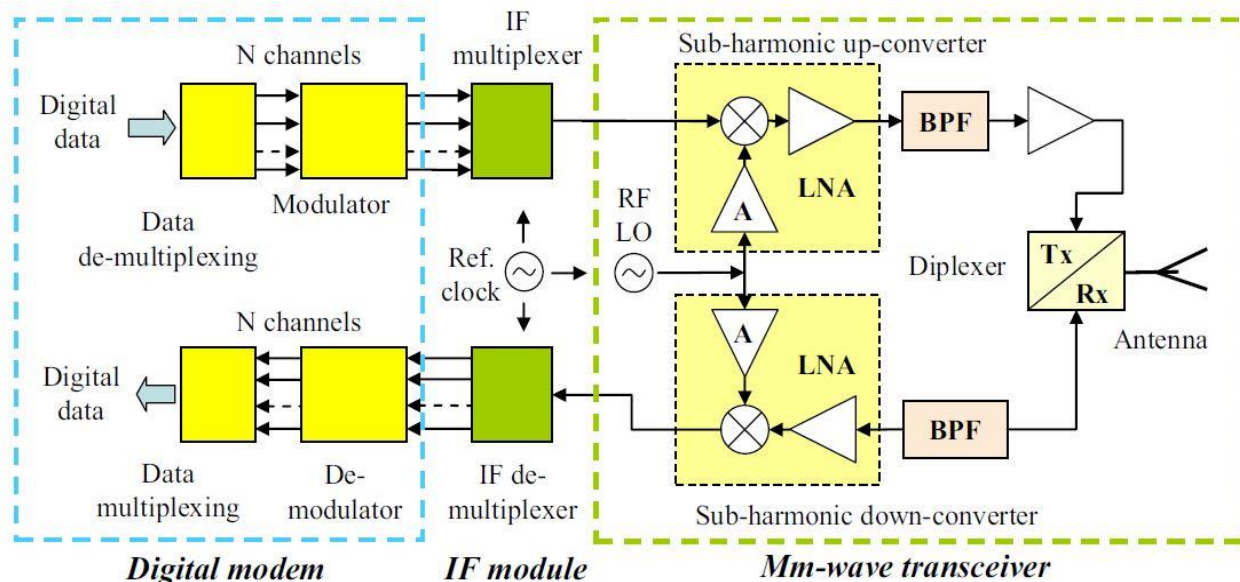


13 pav. Pastato prijungimas prie teritorinio šviesolaidinio tinklo žiedo naudojant E-juostos ruožo mikrobangę sistemą

4. E-juostos ruožo transiveriai

Dėl nepaliaujamai augančio duomenų pralaidumo poreikio, didėjančio dažnių juostos užimtumo bei pingančios monolitinių integrinių grandynų gamybos, aukštos duomenų perdavimo spartos milimetrinių bangos ilgių ruože veikiančios radijo ryšio sistemos tampa reikšminga belaidžio ryšio pramonės dalis. Šiuo metu E-juostos mikrobangės sistemos naudojamos judriojo ryšio transportiniuose tinkluose, paskirstytų antenų sistemose, informacinių ryšio linijų rezervavime, esamų ryšio tinklų praplėtimo projektuose, LAN tiltų diegime bei kitur. 71 – 86 GHz radijo ryšio sistemų perdavimo sparta, taikant paprastą QSPK moduliaciją, viršija Gbit/s. Didesnės duomenų perdavimo spartos pasiekiamos plečiant kanalo juostos plotį, naudojant aukštesnio lygio moduliaciją, MIMO technologiją bei keičiant transiverių integrinio grandyno architektūrą.

E-juostos transiveriai remiasi heterodinine architektūra su realizuota dalinio dažnio konversija, kurioje svarbų vaidmenį atlieką vietinis dalinio dažnio generatorius. Vietinio dalinio dažnio generatoriaus taikymas dažnių konversijoje, keliais decibelais sumažina konversijos naudingumo koeficientą, tačiau tuo pat metu sumažina ir milimetriniame bangų ruože veikiančių transiverių sudėtingumą ir jų savikainą. Žemiau esančiame paveikslėlyje pateikta supaprastinta E-juostos ruože veikiančios sistemos blokinė diagrama, kurią sudaro elektrinė sąsaja, skaitmeninis modemas, tarpinio dažnio (IF) modulis ir plačiajuostė milimetrinio bangų ruožo išorinė pusė, turinti siuntimo/priėmimo sekcijas bei aukšto kryptingumo anteną [18].



14 pav. Supaprastinta E-juostos ruože veikiančios sistemos blokinė diagrama

4.1 Siųstuvo dalis

Pro elektrinę sąsają patekęs skaitmeninis duomenų srautas yra padalinamas į keletą atskirų skaitmeninių duomenų kanalų, kitaip tariant demultipleksuojamas. Padalintas duomenų srautas keliauja į moduliatorių, kuriame kiekvienas duomenų kanalas apdorojamas perkonfigūruojama loginių elementų matrica (FPGA), šio proceso metu atskiri duomenų srautai transformuojami į patogesnę perdavimo formą. Apdoroti N kanalų skaitmeniniai duomenys kodas/analogas keitiklyje paverčiami į atitinkamus tarpinio dažnio signalus, kurie vėliau multipleksoriumi yra sutankinami. Nepageidaujamos IF signalo aukštų dažnių komponentės nufiltruojamos filtrais. Moduliuojant ypač aukštų dažnių nešlį sutankintu tarpiniu signalu, sutankintas IF signalas, aukštinančiuoju dažnio keitikliu, pakeliamas į milimetrinių bangų ruožą. Reikiamo dažnio signalas sustiprinamas ir išspinduliuojamas per aukšto kryptingumo anteną [19].

4.2 Imtuvo dalis

Imtuvas veikia priešinga siųstuvui kryptimi. Aukšto kryptingumo antena priimtas ir per BPF filtrą praleistas milimetrinių bangų ruožo elektromagnetinis signalas patenka į žematriukšmį stiprintuvą, kuriama yra sustiprinamas. Iki reikiamo galios lygio sustiprintas signalas žeminančio dažnio keitiklyje atstatomas į pradinę formą, t.y. demoduliuojamas, procesu metu atliekamas tarpinio dažnio signalo išskyrimas iš ypač aukštą dažnį turinčio nešlio. Išskirtas IF signalas dažnių srityje demultipleksuojamas į N atskirų dažninių kanalų. N kanalų analoginiai signalai analogas/kodas keitiklyje paverčiami į skaitmeninius duomenys, kurie vėliau dekoduojami perkonfigūruojama loginių elementų matrica. Dekoduoti duomenys multipleksuojami į vieną skaitmeninių duomenų srautą ir perduodami per elektrinę sąsają į kitą prietaisą [19].

5. Meteorologinių sąlygų įtaka elektromagnetinių bangų sklidimui

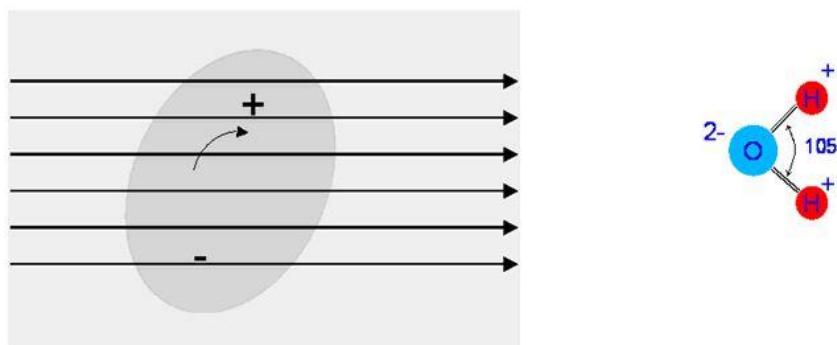
Didžioji dalis E-juostos ruože veikiančių radijo ryšio sistemų yra naudojamos lauke. Priklausomai nuo 70/80 GHz ruožo sistemų geografinės padėties, transiverių kelyje gali atsirasti įvairių meteorologinių kliūčių, kurios skirtingai paveiks elektromagnetinių bangų sklidimą. Giedro oro sąlygomis, ore esančių natūralių dujų sukeliamas elektromagnetinių bangų slopinimas yra dominuojantis veiksnys įtakojantis radijo bangų skverbtį. Tačiau atmosferoje kurioje yra debesų ar lietaus pavidalu sukaupto vandens, vandens dariniai yra pagrindinė radijo bangų nuostolių priežastis. Ore esančių vandens molekulių sukeltas radijo bangų slopinimas priklauso nuo lietaus lašo arba debesies tankumo, ir lietaus lašų arba kitų vandens dalelių, pavyzdžiui, rūko ar miglos, dydžio. Žemės

atmosferoje vanduo gali būti natūraliai sutinkamas visose trijose agregatinėse būsenose: kietoje (snaigės, ledo kristalai), skystoje (lietus, rūkas, debesys) ir dujinėje (vandens garai).

5.1 Atmosferos dujų įtaka radijo bangų sklidimui

Atmosferoje kurioje nėra debesų ar lietaus pavidalu sukaupto vandens, paprasčiau tariant giedro oro sąlygomis, ore esančių natūralių dujų sukiamas elektromagnetinių bangų slopinimas yra dominuojantis veiksnys įtakoiantis radijo bangų sklidimą. Žemės atmosfera yra sudaryta iš skirtingais kiekiais pasiskirsčiusių dujų mišinio, kuriame vyrauja deguonies ir vandenilio molekulės. Atmosferoje taipogi galima rasti deguonies izotopų, ozono ir jo izotopų bei kitų dalelių, tačiau jų poveikis elektromagnetinių bangų sklidimui yra nežymus. Atmosferos dujų sukiamas slopinimas remiasi absorbcijos teorija, kuri apibrėžia sąveiką tarp ore esančių molekulių ir elektromagnetinės spinduliuotės. Milimetrinių bangų ilgių ruože, elektromagnetinės spinduliuotės sukelta energijos absorbcija pasireiškia dėl rotacinių ir vibracinių perėjimų polinėse molekulėse. Priklausomai nuo vidinės molekulinės struktūros, visos dujinės atmosferą sudarančios medžiagos turi tik joms būdingą absorbcijos linijų rinkinį. Tuo tarpu kiekviena absorbcijos linija turi atitinkamą centrinį dažnį ir linijos intensyvumą, kuris apibūdina spinduliuotės absorbcijos laipsnį bei kitus spektrinius parametrus.

Vis dėlto vandens garai yra pagrindinis atmosferoje esančių dujų slopinimo veiksnys, išskyrus kai kurias specifines elektromagnetinio spektro sritis, kuriose dominuoja deguonies absorbcija. Paprastai vandens garų absorbcijos lygis apibūdinamas kaip vandens garų linijų ir vandens garų kontinuumo komponenčių suma. Vandens garų kontinuumo slopinimo efektas stipriai pasireiškia dažnių srityse, esančiuose toliau nuo absorbcijos linijų viršūnių. Tikslus atmosferinių nuostolių charakterizavimas, įskaitant antraeilių atmosferos dujų įtaką radijo bangų sklidimui, yra atliekamas astronomijoje bei duomenų perdavime dideliais atstumais [20].



15 pav. Sąveiką tarp ore esančių molekulių ir elektromagnetinės spinduliuotės

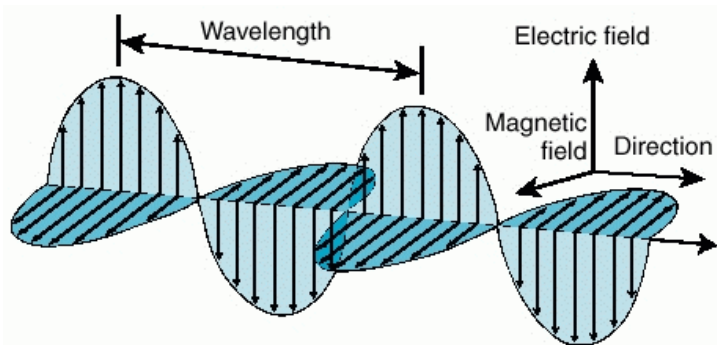
5.2 Lietaus įtaka radijo bangų sklidimui

Žemės atmosferoje vandens darinių galima rasti net pačiomis giedriausiomis dienomis. Jie natūraliai sutinkami visose trijose agregatinėse būsenose: kietoje (snaigės, ledo kristalai), skystoje

(lietus, rūkas, debesys) ir dujinėje (vandens garai). Ore esančių vandens molekulių sukeltas radijo bangų slopinimas priklauso nuo lietaus lašo arba debesies tankumo, ir lietaus lašų arba kitų vandens dalelių, pavyzdžiui, rūko ar miglos, dydžio. Kitaip tariant žemės atmosfera nėra homogeninė, todėl skirtingo dydžio ir tankio atmosferoje esantys vandens dariniai, nevienodai slopina jų kelyje pasitaikiusį radijo signalą. Lietaus sukeltas elektromagnetinių bangų slopinimas yra vienas iš labiausiai pastebimų radijo bangų sklaidimą įtakančių faktorių, ypač jei signalo dažnis siekia 10 GHz ar daugiau [21].

Kai sklindanti elektromagnetinė banga susiduria su vandens molekulėmis, viena bangos energijos dalis yra sugerama, o kita išsklaidoma. Energijos išsklaidymą lemia vandens molekulių struktūra; vandens molekulės yra laikomos poliarizuotomis, kadangi jų krūvių centrai nėra išsidėstę vienoje linijoje. Dėl šios priežasties H_2O molekulės pasisuka taip, kad vienos molekulės teigiamo krūvio dalis būtų kuo arčiau kitos molekulės neigiamo krūvio dalies. Dėl tos pačios priežasties vandens molekulės pasisuka ir tada, kai šalia atsiranda atitinkamo dydžio neigiamas krūvis. Kitaip tariant, molekulių padėties kitimas kitų molekulių atžvilgiu vyksta dėl to, kad skirtingo ženklo krūvi turintys kūnai traukia vienas kitą.

Tuo tarpu elektromagnetinę bangą sudaro laike kintantys magnetinio ir elektrinio lauko vektoriai. Sklindant elektromagnetinei bangai, kintantis elektrinis laukas veikia aplinkui esančius elektrinius krūvius, jėga proporcinga krūvio dydžiui. Dėl anksčiau minėtos fizikinės krūvių prigimties, kintamo elektromagnetinio lauko veikiamos vandens molekulės pasisuka atitinkama elektrinio lauko kryptimi. Šio proceso metu besisukančios molekulės trunkosi viena į kitą ir papildomai šyla. Jėgų lauko veikiamos H_2O molekulės turi tą pačią laiko variaciją kaip ir juos veikianti radijo banga, todėl vandens dipoliai elgiasi kaip žemo kryptingumo antenos, kurios perspinduliuoja elektromagnetinę energiją įvairiomis kryptimis. Nepageidaujamas elektromagnetinės energijos perspinduliavimas sukelia signalo nuostolius. Nuostolius taipogi sąlygoja ir vandens lašelių sukeliama signalo energijos sugertis, kuri įkaitina absorbuojantį vandens lašą.



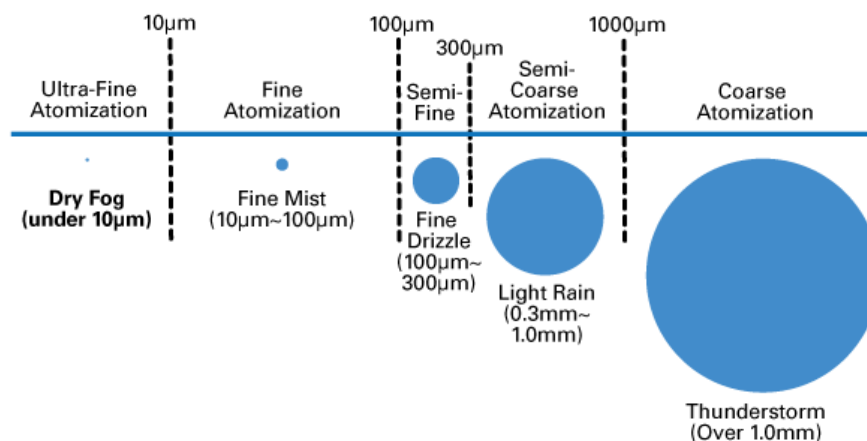
16 pav. Elektromagnetinės bangos jėgos laukų vektoriai

Sugerties efekto sukeltas slopinimas pasireiškia labiau nei sklaidos, kai sklindančios elektromagnetinės bangos ilgis yra mažesnis už lašelio matmenis. Tuo tarpu bangų, kurių ilgis

didesnis už lašelio matmenis, slopinimas dėl sklaidos efekto yra didesnis nei dėl sugerties. Didžiausia energijos sklaida pasiekama, kai elektromagnetinės bangos ilgis yra artimas sklaidančiųjų dalelių dydžiui. Tai rodo, kad radijo bangų sugerties ir sklaidos procesai priklauso nuo vandens darinių dydžio, formos bei dielektrinės skvarbos, taip pat nuo sklindančios elektromagnetinės bangos ilgio ir poliarizacijos. Dėl šios priežasties lietaus nepastovumas, t.y. lašelių skaičiaus, jų dydžio ar formos kitimas laikui bėgant, labai komplikuoja lietaus sukeliama radijo bangų slopinimo įvertinimą [22].

5.3 Rūko įtaka radijo bangų sklidimui

Rūku vadinama ore susidariusi gausi smulkių vandens lašų arba kristalų sancaupa, kuri atsiranda kondensuojantis atmosferos vandens garams. Rūką galima apibūdinti pagal vandens kiekį, optinį matomumą, lašų dydžio pasiskirstymą ir temperatūrą. Dėl savo fizinės prigimties rūko įtaka elektromagnetinių bangų slopinime yra nenuginčijama. Vandens molekulių ir sklindančios bangos sąveikos metu dominuoja sklaidos efektas, kadangi išsklaidomos bangos ilgis yra didesnis už lašelio matmenis. Dėl vandens molekulių sukulto sklaidos efekto padidėja sklindančios elektromagnetinės bangos slopinimas. Rūko sukeltas slopinimas gali turėti stiprų poveikį radijo bangų sklidimui, kai kuriais atvejais net sukelti bevielio ryšio sutrikimą. Galimas daiktas, kad rūkas yra vienas iš dominuojančių faktorių, nustatant milimetrinių bangų diapazone veikiančių E-juostos sistemų patikimumą, ypač pakrančių zonose, kur dažnai susiformuoja tirštas, drėgnas rūkas su daug skysto vandens. Žemiau pateiktame paveikslėlyje nurodyti įvairių meteorologinių vandens darinių matmenys.



17 pav. Meteorologinių vandens darinių matmenys

Keletas meteorologinių mechanizmų gali nustatyti, ar rūkas susiformuos, ir jo stiprumo laipsnį. Buvo pastebėta didelė vėjo, turbulencijos, radiacijos, paviršiaus konfigūracijos ir drėgmės įtaka rūko susiformavimui. Yra kelios rūko rūšys. Pagrindinės rūko rūšys yra advekcinis ir radiacinis rūkas. Abi rūko rūšys skiriasi savo vieta ir susiformavimo metodais. Radiacinis rūkas susiformuoja, kai naktį žemė atšąla ir atvėsina gretimą oro masę, kol ji tampa perpildyta. Advekcinis rūkas

susiformuoja, kai šiltas, drėgnas oras slenka virš vėsesnio paviršiaus. Buvo minėta, kad vidutinis advekcinio rūko lašas dažniausiai yra didesnis nei radiacinio rūko lašas. Vandens garų kiekis rūke svyruoja nuo mažiau nei 0.4 iki 1 g/m³; skysto vandens kiekis rūke kinta nuo 0.1 iki 0.2 g/m³ [23].

6. Radijo ryšio bangų sklidimo modelių apžvalga

Radijo ryšio bangos sklisdamos erdve patiria energetinius nuostolius, kurie turi neigiamą poveikį duomenų perdavimo atstumui, kokybei ir efektyvumui. Esminiai elektromagnetinių bangų skverbties nuostoliai atsiranda dėl radijo bangų fizikinės prigimties, kuri lemia natūralią sklindančio signalo energijos dispersiją. Giedro oro sąlygomis, ore esančių natūralių dujų sukeliamas radijo bangų slopinimas yra vienas iš pagrindinių veiksnių įtakojančių elektromagnetinių bangų skverbti. Tačiau atmosferoje kurioje yra debesų ar lietaus pavidalu sukaupto vandens, vandens dariniai tampa svarbi radijo bangų nuostolių priežastis. Visų šių elektromagnetinių bangų nuostolius sukeliančių veiksnių įtaką galima įvertinti remiantis radijo bangų sklidimo modeliais. Žemiau pateikiami anksčiau išvardintų neigiamų veiksnių įtaka įvertinantys matematiniai modeliai.

6.1 Laisvos erdvės nuostolius įvertinantis modelis

Nuostoliai laisvoje erdvėje L_{bf} (dB) skaičiuojami tarp izotropinių antenų, kurios spinduliuoja ir sugeria elektromagnetines bangas visomis kryptimis. Laisva erdvė apibrėžiama kaip homogeninė aplinka, kurioje nėra jokių krūvių ir laidumo, todėl signalo sklidimo atstumas priklauso nuo pačio signalo dispersijos [24]. Signalo nuostoliai laisvoje erdvėje įvertinami pagal žemiau pateiktą formulę:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (1)$$

čia d – atstumas tarp antenų, λ – bangos ilgis.

Signalo nuostolius laisvoje erdvėje taipogi galima išreikšti priklausomybę nuo atstumo tarp antenų ir spinduliuojamos bangos dažnio:

$$L_{bf} = 92,45 + 20 \log f + 20 \log d; \quad (2)$$

čia d – atstumas tarp antenų (km), f – bangos dažnis (GHz).

Remiantis bangų sklidimo modeliu laisvoje erdvėje, apskaičiuojamas elektrinio lauko stipris, kurio priklausomybė išreiškiama pagal žemiau pateiktą formulę, kai žinoma izotropinio spinduliavimo galia:

$$E = P_t - 20 \log d + 74,8, \quad (3)$$

čia E – elektrinio lauko stipris, P_t – izotropinio spinduliavimo galia.

Apskaičiavus elektrinio lauko stiprį, pagal (4) išraišką įvertinami perdavimo nuostoliai laisvoje erdvėje:

$$L_{bf} = P_t - E + 20 \log f + 167,2 . \quad (4)$$

Taipogi galima nustatyti priimamą izotropinę galią P_r iš (5) formulės:

$$P_r = E - 20 \log f - 167,2 ; \quad (5)$$

bei elektrinio lauko galios tankį S iš (6) išraiškos:

$$S = E - 145,8 . \quad (6)$$

6.2 Logaritminis atstumo nuostolius įvertinantis modelis

Siekiant padidinti laisvos erdvės nuostolius įvertinančio modelio tikslumą, jo pagrindu buvo sukurtas logaritminis atstumo nuostolius įvertinantis modelis, kurį galima aprašyti žemiau pateikta išraiška:

$$PL(d) = PL_{FSL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) , \quad (7)$$

čia PL_{FSL} – nuostoliai laisvoje erdvėje (dB), d – atstumas tarp antenų (m), d_0 – atskaitinis atstumas (m), o n – bangos sklidimo kelio nuostolių eksponentė.

Šis elektromagnetinių bangų sklidimo modelis padeda prognozuoti įvairių bangų sklidimo aplinkų sukeltus signalo nuostolius. Modelis sudarytas koreguojant nuostolių laisvoje erdvėje vertę pagal bangos sklidimo kelio nuostolių eksponentę n , kuri kinta priklausomai nuo aplinkos kurioje sklinda banga. Bangų sklidimo kelio nuostolių eksponentės dėka, į nuo atstumo priklausančius bangų sklidimo modelius, galima įtraukti specifinės bangų sklidimo aplinkos faktorių [25]. Žemiau esančioje lentelėje pateikta tipinės bangos sklidimo kelio nuostolių eksponentės priklausomybė nuo aplinkos, kurioje sklinda banga.

2 lent. tipinės bangos sklidimo kelio nuostolių eksponentės vertės

Environment	Path Loss Exponent, n
Free space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

6.3 ITU-R atmosferos dujų įtaką įvertinantis modelis

Atmosferos dujų įtakojamas, elektromagnetinių bangų iki 1000 GHz, slopinimas dėl sauso oro ir vandens garų apskaičiuojamas sumuojant atskiras deguonies ir vandens garų rezonansines linijas, įvertinant papildomus faktorius, tokius, kaip Debajaus ne rezonansinį deguonies slopinimą, pasireiškiantį, kai bangos dažnis žemesnis nei 10 GHz bei slėgio sukeltą azoto slopinimą, kai bangos dažnis viršija 100 GHz. Naudojant šį modelį galima tiksliai apskaičiuoti atmosferos dujų sukeltus elektromagnetinių bangų nuostolius esant bet kokioms aplinkos slėgio, vandens garų tankio ir temperatūros vėrtėms. Kitų tipinėje atmosferoje esančių molekulių, pavyzdžiui, deguonies izotopų, ozono ir jo izotopų bei kitų dalelių įtaka skaičiavimų rezultatams yra nežymi, todėl jų poveikis šiame modelyje nėra vertinamas.

Atmosferos dujų įtakojamą, elektromagnetinių bangų slopinimą γ_g (dB/km) galima įvertinti pagal žemiau pateiktą formulę:

$$\gamma_g = (\gamma_o + \gamma_w)r_0 = 0.1820 f \left(N''_{\text{Deguonies}}(f) + N''_{\text{VandensGarų}}(f) \right) r_0 ; \quad (8)$$

čia γ_o – sauso oro slopinimas, kurį sudaro deguonies, slėgio sukulto azoto ir Debajaus ne rezonansinio deguonies sukuriami nuostoliai (dB/km), γ_w – vandens garų slopinimas (dB/km), f – slopinamos bangos dažnis (GHz), r_0 – atstumas tarp antenų, $N''_{\text{Deguonies}}(f)$ ir $N''_{\text{VandensGarų}}(f)$ – nuo dažnio priklausančios menamosios dalys, kurios išreiškiamos pagal žemiau pateiktas formules:

$$N''_{\text{Deguonies}}(f) = \sum_{i=1}^n S_i F_i + N''_D(f) ; \quad (9)$$

$$N''_{\text{VandensGarų}}(f) = \sum_{i=1}^n S_i F_i , \quad (10)$$

čia F_i – i-osios deguonies ar vandens garų linijos formos faktorius, $N''_D(f)$ – sauso oro kontinuumas dėl slėgio sukeltos azoto absorbcijos ir Debajaus spektro, S_i – i-osios deguonies ar vandens garų linijos intensyvumas, kurį galima rasti iš (11) ir (12) formulių:

$$S_{i_Deguonies} = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] ; \quad (11)$$

$$S_{i_VandensGarų} = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp[b_2(1-\theta)] ; \quad (12)$$

čia p – sauso oro slėgis (hPa), e – vandens garų dalinis slėgis, a_i ir b_i – koeficientai, randami iš 1 ir 2 priede esančių lentelių, $\theta = 300 / T$, čia T – atmosferos temperatūra išreikšta kelvinais.

Vandens garų dalinis slėgis e išmatuojamas arba randamas iš žemiau pateiktos priklausomybės:

$$e = \frac{\rho T}{216,7}, \quad (13)$$

čia ρ vandens garų tankis.

Deguonies ar vandens garų linijos formos faktorius F_i įvertinamas pagal (14) išraišką:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta (f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta (f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]; \quad (14)$$

čia f_i – deguonies ar vandens garų linijos dažnis, Δf – linijos plotis, o δ – linijos korekcijos koeficientas.

Deguonies ar vandens garų linijos plotis Δf nustatomas iš žemiau pateiktų formulių:

$$\Delta f_{\text{Deguonies}} = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1 e \theta), \quad (15)$$

$$\Delta f_{\text{VandensGarų}} = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}). \quad (16)$$

Deguonies ir vandens garų linijų korekcijos koeficientai δ apskaičiuojami pagal (17) ir (18) formules:

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}, \quad (17)$$

$$\delta = 0. \quad (18)$$

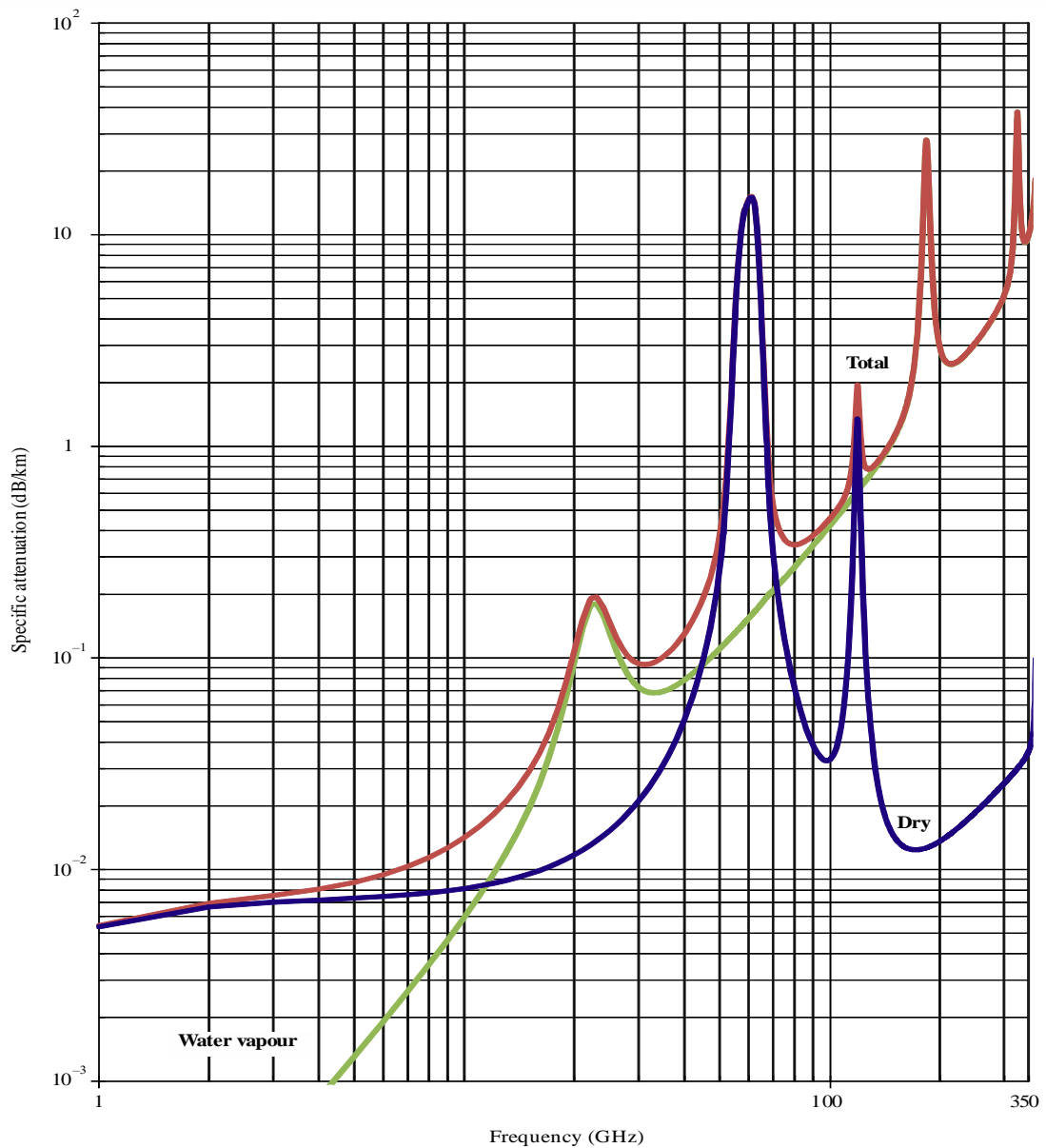
Sauso oro kontinuumas $N''_D(f)$ dėl slėgio sukeltos azoto absorbcijos ir Debajaus spektro randamas iš išraiškos:

$$N''_D(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right]; \quad (19)$$

čia d – Debajaus spektro plotis, kurį galima nustatyti iš žemiau nurodytos priklausomybės:

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}. \quad (20)$$

Žemiau esančiame paveikslėlyje pateiktas atmosferos dujų įtakojamas, elektromagnetinių bangų iki 350 GHz, slopinimas dėl sauso oro ir vandens garų. Matavimai atmosferoje buvo atlikti esant 15 °C temperatūrai, 1013,25 hPa slėgiui ir 7,5 g/m³ vandens garų tankiui [26].



18 pav. Atmosferos dujų įtakojamas, elektromagnetinių bangų iki 350 GHz, slopinimas.

6.4 ITU-R lietaus įtaką įvertinantis modelis

Lietaus įtakojamą elektromagnetinių bangų slopinimą γ_R (dB/km) galima įvertinti, pagal žemiau pateiktą formulę:

$$\gamma_R = kR^\alpha ; \quad (21)$$

čia k ir α – koeficientai priklausantys nuo dažnio, R – lietaus intensyvumas (mm/h).

Konkrečias k ir α koeficientų vertes galima nustatyti iš žemiau pateiktų funkcijų nuo dažnio, kurios galioja 1 – 1000 GHz ribose.

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (22)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (23)$$

Čia a_j , b_j , c_j , m_k , m_α , c_k ir c_α atitinkamos poliarizacijos konstantos, f – terpe sklindančios elektromagnetinės bangos dažnis. Priklausomai nuo sklindančios bangos poliarizacijos, keičiasi k ir α koeficientų nustatymui naudojamų konstantų vertės. Žemiau pateiktose lentelėse nurodyti konstantų dydžiai, reikalingi nustatyti horizontalios ir vertikalios poliarizacijos koeficientų vertes.

3 lent. k_H koeficiento nustatymui naudojamos konstantų vertės

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

4 lent. k_V koeficiento nustatymui naudojamos konstantų vertės

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

5 lent. α_H koeficiento nustatymui naudojamos konstantų vertės

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

6 lent. α_V koeficiento nustatymui naudojamos konstantų vertės

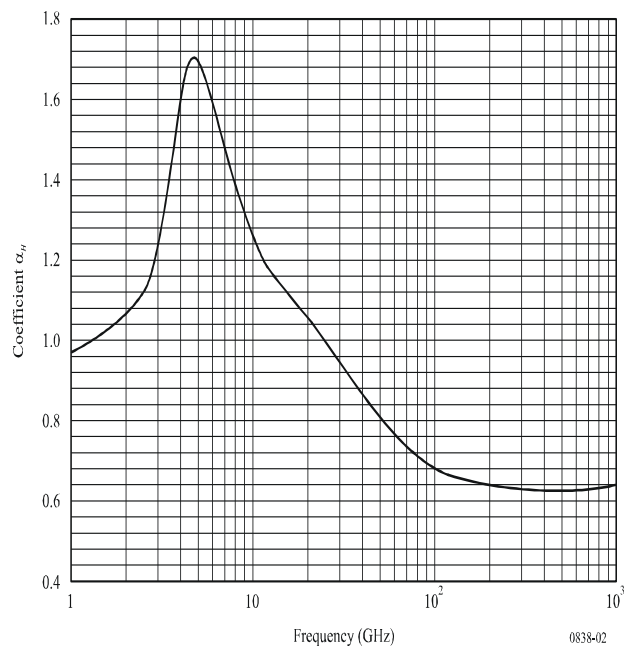
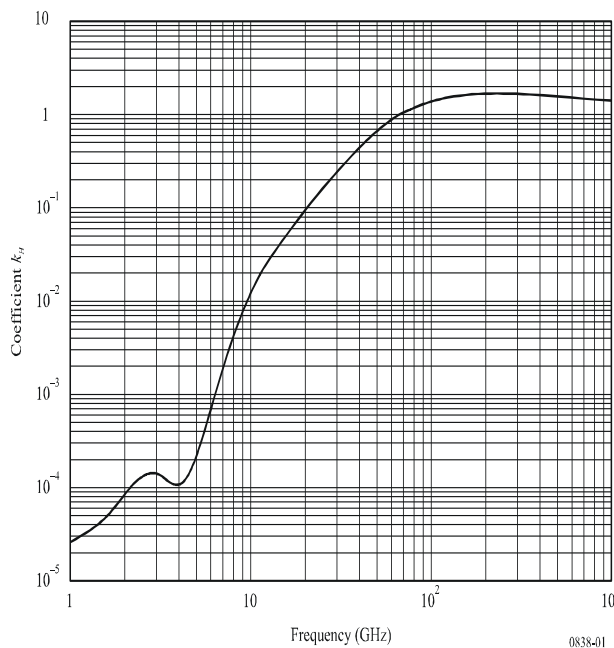
j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

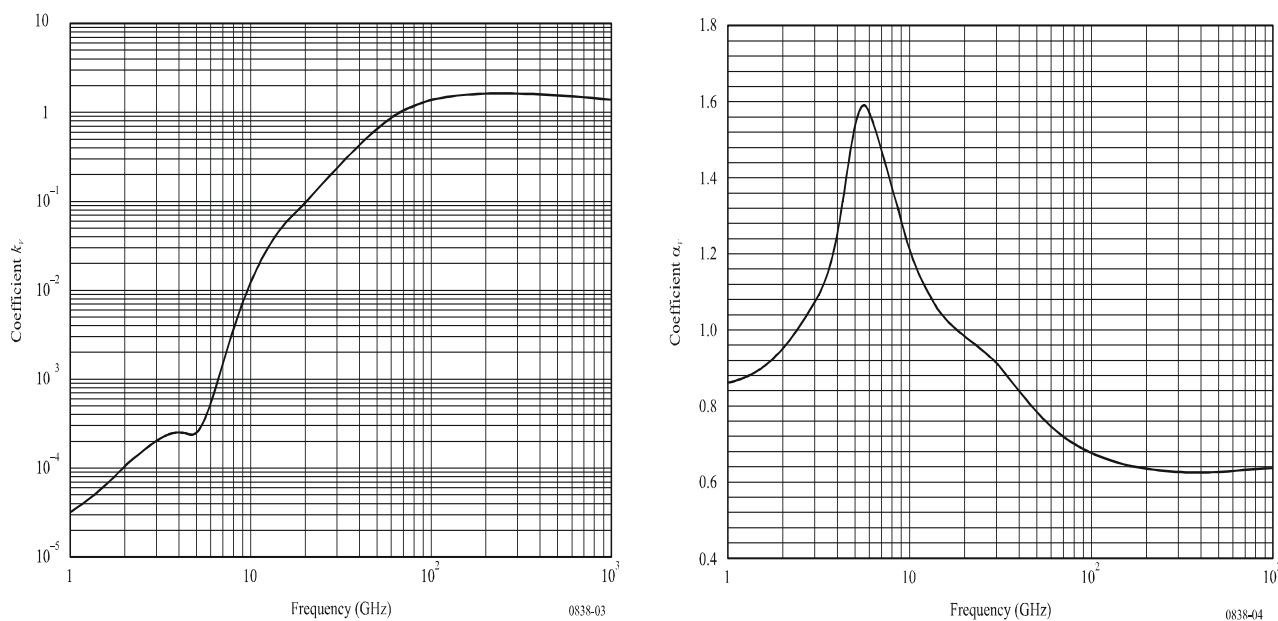
Siekiant įvertinti lietaus įtakojamą bet kokia trajektorija sklindančių tiesiškai ir apskritimiškai poliarizuotų bangų slopinimą, yra naudojamos žemiau pateiktos k ir α koeficientų nustatymo formules:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 ; \quad (24)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k ; \quad (25)$$

čia k_H , k_V , α_H , α_V – atitinkamos poliarizacijos koeficientai, θ – aukščio trajektorijos kampas, τ – poliarizacijos pakrypimo kampas. Horizontalios ir vertikalios poliarizacijos koeficientų vertės ties dominančiu dažniu randamos iš (22) ir (23) formulių arba pasirenkamos iš 3 priede esančios lentelės, kurioje nurodyti k_H , k_V , α_H , α_V koeficientų dydžiai prie tam tikro fiksuoto bangos dažnio. Pagal (24) ir (25) formules, nustatytos k ir α koeficientų vertės statomos į (21) formulę, pagal kurią įvertinamas lietaus įtakojamas elektromagnetinių bangų slopinimas γ_R (dB/km). Žemiau esančiuose paveikslėliuose pateiktos k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų priklausomybės nuo dažnio [27].



19 pav. k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų priklausomybės nuo dažnio

6.5 ITU-R rūko ir debesų įtaką įvertinantis modelis

Debesų ir rūko įtaka elektromagnetinių bangų slopinimui, galima įvertinti taikant Reilėjaus sklaidos artinį, kadangi debesys ir rūkas yra sudaryti iš mažų skaidrių vandens lašelių, kurių dydis neviršija 0,1 milimetro. Reilėjaus artinys išreiškia bangų slopinimą tūrio vienetu, kuriame žinomas vandens kiekis, todėl rūko ir debesų įtakojamą elektromagnetinių bangų slopinimą γ_C (dB/km) galima rasti, pagal žemiau pateiktą formulę:

$$\gamma_C = K_l M ; \quad (26)$$

čia K_l – slopinimo koeficientas ((dB/km)/(g/m³)), M – skysto vandens tankis debesyje ar rūke (g/m³). Vidutinio rūko, kai matomumas siekia 300 metrų, vandens tankis svyruoja apie 0,05 g/m³, tuo tarpu stipraus, kai matomumas siekia 50 metrų – 0,5 g/m³.

Slopinimo koeficientas K_l apskaičiuojamas naudojant Reilėjaus sklaidą pagrįstą matematinį modelį, kuris remiasi vandens dielektrinės skvarbos $\varepsilon(f)$ dvigubu Debajaus modeliu. Matematinis modelis leidžia apskaičiuoti elektromagnetinės bangos, kurios dažnis neviršija 1000 GHz, slopinimo koeficientą [28]. Slopinimo koeficientas randamas pagal žemiau pateiktą formulę:

$$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} ; \quad (27)$$

čia f – elektromagnetinės bangos dažnis (GHz), o η :

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} , \quad (28)$$

čia ε' ir ε'' kompleksinės vandens dielektrinės skvarbos. Atitinkamos dielektrinės skvarbos randamos iš žemiau pateiktų formulių:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[1 + (f/f_p)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + (f/f_s)^2 \right]}; \quad (29)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + (f/f_p)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + (f/f_s)^2 \right]} + \varepsilon_2, \quad (30)$$

kai:

$$\theta = 300 / T; \quad (31)$$

$$f_p = 20,20 - 146 (\theta - 1) + 316 (\theta - 1)^2; \quad (32)$$

$$f_s = 39,8 f_p; \quad (33)$$

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 (\theta - 1); \quad (34)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671 \varepsilon_0; \quad (35)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52. \quad (36)$$

7. Pagrindiniai E-juostos mikrobangių sistemų parametrai

Radijo ryšio parametrais yra nusakoma svarbi informacija apie tinklą sudarančių mazgų tarpusavio sąveiką. Ji įprastai apima duomenų perdavimo kokybės ir fizinio informaciją pernešančio signalo charakteristikas. Duomenų perdavimo kokybę galima išreikšti klaidingų bitų ir paketų praradimo santykių bei klaidingomis ir nepasiekiamomis sekundėmis. Tuo tarpu fizinio signalo charakteristikas galima apibūdinti efektyvia izotropinio spinduliavimo galia, priimamo signalo lygiu, vidutine kvadratine paklaida ir kitais parametrais. Šios dvi parametų grupės yra viena nuo kitos priklausomos, kadangi vienos grupės parametų kitimas įtakoja kitos grupės parametų vertes, pavyzdžiui, dėl sumažėjusios siųstuvo spinduliavimo galios gali padidėti klaidingų bitų santykis, kadangi siunčiamas signalas bus lengviau paveikiamas trikdžių, kurie apsunkina imtuvo darbą detektuojant priimtų bitų vertes. Dėl šios priežasties svarbu parinkti atitinkamas parametų vertes, kurių dėka būtų pasiekiamas didžiausias tinklo efektyvumas. Radijo ryšio parametrai taipogi leidžia kontroliuoti tinkle vykstančius procesus bei laiku pastebėti duomenų perdavimo sutrikimus. Žemiau pateiktas pagrindinių radijo tinklo parametų sąrašas ir jų išsamesnis aprašymas.

TSL – perduodamas signalo lygis (angl. Transmit Signal Level). TSL verte išreiškiama siųstuvo perduodama galia į prie jo prijungtą anteną. Ši vertė pateikiama dBm vienetais.

EIRP – efektyvi izotropinio spinduliavimo galia (angl. Effective Isotropically Radiated Power). EIRP verte išreiškiama izotropinės antenos spinduliuojama signalo galia, kuri teoriniu atveju, turi būti vienoda visomis kryptimis. Efektyvią izotropinio spinduliavimo galią (dBm) galima nustatyti pagal žemiau pateiktą formulę:

$$EIRP = TSL + G_T, \quad (37)$$

čia G_T – siųstuvo antenos stiprinimas išreikštas dBi vienetais.

RSL – priimamas signalo lygis (angl. Receive Signal Level). RSL verte išreiškiama imtuvo priimama signalo galia, kuri dažniausiai prieš patenkant į imtuvą būna sustiprinama antenoje. Priimtą signalo lygį dBm skalėje, galima išreikšti iš žemiau pateiktos išraiškos:

$$RSL = EIRP - FSL - N + G_R, \quad (38)$$

čia FSL – laisvos erdvės nuostoliai (dB), N – kiti aplinkos nuostoliai (dB), G_R – imtuvo antenos stiprinimas (dBi).

MSE – vidutinė kvadratinė prognozės paklaida (angl. Mean Square Error). MSE verte išreiškiama vidutinė kvadratinė paklaida tarp nustatytų ir numatytų duomenų verčių [29]. Kitaip tariant, ji parodo kokybės skirtumą tarp realiai priimto ir planuoto priimti signalo. Radijo ryšio sistemose MSE reikšmė naudojama parenkant tinkamą duomenų kodavimo ir moduliacijos schemą. Teisingas kodavimo ir moduliacijos parinkimas leidžia padidinti ryšio linijos patikimumą ir talpą, kai tam netrukdo atitinkamos aplinkos sąlygos. MSE vertė pateikiama dB skalėje.

BER – klaidingų bitų santykis (angl. Bit Error Rate). BER verte išreiškiamas klaidingai priimtų bitų skaičiaus santykis su pasiųstų bitų skaičiumi, kuris dažniausiai yra pateikiamas procentine išraiška. Klaidingų bitų santykis nustatomas per tam tikrą laiko intervalą, kurio metu yra registruojamas klaidingų bitų ir visų pasiųstų bitų skaičius. Klaidingų bitų santykį galima apskaičiuoti pagal žemiau pateiktą priklausomybę:

$$BER = \frac{\text{Klaidingų bitų skaičius}}{\text{Pasiųstų bitų skaičius}}, \quad (39)$$

BER reikšmė naudojama kaip skaitmeninės informacijos perdavimo ryšių linijomis kokybės rodiklis [30]. Šis rodiklis kinta priklausomai nuo duomenų perdavimo terpės ir ją neigiamai veikiančių jėgų, kurios sukelia perduodamų bitų iškraipymus. Neigiamų jėgų paveikti bitai gali būti neteisingai detektuojami, t.y. 0 vertę turintis bitas, gali būti detektuotas kaip 1.

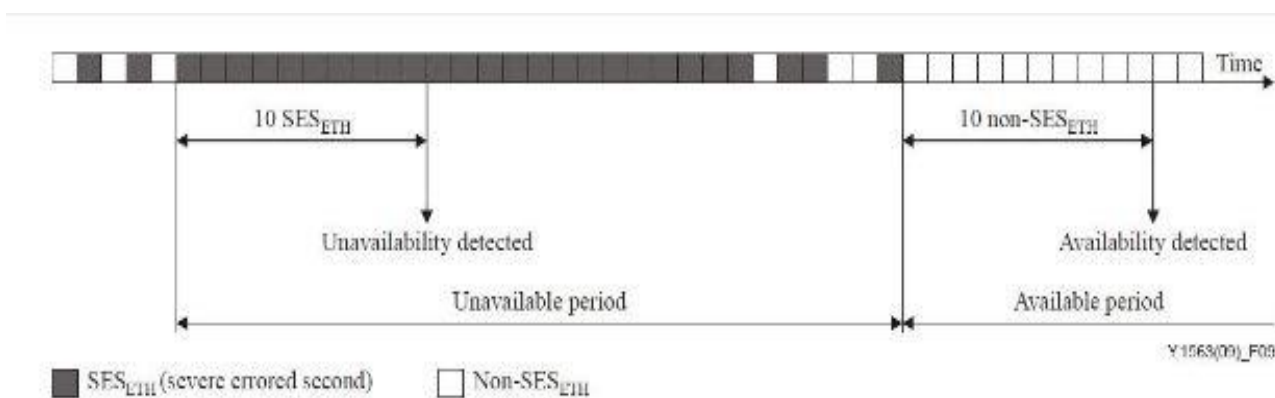
PLR – prarastų paketų santykis (angl. Packet Loss Rate). Paketų praradimas yra procesas, kurio metu vienas ar keli ryšio linija pasiųsti paketai nepasiekia paskirties taško. PLR verte išreiškiamas prarastų paketų skaičiaus santykis su pasiųstų paketų skaičiumi, kuris dažniausiai pateikiamas procentine išraiška. Paketų praradimo santykis yra nustatomas per tam tikrą laiko

intervalą, kurio metu yra registruojamas prarastų paketų ir visų pasiųstų paketų skaičius [31]. Prarastų paketų santykį galima įvertinti pagal žemiau pateiktą formulę:

$$PLR = \frac{\text{Prarastų paketų skaičius}}{\text{Pasiųstų paketų skaičius}}, \quad (40)$$

ES – klaidinga sekundė (angl. Errored Second). Klaidinga sekundė yra vienos sekundės laiko intervalas per kurį įvyko kokia nors klaida. Klaida laikomas neteisingai detektuotas bitas, klaidingas duomenų blokas, visiškas ryšio praradimas ar koks nors kitas duomenų perdavimo sutrikimas. Klaidingos sekundės užregistravimas nepriklauso nuo per tą sekundę įvykusių klaidų skaičiaus ar jų tipo. Kitaip tariant ES verte išreiškiamas telekomunikacijų ar kitų duomenų perdavimo sistemų klaidingų sekundžių skaičius [32].

UAS – nepasiekiamos sekundės (angl. Unavailable Seconds). UAS yra sekundėmis išreikštas laiko intervalas per kurį tinklu teikiamos paslaugos tampa neprieinamos. Teikiamos paslaugos laikomos neprieinamomis, kai 10 kartų iš eilės yra užregistruojamas labai klaidingų sekundžių (angl. Severely Errored Seconds) intervalas. Labai klaidingos sekundės, sutrumpintai vadinamos SES, yra vienos sekundės laiko tarpas, kurio metu prarastų kadrų skaičiaus santykis su pasiųstų kadrų skaičiumi viršija nustatytas ribas. Paslaugos vėl laikomos prieinamomis, kai 10 kartų iš eilės nėra užregistruojamos klaidingos sekundės. UAS verte išreiškiamas telekomunikacijų ar kitų duomenų perdavimo sistemų teikiamų paslaugų neprieinamumo laikas sekundėmis [33]. Žemiau esančiame paveikslėlyje nurodyta paslaugų prieinamumo/neprieinamumo būsenų kaitos priklausomybė nuo klaidingų sekundžių pasireiškimo.



20 pav. Paslaugų prieinamumo/neprieinamumo būsenų kaita

8. E-juostos diapazono elektromagnetinių bangų sklidimo matavimai

71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono elektromagnetinių bangų sklidimo matavimai buvo atliekami su ant KTU elektronikos rūmų stogo įrengta 70/80 GHz ruože veikiančia radijo ryšio sistema. Matavimų metu, buvo stebima priimamo signalo galios priklausomybė nuo siunčiamo

signalų lygio ir jo dažnio. Taipogi tuo pat metu buvo registruojama vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos priklausomybė nuo siunčiamos radijo bangos galios bei dažnio. Matavimų metu siunčiamo signalo galia numatytose ribose (nuo -10 dBm iki 10 dBm), buvo keičiama 1 dBm žingsniu, o dažnis – 1 GHz intervalu. Surinkti duomenys buvo panaudoti apskaičiuojant efektyvią izotropinio spinduliavimo galią, antenos priimamą signalo galios lygį, laisvos erdvės nuostolius, matavimų metu buvusius realius bangų sklaidimo nuostolius bei teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumą. Skaičiavimų metu nustatyti realūs bangų sklaidimo nuostoliai buvo lyginami su logaritminio atstumo nuostolius įvertinančio modelio rezultatais. Atlikus minėtų nuostolių palyginimą buvo pateikta E-juostos ruožo bangų sklaidimo nuostoliams įvertinti, taikant logaritminį atstumo nuostolius įvertinantį modelį, tinkama bangų sklaidimo kelio nuostolių eksponentės vertė.

8.1 Matavimų atlikimo vieta

71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono elektromagnetinių bangų sklaidimo matavimai buvo atliekami Kauno technologijos universitete esančioje radijo ryšio laboratorijoje. Žemiau pateiktoje KTU elektronikos rūmų nuotraukoje iš palydovo galima įžvelgti ant stogo sumontuotą 70/80 GHz ruožu veikiančią radijo ryšio sistemą, pažymėtą raudonais apskritimais.



21 pav. KTU elektronikos rūmų nuotrauka iš palydovo

8.2 Matavimuose naudota įranga bei jos konfiguracija

71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono elektromagnetinių bangų sklaidimo matavimai buvo atliekami su ant KTU elektronikos rūmų stogo įrengta 70/80 GHz ruože veikiančia radijo ryšio sistema. Sistemos siųstuvai-imtuvai kartu su antenomis buvo pritvirtinti prie metalinės konstrukcijos, matomos žemiau pateiktose nuotraukose (raudonais stačiakampiais pažymėti kitoje ryšio linijos pusėje esantys E-juostos transiveriai). Antenos tarpusavyje nutolusios 90 metrų atstumu bei iškeltos į dviejų metrų aukštį nuo stogo paviršiaus.



22 pav. Ant KTU elektronikos rūmų stogo įrengta E-juostos diapazono sistema

Žemiau esančiose lentelėse pateikti pagrindiniai matavimuose naudotos E-juostos diapazono mikrobangės sistemos radijo ryšio parametrai.

7 lent. Bendrieji sistemos parametrai

Specification	Description
Standards	ETSI: EN 302 217 FCC: Part 101 (2004) ITU-R CEPT
Operating mode	FDD
System Configurations	1+0, 1+1 HSB, 2+0
Operating Frequency Range	71-76GHz, 81-86GHz
Channel Spacing	62.5MHz, 125MHz, 250MHz, 500MHz
Frequency Stability	±10ppm

8 lent. Dažnių juostos parametrai

Low Range [MHz]	High Range [MHz]	TX-RX Separation [MHz]	Low BW [MHz]	High BW [MHz]
71,000 - 76,000	81,000 – 86,000	10,000	5000	5000

9 lent. Galimos 250 MHz pločio kanalo talpos

Modulation	Minimum Required Capacity Activation Key (Mbps)	Radio Throughput	L2 Compression	Header De-Duplication - LTE scenario
BPSK	200	179-220	181-266	189-685
4 QAM	400	373-460	379-555	395-1431
8 QAM	650	553-682	562-824	586-2124
16 QAM	1000	751-926	764-1120	795-2500
32 QAM	1000	987-1218	1004-1472	1046-2500
64 QAM	1600	1211-1494	1232-1807	1283-2500
128 QAM	1600	1463-1806	1489-2183	1551-2500
256 QAM	1600	1610-1988	1638-2403	1707-2500

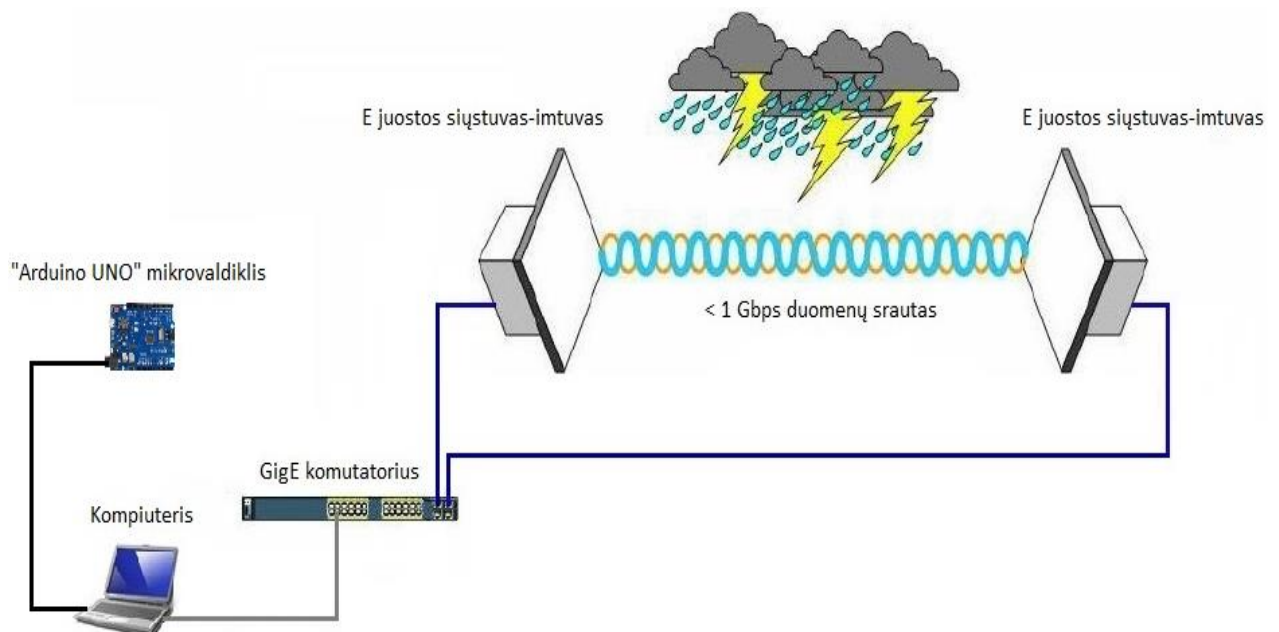
10 lent. Maksimalios siųstuvo galios

Modulation	TX Power		
	Up to 125MHz channels	250MHz channels	500MHz channels
BPSK	12	10	8
QPSK	12	10	8
8 PSK	12	10	8
16 QAM	11	9	7
32 QAM	11	9	5
64 QAM	10	8	3
128 QAM	10	8	NA
256 QAM	9	6	NA

11 lent. Imtuvo priimamo galios lygio slenkstinės ribos

Modulation	Channel Spacing [MHz]			
	62.5	125	250	500
BPSK	-80.6	-77.6	-74.6	-71.6
4 QAM	-79	-76	-73	-70
8 QAM	-73.7	-70.7	-67.7	-64.7
16 QAM	-72.3	-69.3	-66.3	-63.3
32 QAM	-68.4	-65.4	-62.4	-59.4
64 QAM	-65.7	-62.7	-59.7	-56.7
128 QAM	-62.6	-59.6	-56.6	NA
256 QAM	-59.6	-56.6	-53.6	NA

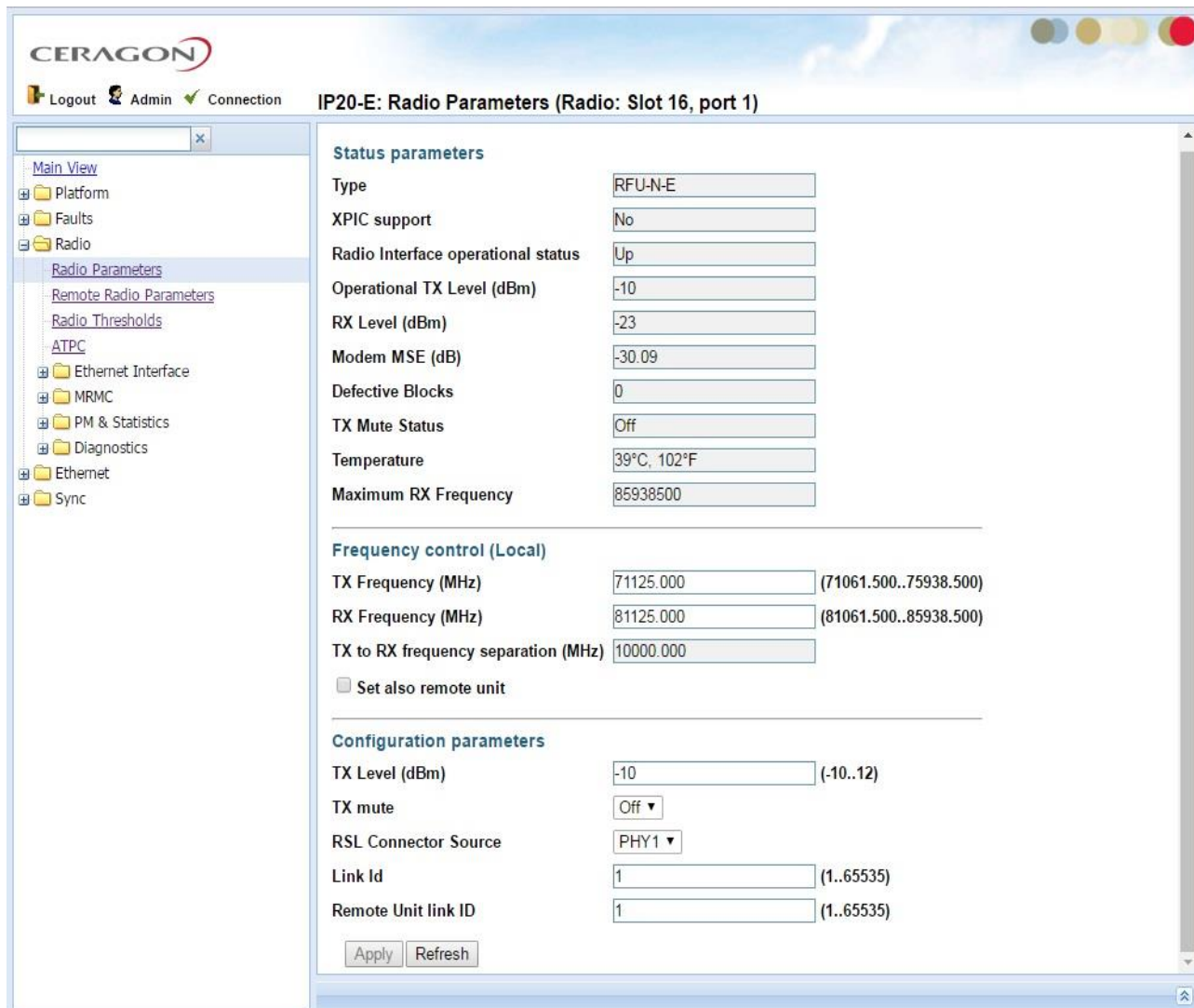
Abu ant stogo esantys E-juostos ruožo siųstuvai-imtuvai per 10/100/1000Base-T sąsają prijungti prie Gigabit Ethernet standartą palaikančio komutatoriaus. Prie kurio taip pat prijungiamas kompiuteris, kuriuo bus galima keisti bei stebėti mikrobangės sistemos parametrus. Prie kompiuterio papildomai prijungiamas hidrometeorologinių duomenų registravimui pritaikytas „Arduino UNO“ mikrovaldiklis. Bendra 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimams naudotos sistemos struktūra pateikta žemiau esančiame paveikslėlyje.



23 pav. 70/80 GHz ruožo radijo bangų sklidimo matavimams naudotos sistemos struktūrinė diagrama

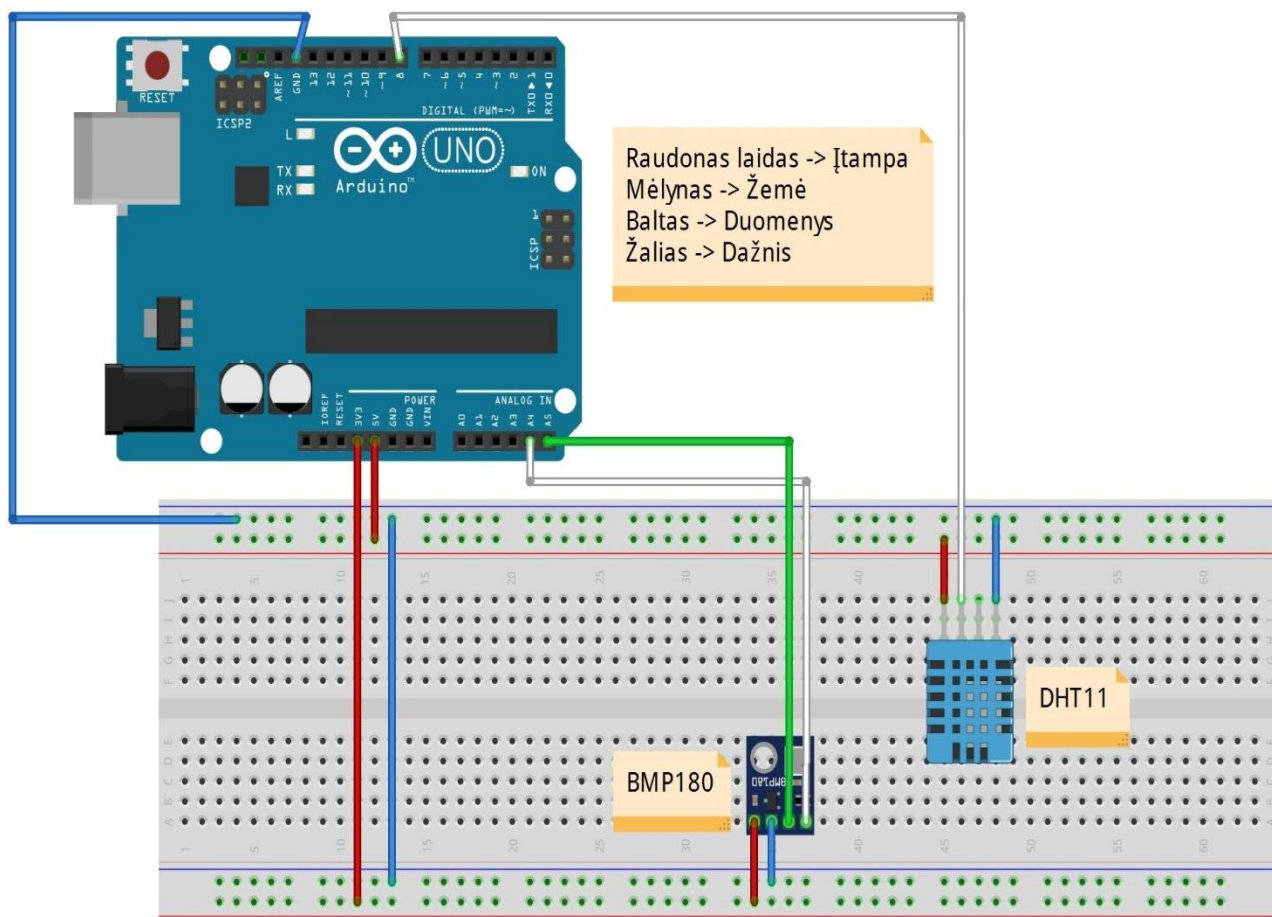
Prie komutatoriaus prijungtu kompiuteriu galima pasiekti E-juostos siųstuvų-imtuvų valdymo sistemą. Prisijungimas prie valdymo sistemos galimas žiniatinkliu, komandine eilute ar papildoma tinklo valdymo programa (angl. Network Management System). Nuo pasirinkto prisijungimo tipo, priklauso galimos sistemos konfigūravimo ribos bei vykstančių procesų stebėjimo galimybės. Žiniatinkliu pagrįsta valdymo sistema leidžia sekti radijo ryšio sistemos našumą, duomenų perdavimo korektiškumą, stebėti sistemoje vykstančius procesus, keisti radijo ryšio ar pačios sistemos

parametrus bei atlikti kitus veiksmus. Žemiau esančioje ekrano nuotraukoje pateiktas siųstuvo-imituvo radijo parametrų valdymo langas, kuriame galima koreguoti siųstuvo galią, priimamo ir siunčiamo signalo dažnį taipogi stebėti priimamo signalo galios lygį, vidutinę kvadratinę priimamo signalo prognozės paklaidą bei dar kelis kitus parametrus.



24 pav. E-juostos siųstuvo-imituvo radijo parametrų valdymo langas

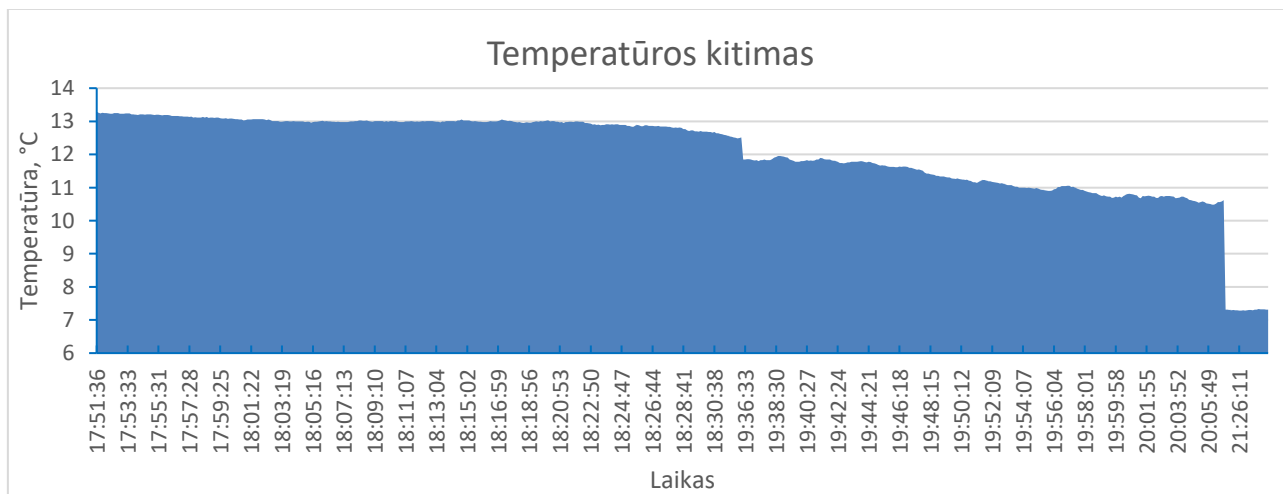
Prie kompiuterio prijungtos, hidrometeorologinius duomenis registruojančios, stotelės pagrindą sudaro „Arduino UNO“ mikrovaldiklis su „DHT11“ temperatūros/drėgmės bei „BMP180“ slėgio sensoriais. Matavimų metu užregistruotos aplinkos slėgio, temperatūros ir drėgmės vertės išvedamos į „Serial Monitor“ langą, iš kurio vėliau yra nuskaitomos ir išsaugomos vėlesnei duomenų analizei. Surinktų hidrometeorologinių duomenų perkėlimas iš „Serial Monitor“ lango į tekstinį failą, atliekamas nemokama, Roger Meier sukurta „CoolTerm“ programine įranga. Hidrometeorologinės stotelės kodas su įtrauktomis bibliotekomis, nurodytais mikrovaldiklio kontaktais ir kintamaisiais nurodytas 4 priede. Žemiau esančiame paveikslėlyje pateikta 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklaidimo matavimams naudotos hidrometeorologinės stotelės schema.



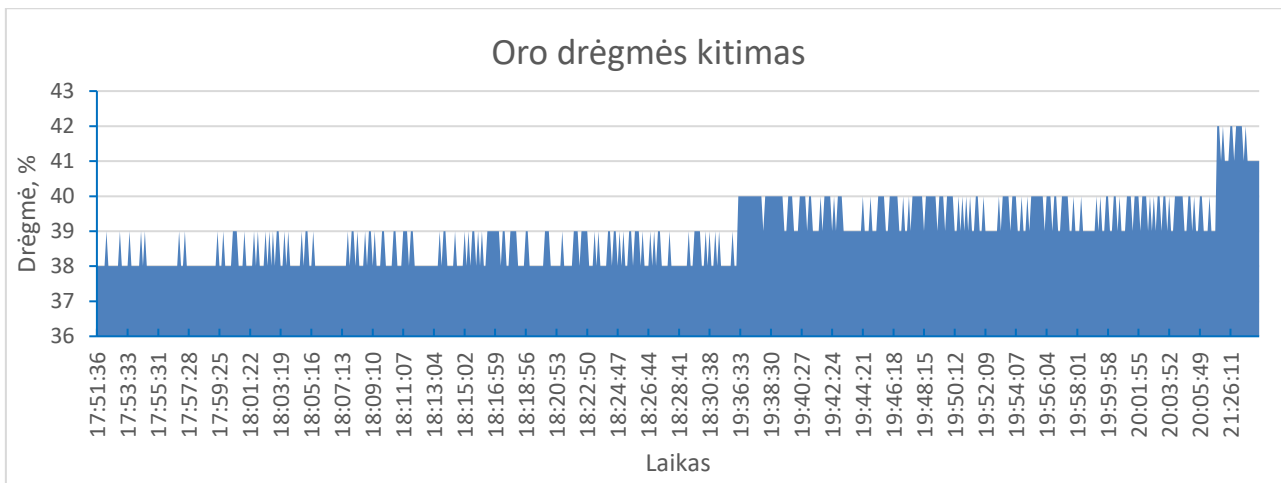
25 pav. Hidrometeorologinės stotelės schema

8.3 Atlikti matavimai ir jų rezultatai

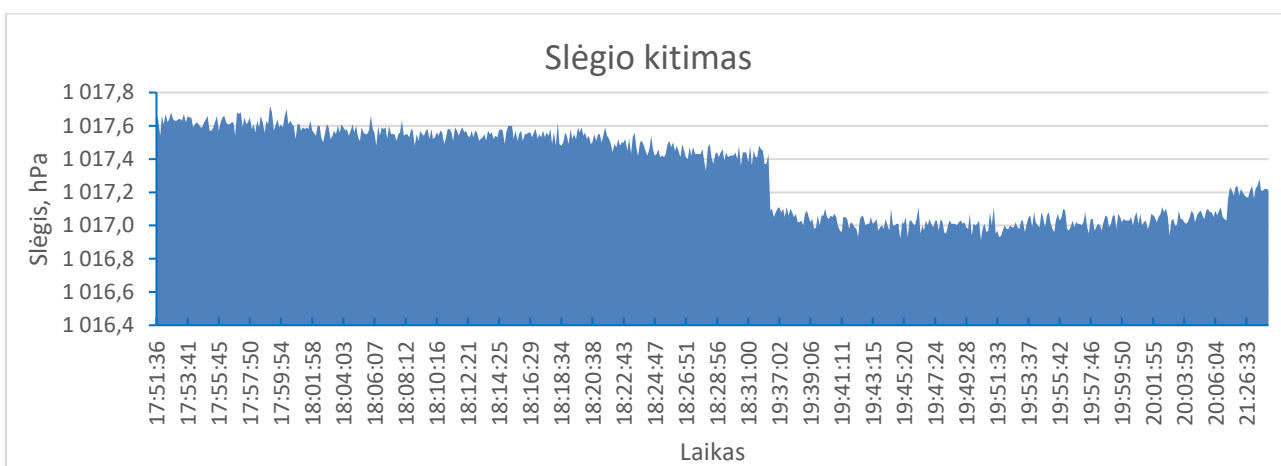
Atliekant 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklaidimo matavimus, anksčiau minėtu „Arduino UNO“ mikrovaldikliu ir keliais papildomais sensoriais, buvo registruojami aplinkos hidrometeorologiniai duomenys. Žemiau nurodytuose paveikslėliuose galima stebėti matavimų metu kintančią oro temperatūrą, drėgmę ir slėgį.



26 pav. Matavimų metu vykęs oro temperatūros kitimas



27 pav. Matavimų metu vykęs oro drėgmės kitimas



27 pav. Matavimų metu vykęs oro slėgio kitimas

Iš aukščiau pateiktų hidrometeorologinių duomenų galima teigti, kad E-juostos diapazono radijo bangų sklaidimo matavimai buvo atliekami esant vidutinei 12,05 laipsnių temperatūrai, 38,95 procentų oro drėgmei bei 1017,32 hektopaskalių slėgiui. Žemiau pateiktoje lentelėje nurodytos vidutinės matavimų metu buvusios hidrometeorologinių parametų vertės ir jų kvadratinis nuokrypis nuo vidurkio.

12 lent. Hidrometeorologiniai duomenys

	Temperatūra, °C	Drėgmė, %	Slėgis, hPa
Vidutinė vertė	12,05	38,95	1017,32
Vertės deviacija	1,31	0,92	0,26

71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklaidimo matavimų metu, buvo stebima priimamo signalo galios priklausomybė nuo siunčiamo signalo lygio ir jo dažnio. Taipogi tuo pat metu buvo registruojama vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos priklausomybė nuo siunčiamos radijo bangos galios bei dažnio. Matavimų metu siunčiamo signalo galia numatytose ribose (nuo -10 dBm iki 10 dBm), buvo keičiama 1 dBm žingsniu, o dažnis – 1 GHz intervalu. Siekiant nustatyti tikslią priimamo signalo galios lygio vertę, kas kelias sekundes buvo fiksuojama

momentinė RSL reikšmė. Atlikus 15 pakartotinių RSL vertės matavimų buvo apskaičiuotas priimamo signalo lygio vidurkis (lentelėse pažymėtas ~RSL trumpiniu). Žemiau esančiose lentelėse pateiktos išmatuotos RSL ir MSE verčių priklausomybės nuo TSL, kai siunčiamo signalo dažnis yra 71,125 GHz, 75,125 GHz, 81,125 GHz ir 85,125 GHz. Dėl didelio surinktų duomenų kiekio, tarpiniai MSE ir RSL parametrų matavimo rezultatai, ties 72,125 GHz, 73,125 GHz, 74,125 GHz bei 82,125 GHz, 83,125 GHz ir 84,125 GHz, pateikti penktame priede esančiose lentelėse.

13 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 71,125 GHz

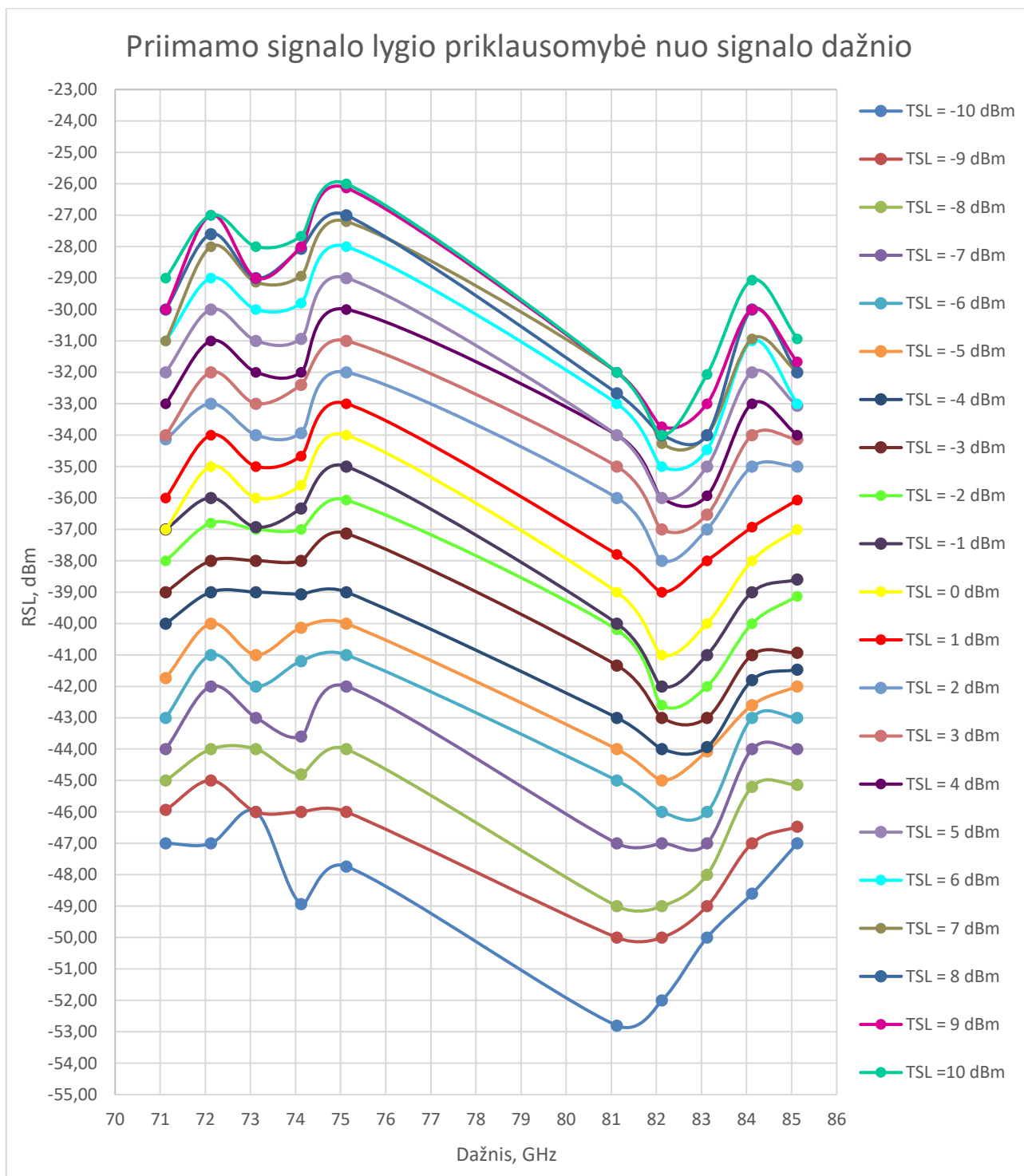
Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm			
71,125	-10	-28,51	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47,00
	-9	-29,68	-46	-46	-45	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-45,93
	-8	-31,22	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45,00
	-7	-32,11	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-6	-33,02	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43,00
	-5	-33,53	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-41	-41	-41	-41	-41	-41,73
	-4	-34,17	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,00
	-3	-34,56	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
	-2	-34,78	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	-1	-35,05	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
	0	-35,19	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
1	-35,45	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00	
2	-35,46	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-35	-34	-34	-34	-34,13	
3	-35,54	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00	
4	-35,65	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00	
5	-35,59	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
6	-35,53	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31,00	
7	-35,49	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31,00	
8	-35,45	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30,00	
9	-35,42	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30,00	
10	-35,32	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,00	

14 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 75,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm			
75,125	-10	-26,56	-48	-48	-48	-47	-48	-47	-48	-47	-48	-48	-48	-47	-48	-48	-48	-48	-48	-47,73
	-9	-29,66	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-8	-31,49	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-7	-33,42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,00
	-6	-34,25	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,00
	-5	-35,05	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,00
	-4	-35,73	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
	-3	-36,21	-37	-37	-37	-37	-37	-38	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-38	-37	-37,13
	-2	-36,62	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-37	-36	-36,07
	-1	-36,46	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00
	0	-36,67	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00
1	-36,75	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00	
2	-36,77	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
3	-36,7	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31,00	
4	-36,38	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30,00	
5	-36,13	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,00	
6	-35,74	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28,00	
7	-34,89	-28	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-28	-28	-27	-27	-27	-27	-27	-27,20	
8	-34,57	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27,00	
9	-34,32	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-27	-27	-26	-26	-26,13	
10	-33,97	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26,00	

15 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 81,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm			
81,125	-10	-27,17	-53	-53	-52	-52	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-52,80
	-9	-29,57	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50,00
	-8	-30,91	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49,00
	-7	-31,85	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47,00
	-6	-33,06	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45,00
	-5	-33,65	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-4	-34,22	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43,00
	-3	-34,77	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,33
	-2	-35,04	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-41	-41	-40,20
	-1	-34,97	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,00
	0	-35,25	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
1	-35,61	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-37	-37	-37	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-37,80	
2	-35,83	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00	
3	-35,99	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00	
4	-36,11	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00	
5	-36,03	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00	
6	-36,18	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00	
7	-36,17	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
8	-36,22	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-32,67	
9	-36,16	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
10	-36,13	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	

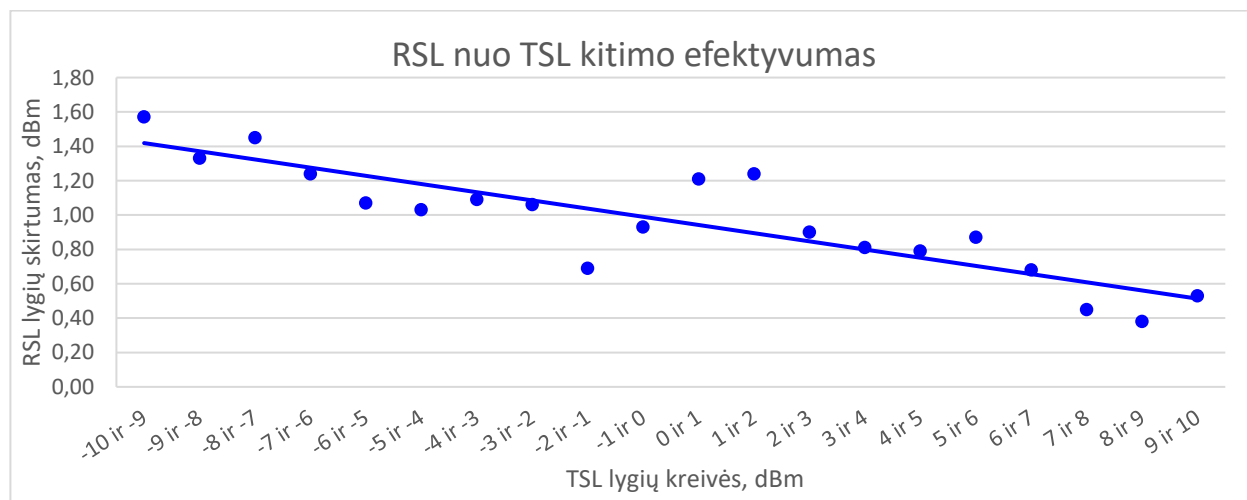


29 pav. Išmatuotų RSL verčių priklausomybė nuo dažnio

Iš grafikuose pateiktų RSL priklausomybių nuo TSL ir signalo dažnio, galima teigti, jog priimama signalo galia beveik tiesiškai priklauso nuo siunčiamo signalo galios lygio, t.y. didėjant TSL, didėja RSL, ir atvirkščiai – mažėjant TSL, mažėja RSL. Taipogi priimamo signalo lygio verčių pasiskirstyme nuo TSL yra matomas šių parametų priklausomybės mažėjimas, kuris pasireiškia didinant siunčiamo signalo galią. Žemiau esančioje lentelėje pateiktas RSL nuo TSL kitimo efektyvumas, kitaip tariant priimamo signalo galios skirtumas, kai siunčiamo signalo galia pakyla 1 dBm.

TSL lygių kreivės, dBm	RSL lygių skirtumas, dBm
-10 ir -9	1,57
-9 ir -8	1,33
-8 ir -7	1,45
-7 ir -6	1,24
-6 ir -5	1,07
-5 ir -4	1,03
-4 ir -3	1,09
-3 ir -2	1,06
-2 ir -1	0,69
-1 ir 0	0,93
0 ir 1	1,21
1 ir 2	1,24
2 ir 3	0,90
3 ir 4	0,81
4 ir 5	0,79
5 ir 6	0,87
6 ir 7	0,68
7 ir 8	0,45
8 ir 9	0,38
9 ir 10	0,53

Žemiau esančiame grafike vaizdžiau pateiktas RSL nuo TSL kitimo efektyvumas, kuris parodo šių dviejų parametru tarpusavio priklausomybę. Iš grafiko matyti, jog siunčiamo signalo galios didinimas daro vis mažesnę įtaką priimamo signalo galios lygiui. Dėl šio efekto reikėtų naudoti žemesnes E-juostos siųstuvų galias, prie kurių būtų užtikrinamas toleruojamas klaidingų bitų santykis.

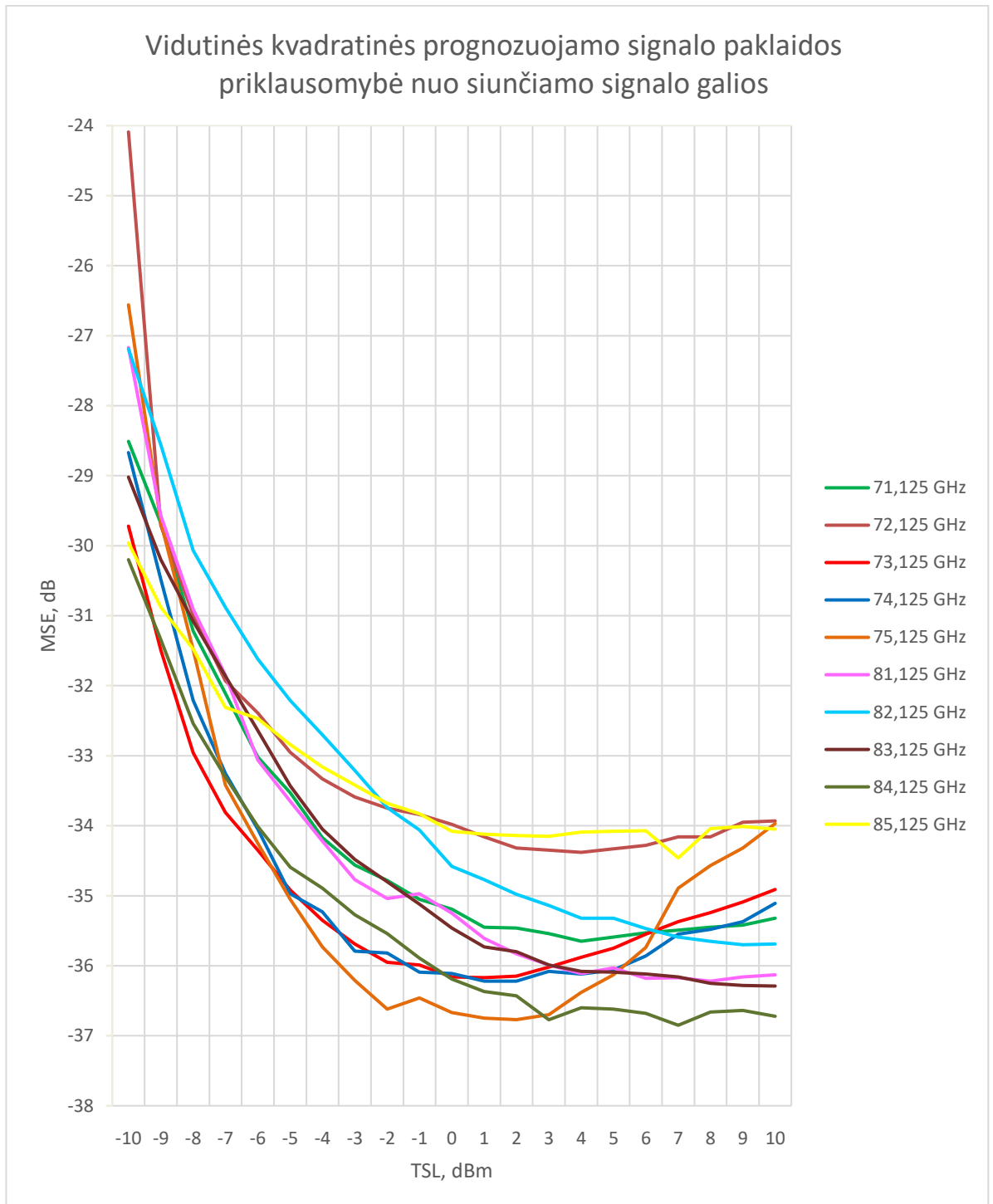


30 pav. RSL nuo TSL kitimo efektyvumas

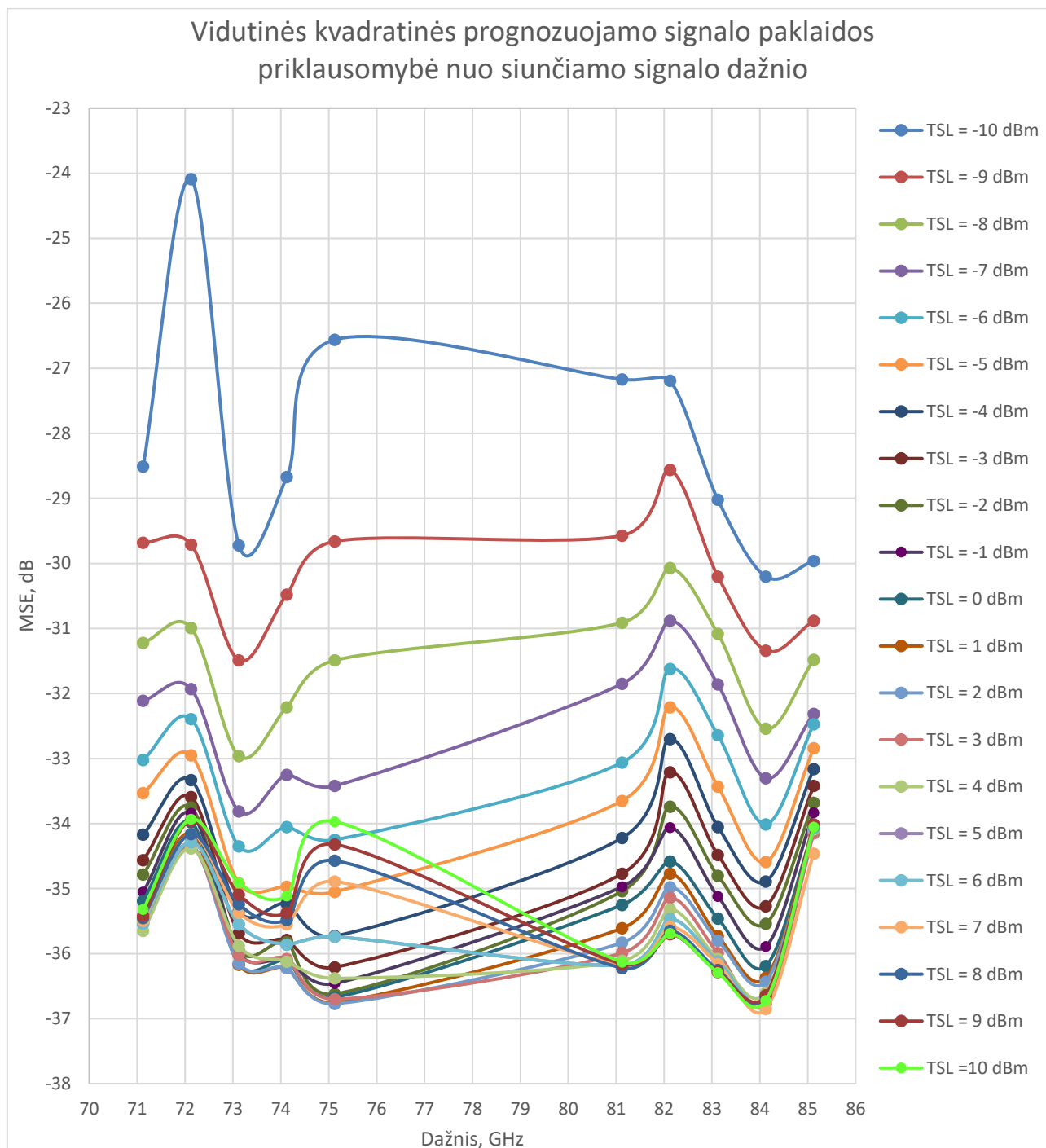
Iš 28 ir 29 paveikslėlyje pateiktos RSL priklausomybės nuo TSL ir signalo dažnio, galima tvirtinti, jog priimama signalo galia priklauso ne tik nuo siunčiamo signalo galios lygio bet ir nuo signalo dažnio. Didėjant signalo dažniui, grafikuose pastebima nežymi RSL mažėjimo tendencija, kuri ties tam tikrais dažnių ruožais (71 – 72 GHz, 73 – 75 GHz ir 82 – 84 GHz) gerokai prasilenkia su bangų sklaidimo teorijos teiginiais. Bangų sklaidimo teorija teigia, jog didėjant signalo dažniui,

didėja bangos sklidimo nuostoliai, kurie įtakoja žemesnį priimamo signalo lygį imtuve. Šiuo atveju, teorinių ir praktinių rezultatų neatitikimą gali sąlygoti nuo stogo paviršiaus atspindėję ir tam tikra tvarka susisumavę siunčiamo signalo atspindžiai, kurie sukelia RSL vertės svyravimus. Išsamesnė 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo nuostolių analizė pateikiama 55 puslapyje.

Žemiau esančiose paveikslėliuose vaizdžiau pateiktos išmatuotų MSE verčių priklausomybės nuo TSL bei siunčiamo signalo dažnio, kuris 1 GHz žingsniu kinta nuo 71,125 GHz iki 75,125 GHz ir nuo 81,125 GHz iki 85,125 GHz.



31 pav. Išmatuotų MSE verčių priklausomybė nuo TSL

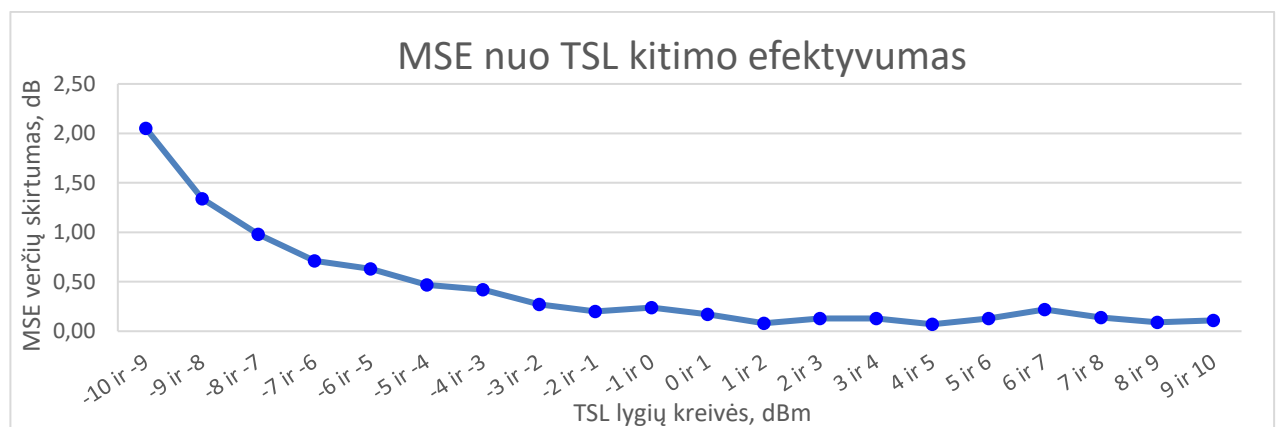


32 pav. Išmatuotų MSE večių priklausomybė nuo dažnio

Iš grafikuose pateiktų MSE priklausomybių nuo TSL ir signalo dažnio, galima teigti, jog vidutinė kvadratinė prognozuojamo signalo paklaida, didėjant signalo galios lygiui mažėja, tačiau matavimų metu signalo lygiui pasiekus aukštesnį nei 2 dBm galios lygį, MSE vertė praktiškai nebemažėjo, o kai kuriais atvejais net išaugo. Kaip ir priimamo signalo lygio atveju, MSE verčių pasiskirstyme nuo TSL yra matomas šių parametru priklausomybės mažėjimas, kuris pasireiškia didinant siunčiamo signalo galią. Žemiau esančioje lentelėje pateiktas MSE nuo TSL kitimo efektyvumas, kitaip tariant vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos verčių skirtumas, kai siunčiamo signalo galia pakyla 1 dBm.

TSL lygių kreivės, dBm	MSE verčių skirtumas, dB
-10 ir -9	2,05
-9 ir -8	1,34
-8 ir -7	0,98
-7 ir -6	0,71
-6 ir -5	0,63
-5 ir -4	0,47
-4 ir -3	0,42
-3 ir -2	0,27
-2 ir -1	0,20
-1 ir 0	0,24
0 ir 1	0,17
1 ir 2	0,08
2 ir 3	0,13
3 ir 4	0,13
4 ir 5	0,07
5 ir 6	0,13
6 ir 7	0,22
7 ir 8	0,14
8 ir 9	0,09
9 ir 10	0,11

Žemiau esančiame grafike vaizdžiau pateiktas MSE nuo TSL kitimo efektyvumas, kuris parodo MSE ir TLS parametrų tarpusavio priklausomybę. Iš grafiko matyti, jog siunčiamo signalo galios didinimas daro vis mažesnę įtaką vidutinei kvadratinei prognozuojamo signalo paklaidai. Dėl šios priežasties verta atsižvelgti į optimalias E-juostos siūtuvų galias, siekiant sumažinti MSE vertes.



33 pav. MSE nuo TSL kitimo efektyvumas

Iš 31 ir 32 paveikslėlyje pateiktos MSE priklausomybės nuo TSL ir signalo dažnio, galima tvirtinti, kad vidutinė kvadratinė prognozuojamo signalo paklaidos vertė priklauso ne tik nuo siunčiamo signalo galios lygio bet ir nuo signalo dažnio. Vis dėlto matavimų metu nepavyko rasti kitimo dėsningumo tarp signalo dažnio ir vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos, kadangi MSE vertės dažnio atžvilgiu yra išsidėsčiusios chaotiškai. Tikėtina, kad tokį MSE verčių pasiskirstymą dažnio atžvilgiu lemia tie patys nuo stogo paviršiaus atsispindėję ir tam tikra tvarka susisumavę siunčiamo signalo atspindžiai, kurie sukėlė RSL vertės svyravimus.

8.4 Surinktų duomenų apdorojimas ir rezultatų pateikimas

71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo matavimų metu surinkti duomenys buvo panaudoti apskaičiuojant efektyvią izotropinio spinduliavimo galią (EIRP), antenos priimamą signalo galios lygį ($RSL_{Antenos}$), laisvos erdvės nuostolius (FSL), matavimų metu buvusius realius bangų sklidimo nuostolius (PL) bei teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumą (Δ). Skaičiavimams atlikti buvo reikalingos prie E-juostos diapazono siųstuvų/įmuvų prijungtų antenų atskirties bei stiprinimo vertės, kurios pateiktos žemiau esančioje lentelėje.

19 lent. Antenų atskirties bei stiprinimo vertės

Antenų stiprinimas, dBi	38
Atstumas tarp antenų, km	0,09

Efektyvi izotropinio spinduliavimo galia buvo randama iš anksčiau nurodytos (37) formulės, kurios išraiška pateikta apačioje:

$$EIRP = TSL + G_T, \quad (37)$$

čia G_T – siųstuvo antenos stiprinimas išreikštas dBi vienetais.

Tuo tarpu antenos priimamas signalo galios lygis buvo apskaičiuojamas pagal žemiau nurodytą formulę:

$$RSL_{Antenos} = RSL - G_R, \quad (41)$$

čia G_R – įmtuvo antenos stiprinimas (dBi).

Laisvos erdvės nuostoliai įvertinami iš „Radijo ryšio bangų sklidimo modelių apžvalga“ skyrelyje pateiktos (2) formulės, o realūs bangų sklidimo nuostoliai įvertinami iš (42) išraiškos:

$$PL = EIRP - RSL_{Antenos}. \quad (42)$$

Galiausiai teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumas buvo randamas iš žemiau pateiktos išraiškos:

$$\Delta = PL - FSL. \quad (43)$$

Žemiau esančiose lentelėse nurodytos apskaičiuotos aukščiau išvardintų parametų večių priklausomybės nuo siunčiamo signalo galios lygio, kai bangos dažnis yra 71,125 GHz, 75,125 GHz, 81,125 GHz ir 85,125 GHz. Dėl didelio surinktų duomenų kiekio, tarpiniai skaičiavimų rezultatai, ties 72,125 GHz, 73,125 GHz, 74,125 GHz bei 82,125 GHz, 83,125 GHz ir 84,125 GHz, pateikti šeštame priede esančiose lentelėse.

20 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 71,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
71,125	-10	28	-85,00	-47,00	108,58	113,00	4,42
71,125	-9	29	-83,93	-45,93	108,58	112,93	4,36
71,125	-8	30	-83,00	-45,00	108,58	113,00	4,42
71,125	-7	31	-82,00	-44,00	108,58	113,00	4,42
71,125	-6	32	-81,00	-43,00	108,58	113,00	4,42
71,125	-5	33	-79,73	-41,73	108,58	112,73	4,16
71,125	-4	34	-78,00	-40,00	108,58	112,00	3,42
71,125	-3	35	-77,00	-39,00	108,58	112,00	3,42
71,125	-2	36	-76,00	-38,00	108,58	112,00	3,42
71,125	-1	37	-75,00	-37,00	108,58	112,00	3,42
71,125	0	38	-75,00	-37,00	108,58	113,00	4,42
71,125	1	39	-74,00	-36,00	108,58	113,00	4,42
71,125	2	40	-72,13	-34,13	108,58	112,13	3,56
71,125	3	41	-72,00	-34,00	108,58	113,00	4,42
71,125	4	42	-71,00	-33,00	108,58	113,00	4,42
71,125	5	43	-70,00	-32,00	108,58	113,00	4,42
71,125	6	44	-69,00	-31,00	108,58	113,00	4,42
71,125	7	45	-69,00	-31,00	108,58	114,00	5,42
71,125	8	46	-68,00	-30,00	108,58	114,00	5,42
71,125	9	47	-68,00	-30,00	108,58	115,00	6,42
71,125	10	48	-67,00	-29,00	108,58	115,00	6,42

21 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 75,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
75,125	-10	28	-85,73	-47,73	109,05	113,73	4,68
75,125	-9	29	-84,00	-46,00	109,05	113,00	3,95
75,125	-8	30	-82,00	-44,00	109,05	112,00	2,95
75,125	-7	31	-80,00	-42,00	109,05	111,00	1,95
75,125	-6	32	-79,00	-41,00	109,05	111,00	1,95
75,125	-5	33	-78,00	-40,00	109,05	111,00	1,95
75,125	-4	34	-77,00	-39,00	109,05	111,00	1,95
75,125	-3	35	-75,13	-37,13	109,05	110,13	1,08
75,125	-2	36	-74,07	-36,07	109,05	110,07	1,02
75,125	-1	37	-73,00	-35,00	109,05	110,00	0,95
75,125	0	38	-72,00	-34,00	109,05	110,00	0,95
75,125	1	39	-71,00	-33,00	109,05	110,00	0,95
75,125	2	40	-70,00	-32,00	109,05	110,00	0,95
75,125	3	41	-69,00	-31,00	109,05	110,00	0,95
75,125	4	42	-68,00	-30,00	109,05	110,00	0,95
75,125	5	43	-67,00	-29,00	109,05	110,00	0,95
75,125	6	44	-66,00	-28,00	109,05	110,00	0,95
75,125	7	45	-65,20	-27,20	109,05	110,20	1,15
75,125	8	46	-65,00	-27,00	109,05	111,00	1,95
75,125	9	47	-64,13	-26,13	109,05	111,13	2,08
75,125	10	48	-64,00	-26,00	109,05	112,00	2,95

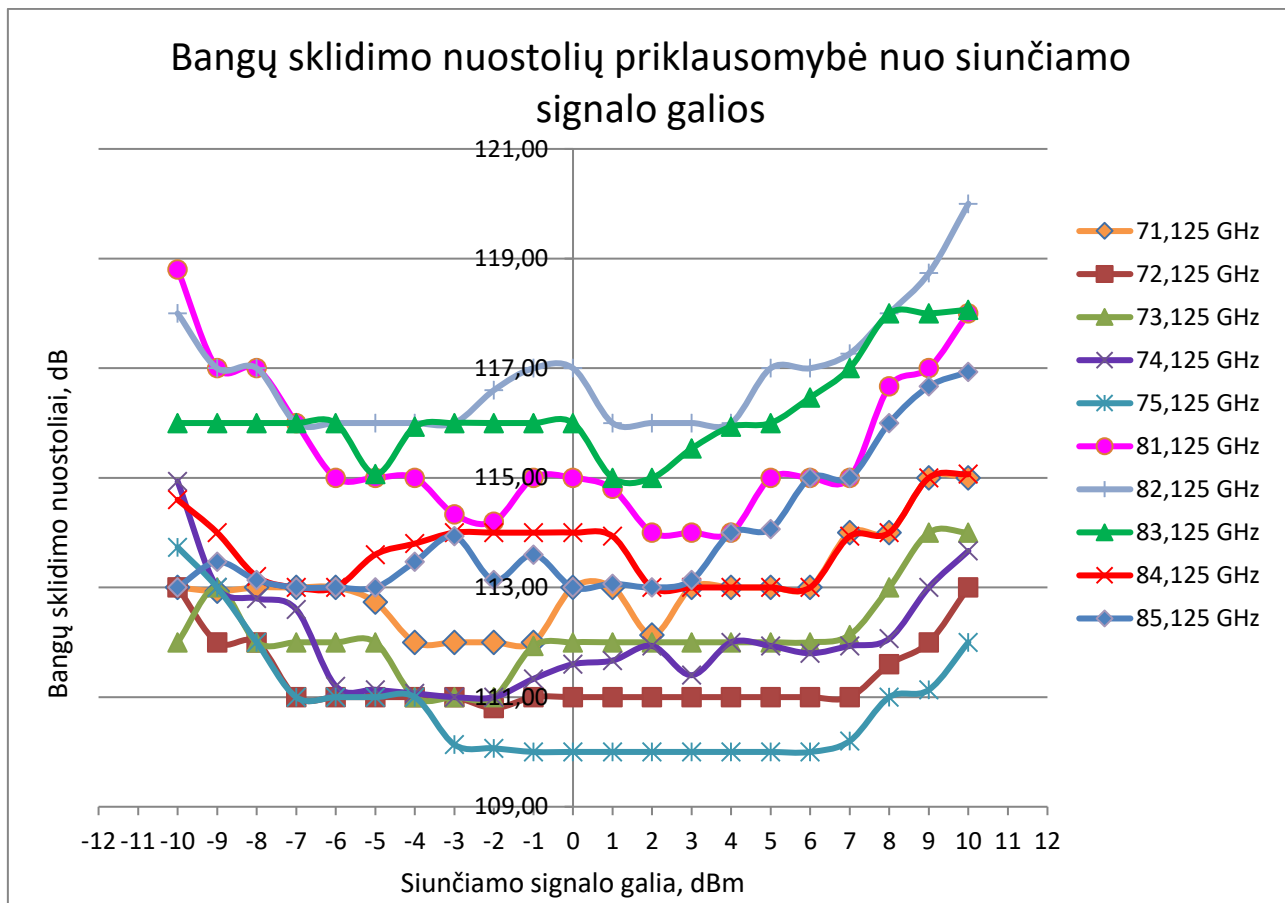
22 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 81,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
81,125	-10	28	-90,80	-52,80	109,72	118,80	9,08
81,125	-9	29	-88,00	-50,00	109,72	117,00	7,28
81,125	-8	30	-87,00	-49,00	109,72	117,00	7,28
81,125	-7	31	-85,00	-47,00	109,72	116,00	6,28
81,125	-6	32	-83,00	-45,00	109,72	115,00	5,28
81,125	-5	33	-82,00	-44,00	109,72	115,00	5,28
81,125	-4	34	-81,00	-43,00	109,72	115,00	5,28
81,125	-3	35	-79,33	-41,33	109,72	114,33	4,62
81,125	-2	36	-78,20	-40,20	109,72	114,20	4,48
81,125	-1	37	-78,00	-40,00	109,72	115,00	5,28
81,125	0	38	-77,00	-39,00	109,72	115,00	5,28
81,125	1	39	-75,80	-37,80	109,72	114,80	5,08
81,125	2	40	-74,00	-36,00	109,72	114,00	4,28
81,125	3	41	-73,00	-35,00	109,72	114,00	4,28
81,125	4	42	-72,00	-34,00	109,72	114,00	4,28
81,125	5	43	-72,00	-34,00	109,72	115,00	5,28
81,125	6	44	-71,00	-33,00	109,72	115,00	5,28
81,125	7	45	-70,00	-32,00	109,72	115,00	5,28
81,125	8	46	-70,67	-32,67	109,72	116,67	6,95
81,125	9	47	-70,00	-32,00	109,72	117,00	7,28
81,125	10	48	-70,00	-32,00	109,72	118,00	8,28

23 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 81,125 GHz

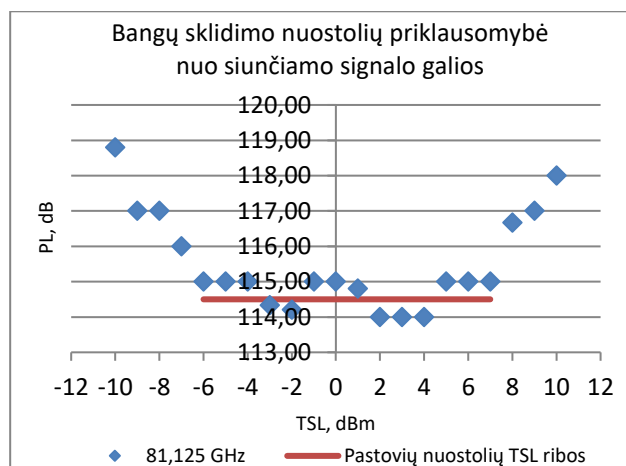
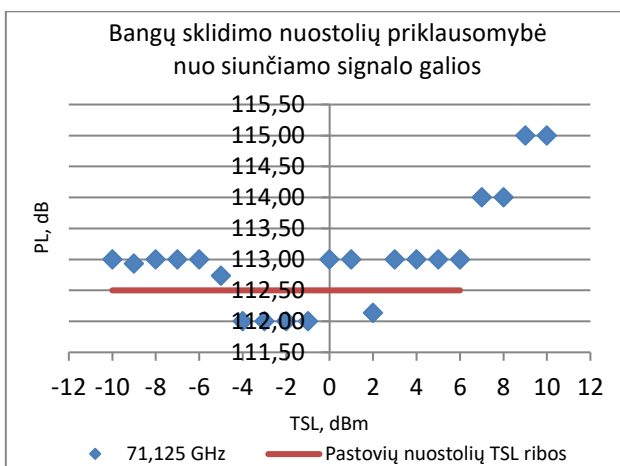
Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
85,125	-10	28	-85,00	-47,00	110,14	113,00	2,86
85,125	-9	29	-84,47	-46,47	110,14	113,47	3,33
85,125	-8	30	-83,13	-45,13	110,14	113,13	3,00
85,125	-7	31	-82,00	-44,00	110,14	113,00	2,86
85,125	-6	32	-81,00	-43,00	110,14	113,00	2,86
85,125	-5	33	-80,00	-42,00	110,14	113,00	2,86
85,125	-4	34	-79,47	-41,47	110,14	113,47	3,33
85,125	-3	35	-78,93	-40,93	110,14	113,93	3,80
85,125	-2	36	-77,13	-39,13	110,14	113,13	3,00
85,125	-1	37	-76,60	-38,60	110,14	113,60	3,46
85,125	0	38	-75,00	-37,00	110,14	113,00	2,86
85,125	1	39	-74,07	-36,07	110,14	113,07	2,93
85,125	2	40	-73,00	-35,00	110,14	113,00	2,86
85,125	3	41	-72,13	-34,13	110,14	113,13	3,00
85,125	4	42	-72,00	-34,00	110,14	114,00	3,86
85,125	5	43	-71,07	-33,07	110,14	114,07	3,93
85,125	6	44	-71,00	-33,00	110,14	115,00	4,86
85,125	7	45	-70,00	-32,00	110,14	115,00	4,86
85,125	8	46	-70,00	-32,00	110,14	116,00	5,86
85,125	9	47	-69,67	-31,67	110,14	116,67	6,53
85,125	10	48	-68,93	-30,93	110,14	116,93	6,80

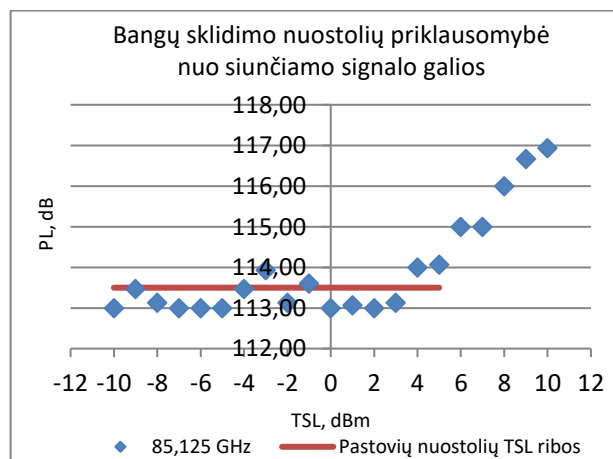
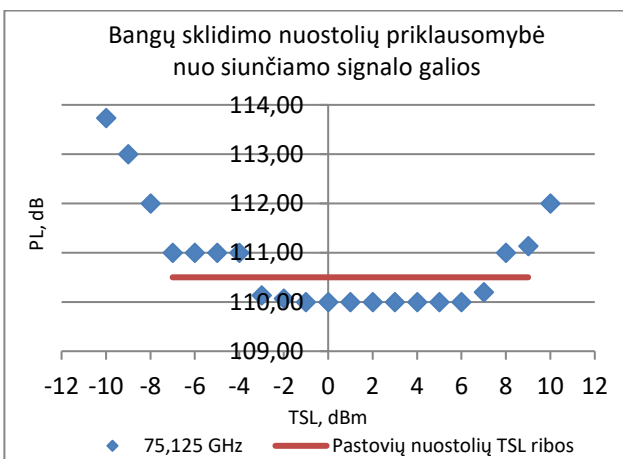
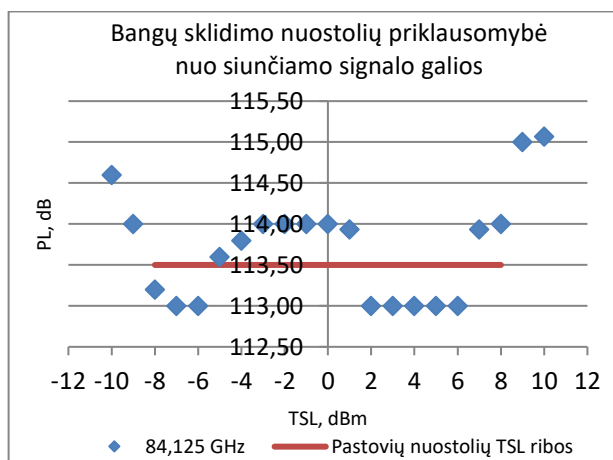
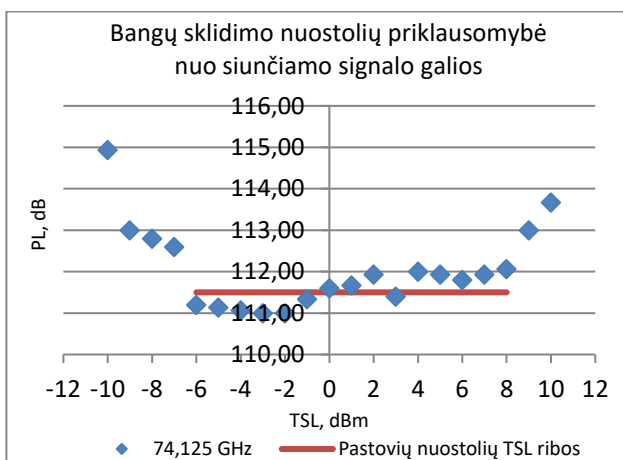
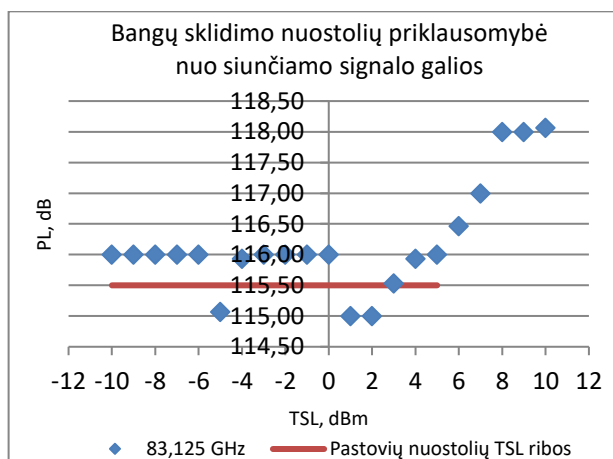
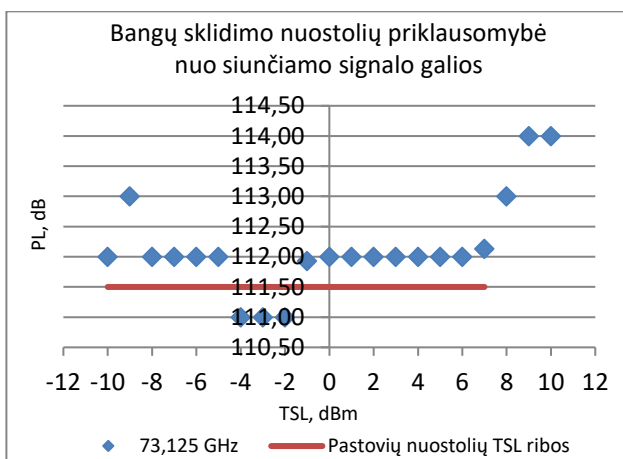
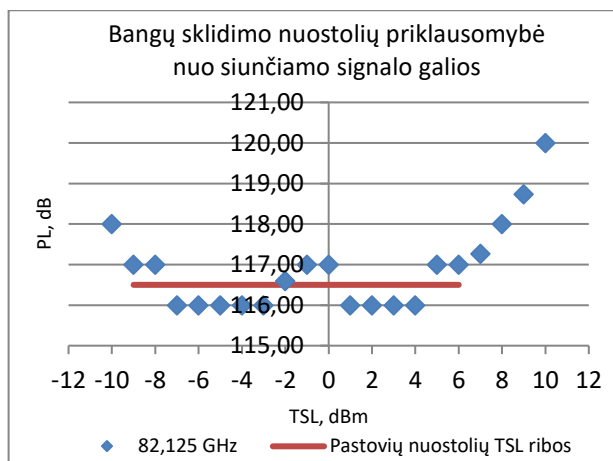
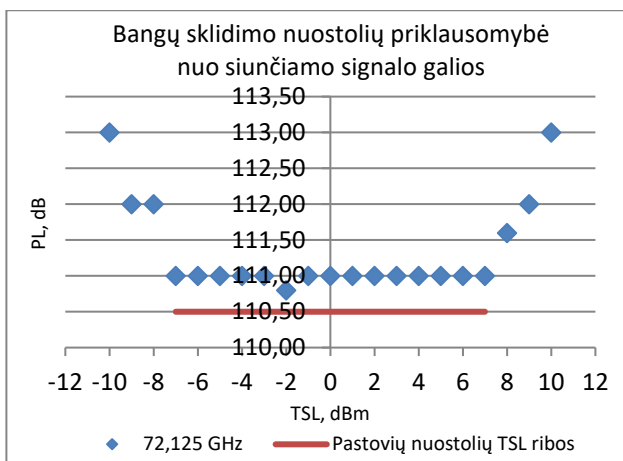
Žemiau esančiame paveikslėlyje vaizdžiau pateikta apskaičiuotų radijo bangų sklidimo nuostolių priklausomybė nuo TSL bei siunčiamo signalo dažnio, kuris 1 GHz žingsniu kinta nuo 71,125 GHz iki 75,125 GHz ir nuo 81,125 GHz iki 85,125 GHz.



34 pav. Išmatuotų bangų sklidimo nuostolių priklausomybė nuo siunčiamo signalo galios

Iš grafike pateiktos bangų sklidimo nuostolių priklausomybės nuo TSL ir signalo dažnio, galima matyti, kad nuostoliai, siunčiamo signalo galios atžvilgiu, yra pasiskirstę nevienodai. Didžiausi signalo sklidimo nuostoliai stebimi prie ribinių signalo galios verčių (-10 dBm ir 10 dBm). Žemiau esančiuose paveikslėliuose atskirai pateiktos pastovių nuostolių TSL ribos kartu su nuostolių priklausomybėmis nuo siunčiamo signalo galios ir dažnio.

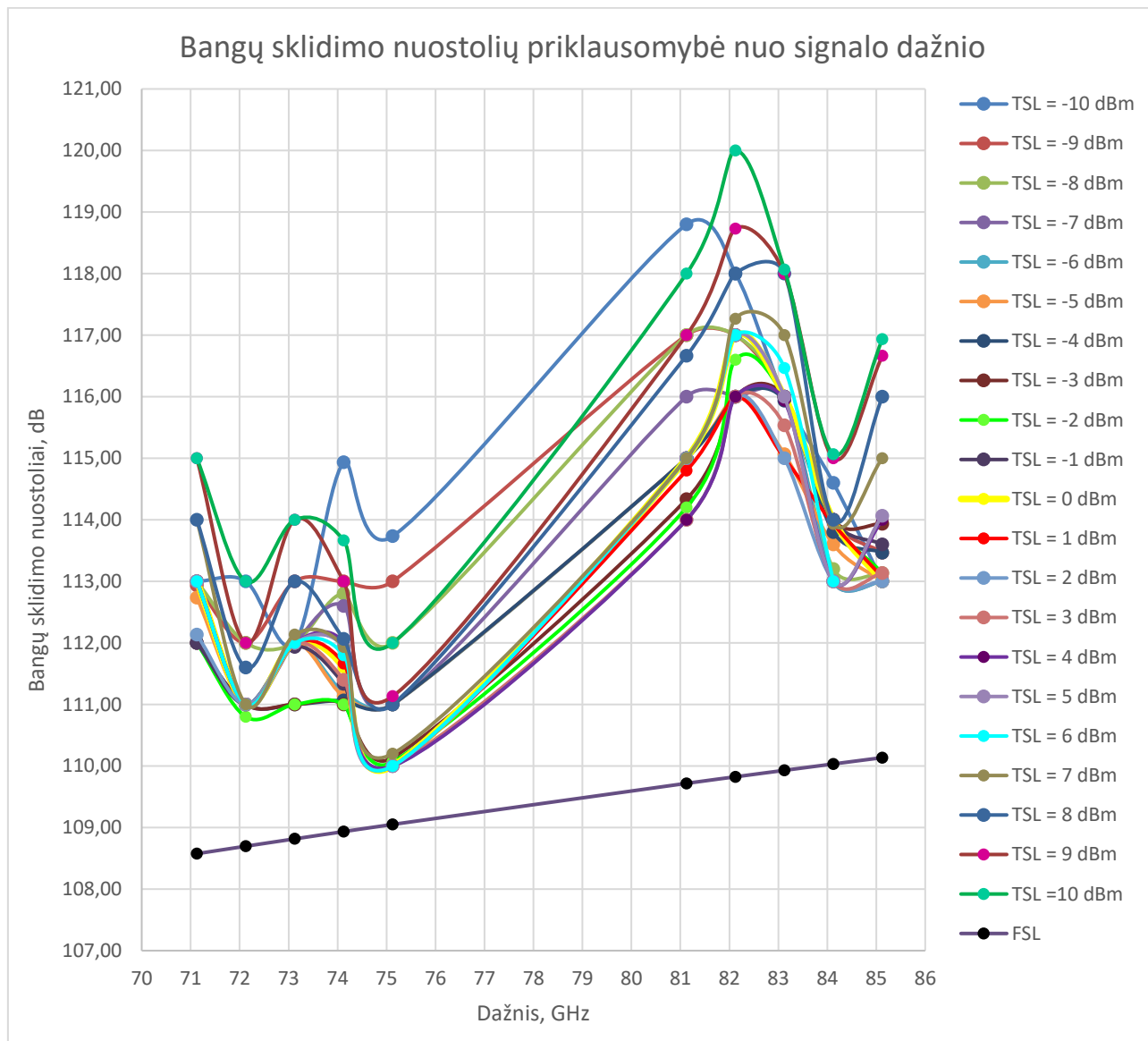




35 pav. Pastovių nuostolių TSL ribos kartu su nuostolių priklausomybėmis nuo siunčiamo signalo galios ir dažnio

Iš aukščiau pateiktų grafikų galima teigti, kad bangų sklaidimo nuostoliai yra pastovūs (kinta 1 dB ribose), kai siunčiamo signalo galia patenka į -8 – 7 dBm ruožą. Dėl nevienodo nuostolių pasiskirstymo siunčiamo signalo galios atžvilgiu, rekomenduojama nenaudoti ribinių radijo ryšio siųstuvo/imtovo spinduliuojamo signalo galios reikšmių.

Žemiau esančiame paveikslėlyje vaizdžiau pateikta apskaičiuotų radijo bangų sklaidimo nuostolių priklausomybė nuo TSL bei siunčiamo signalo dažnio, kuris 1 GHz žingsniu kinta nuo 71,125 GHz iki 75,125 GHz ir nuo 81,125 GHz iki 85,125 GHz.

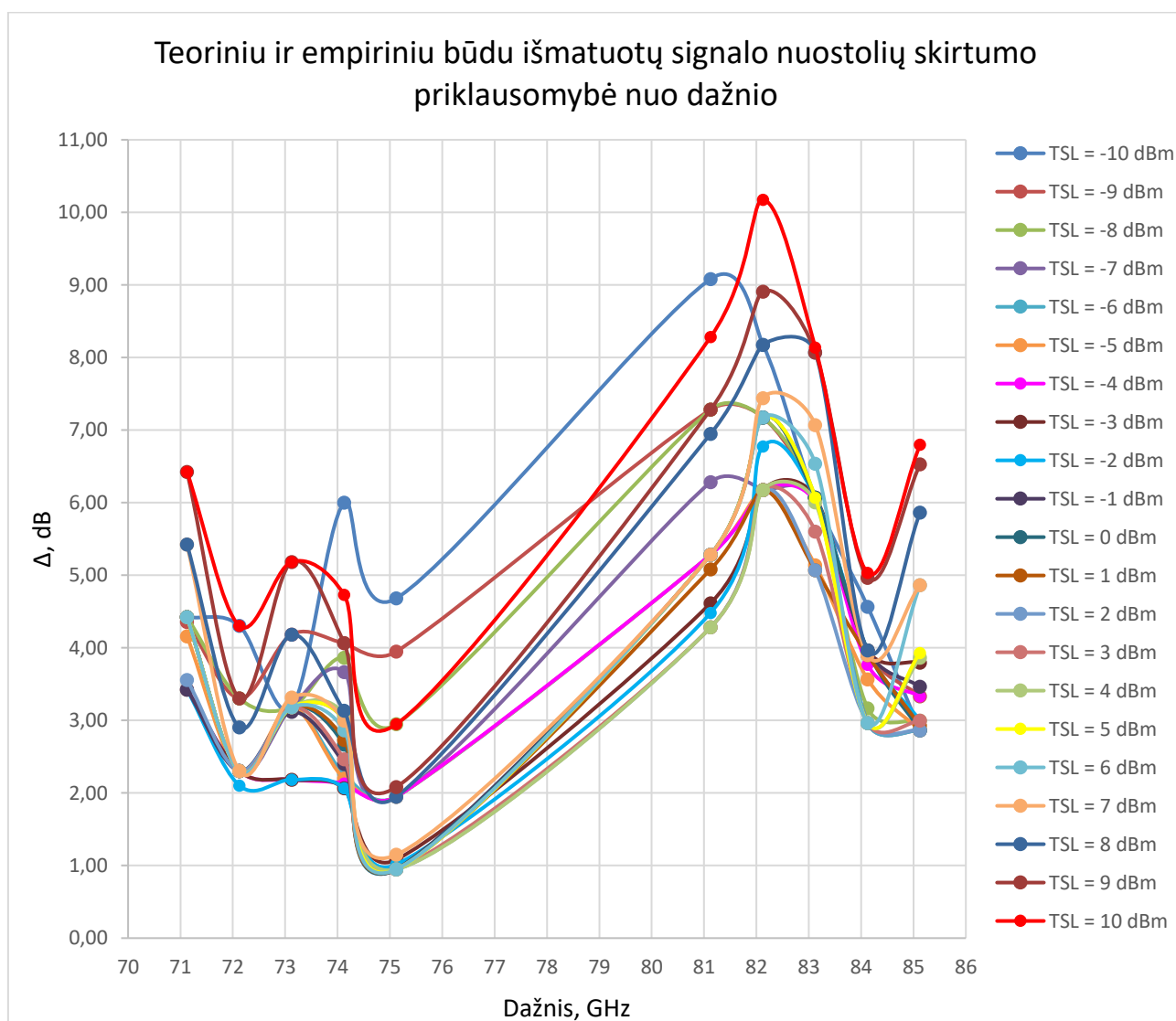


36 pav. Išmatuotų bangų sklaidimo nuostolių priklausomybė nuo siunčiamo signalo galios

Remiantis aukščiau esančiame paveikslėlyje pateikta radijo bangų sklaidimo nuostolių priklausomybe nuo TSL ir signalo dažnio, galima tvirtinti, jog nuostoliai priklauso ne tik nuo siunčiamo signalo galios lygio bet ir nuo dažnio. Didėjant signalo dažniui, grafike nežiūrima praktiškai jokia teorinė nuostolių didėjimo tendencija, atvirkščiai – 71 GHz – 72 GHz, 73 GHz – 75 GHz ir 82 GHz – 84 GHz dažnių ruožuose, stebimas nuostolių mažėjimas. Teorinių ir praktinių

rezultatų neatitikimą gali sąlygoti nuo stogo paviršiaus atsispindėję ir tam tikra tvarka susisumavę siunčiamo signalo atspindžiai. Keičiant siunčiamo signalo dažnį, keičiasi bangos ir jos atspindžių ilgis, nuo kurio priklauso imtuve išpildoma primamų radijo bangų interferencijos minimumo ar maksimumo sąlyga. Atitinkama bangų sudėtis gali lemti signalo stiprinimą, dėl kurio didėjant dažniui gali atsirasti nebūdingas nuostolių mažėjimo efektas. Norint išvengti šio nepageidaujamo signalo atspindžių interferencijos efekto, reikėtų padidinti 70/80 GHz ruože veikiančių radijo ryšio siųstuvų/imtuvų pakėlimo aukštį nuo stogo paviršiaus. Dėl siauros E-juostos siųstuvų spinduliuotės diagramos ir padidinto antenų iškėlimo aukščio, būtų gerokai sumažinama interferencijos rizika.

Žemiau esančiame paveikslėlyje vaizdžiau pateikta teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumo priklausomybė nuo signalo galios lygio bei jo dažnio.



37 pav. Teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumo priklausomybė nuo dažnio

Didžiausi teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumai matomi ties 71 GHz, 73 GHz, 83 GHz ir 85 GHz, t.y. tuose dažniuose, kuriuose buvo stebimas aukščiau aptartas nebūdingas nuostolių mažėjimo efektas.

Toliau matavimų metu gauti realūs bangų sklaidimo nuostoliai buvo lyginami su anksčiau minėto logaritminio atstumo nuostolius įvertinančio modelio rezultatais. Teorinių ir empirinių rezultatų lyginimas buvo atliekamas keičiant bangos sklaidimo kelio nuostolių eksponentės vertę, kuri žemiau pateiktoje matematinėje išraiškoje pažymėta n raide.

$$PL(d) = PL_{FSL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (7)$$

Keičiant n parametro vertę buvo stebima matavimų metu gautų ir logaritminiu atstumo nuostolius įvertinančiu modeliu apskaičiuotų bangų sklaidimo nuostolių paklaida išreikšta procentais. Žemiau esančiose lentelėse pateiktos matavimų metu nustatytos ir vėliau teoriniu būdu apskaičiuotos bangų sklaidimo nuostolių vertės, jų tarpusavio skirtumas, procentais išreikštas santykis bei jo vidurkis ir dispersija, kai siunčiamo signalo dažnis yra 71,125 GHz, 75,125 GHz, 81,125 GHz ir 85,125 GHz. Dėl matavimų metu surinkto didelio duomenų kiekio, tarpiniai skaičiavimų rezultatai, ties 72,125 GHz, 73,125 GHz, 74,125 GHz bei 82,125 GHz, 83,125 GHz ir 84,125 GHz, pateikti septintame priede esančiose lentelėse.

24 lent. Apskaičiuotos parametų vertės, kai signalo dažnis 71,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
71,125	-10	113,00	112,48	0,52	0,46	0,69
71,125	-9	112,93	112,48	0,45	0,40	σ , %
71,125	-8	113,00	112,48	0,52	0,46	0,33
71,125	-7	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	-6	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	-5	112,73	112,48	0,25	0,22	
71,125	-4	112,00	112,48	-0,48	0,43	
71,125	-3	112,00	112,48	-0,48	0,43	
71,125	-2	112,00	112,48	-0,48	0,43	
71,125	-1	112,00	112,48	-0,48	0,43	
71,125	0	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	1	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	2	112,13	112,48	-0,35	0,31	
71,125	3	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	4	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	5	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	6	113,00	112,48	0,52	0,46	
71,125	7	114,00	112,48	1,52	1,35	
71,125	8	114,00	112,48	1,52	1,35	
71,125	9	115,00	112,48	2,52	2,24	
71,125	10	115,00	112,48	2,52	2,24	

25 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 75,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
75,125	-10	113,73	111,00	2,73	2,46	0,75
75,125	-9	113,00	111,00	2,00	1,80	σ , %
75,125	-8	112,00	111,00	1,00	0,90	0,35
75,125	-7	111,00	111,00	0,00	0,00	
75,125	-6	111,00	111,00	0,00	0,00	
75,125	-5	111,00	111,00	0,00	0,00	
75,125	-4	111,00	111,00	0,00	0,00	
75,125	-3	110,13	111,00	-0,87	0,79	
75,125	-2	110,07	111,00	-0,94	0,85	
75,125	-1	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	0	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	1	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	2	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	3	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	4	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	5	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	6	110,00	111,00	-1,00	0,91	
75,125	7	110,20	111,00	-0,80	0,72	
75,125	8	111,00	111,00	0,00	0,00	
75,125	9	111,13	111,00	0,13	0,12	
75,125	10	112,00	111,00	1,00	0,90	

26 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 81,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
81,125	-10	118,80	115,58	3,22	2,79	1,00
81,125	-9	117,00	115,58	1,42	1,23	σ , %
81,125	-8	117,00	115,58	1,42	1,23	0,36
81,125	-7	116,00	115,58	0,42	0,36	
81,125	-6	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	-5	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	-4	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	-3	114,33	115,58	-1,25	1,08	
81,125	-2	114,20	115,58	-1,38	1,19	
81,125	-1	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	0	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	1	114,80	115,58	-0,78	0,68	
81,125	2	114,00	115,58	-1,58	1,37	
81,125	3	114,00	115,58	-1,58	1,37	
81,125	4	114,00	115,58	-1,58	1,37	
81,125	5	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	6	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	7	115,00	115,58	-0,58	0,50	
81,125	8	116,67	115,58	1,09	0,94	
81,125	9	117,00	115,58	1,42	1,23	
81,125	10	118,00	115,58	2,42	2,09	

27 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 85,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
85,125	-10	113,00	114,04	-1,04	0,92	0,88
85,125	-9	113,47	114,04	-0,58	0,51	σ , %
85,125	-8	113,13	114,04	-0,91	0,80	0,38
85,125	-7	113,00	114,04	-1,04	0,92	
85,125	-6	113,00	114,04	-1,04	0,92	
85,125	-5	113,00	114,04	-1,04	0,92	
85,125	-4	113,47	114,04	-0,58	0,51	
85,125	-3	113,93	114,04	-0,11	0,10	
85,125	-2	113,13	114,04	-0,91	0,80	
85,125	-1	113,60	114,04	-0,44	0,39	
85,125	0	113,00	114,04	-1,04	0,92	
85,125	1	113,07	114,04	-0,98	0,86	
85,125	2	113,00	114,04	-1,04	0,92	
85,125	3	113,13	114,04	-0,91	0,80	
85,125	4	114,00	114,04	-0,04	0,04	
85,125	5	114,07	114,04	0,02	0,02	
85,125	6	115,00	114,04	0,96	0,84	
85,125	7	115,00	114,04	0,96	0,84	
85,125	8	116,00	114,04	1,96	1,71	
85,125	9	116,67	114,04	2,62	2,30	
85,125	10	116,93	114,04	2,89	2,53	

Iš aukščiau pateiktų lentelių su apskaičiuotomis teorinių ir empirinių nuostolių rezultatu paklaidomis galima teigti jog, matavimų metu gautų ir vėliau teoriškai apskaičiuotų bangos sklaidimo nuostolių paklaida ties E-juostos diapazonu neviršija 1 procento. Tai rodo, kad logaritminis atstumo nuostolius įvertinantis modelis gali būti puikiai pritaikytas, įvertinant realius 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklaidimo nuostolius erdvėje. Vis dėlto tiksliam nuostolių įvertinimui yra reikalingos bangos sklaidimo kelio nuostolių eksponentės vertės. Žemiau esančioje lentelėje pateiktos darbo metu, prie E-juostos diapazono dažnių, nustatytos bangos sklaidimo kelio nuostolių eksponentės vertės bei jų vidurkis ir dispersija.

28 lent. Darbo metu nustatytos bangų sklaidimo kelio nuostolių eksponentės vertės

Dažnis, GHz	n	n vidurkis	n vidurkio σ
71,125	2,2	2,2	0,01
72,125	2,1		
73,125	2,2		
74,125	2,2		
75,125	2,1		
81,125	2,3		
82,125	2,4		
83,125	2,3		
84,125	2,2		
85,125	2,2		

Žemiau esančiame paveikslėlyje vaizdžiau pateikta aukščiau esančioje lentelėje nurodyta bangų sklidimo nuostolių eksponentės priklausomybė nuo signalo dažnio.



38 pav. Teoriniu ir empiriniu būdu išmatuotų signalo nuostolių skirtumo priklausomybė nuo dažnio

Kaip matyti iš aukščiau esančioje lentelėje nurodytos ir grafike pateiktos bangų sklidimo kelio nuostolių eksponentės priklausomybės nuo signalo dažnio, 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazone n parametro vidutinė reikšmė yra lygi 2,2. Dėl itin mažos vidutinės bangų sklidimo kelio nuostolių eksponentės dispersijos galima teigti, kad E-juostos ruožo bangų sklidimo nuostoliams prognozuoti, taikant logaritminį atstumo nuostolius įvertinantį modelį, nuostolių eksponentė prilyginama 2,2.

Išvados ir pasiūlymai

1. E-juostai priklausančios radijo ryšio sistemos, lyginant su žemesniame dažnių diapazone veikiančiomis mikrobangėmis sistemomis, siūlo didesnę duomenų perdavimo spartą, mažesnę interferencijos riziką ir lengvesnę bei pigesnę licencijavimą.
2. E-juostos plačiajuosčio ryšio sistemų taikymo sritys remiasi aukšta duomenų perdavimo sparta, greitu įrangos įdiegimu bei ribota laidinės infrastruktūros aprėptimi.
3. Nuolatos laike kintančios hidrometeorologinės oro sąlygos apsunkina atlikti tikslius radijo bangų sklidimą įvertinančius matavimus.
4. Priimamo signalo galia, didėjant siunčiamo signalo galiai, didėja, o vidutinė kvadratinė prognozuojamo signalo paklaida – mažėja.
5. Siunčiamo signalo galios didinimas vis mažiau įtakoja priimamo signalo galios lygio ir vidutinės kvadratinės prognozuojamo signalo paklaidos vertę.
6. Didžiausi signalo sklidimo nuostoliai stebimi prie ribinių siųstuvo galios verčių (-10 dBm ir 10 dBm).
7. Bangų sklidimo nuostoliai yra pastovūs (kinta 1 dB ribose), kai siunčiamo signalo galia patenka į -8 – 7 dBm ruožą.
8. Praktiniai bangų sklidimo nuostolių rezultatai neatitinka teorinių; dėl siunčiamo signalo atspindžių 71 – 72 GHz, 73 – 75 GHz ir 82 – 84 GHz ruožuose matomas (1 – 5 dBm) nuostolių mažėjimas.
9. E-juostos diapazone stebimas stiprus siunčiamo signalo atspindžių interferencijos efektas.
10. Logaritminis atstumo nuostolius įvertinantis modelis puikiai tinka realių 71 – 76 GHz ir 81 – 86 GHz diapazono radijo bangų sklidimo nuostolių prognozavimui.
11. E-juostos ruožo bangų sklidimo nuostoliams prognozuoti, taikant logaritminį atstumo nuostolius įvertinantį modelį, buvo nusatyta nuostolių eksponentės vertė, kuri yra lygi 2,2.

Pasiūlymai:

1. Dėl nuolatos laike kintančių hidrometeorologinių oro sąlygų, radijo bangų sklaidimo tyrimus vertėtų atlikti kontroliuojamų hidrometeorologinių parametrų aplinkoje.
2. Dėl mažėjančios siunčiamo signalo galios įtakos vidutinei kvadratinei prognozuojamo signalo paklaidai bei priimamo signalo galios lygiui, reikėtų naudoti žemesnes E-juostos siųstuvų galias, prie kurių būtų užtikrinamas toleruojamas klaidingų bitų santykis.
3. Dėl nevienodo nuostolių pasiskirstymo siunčiamo signalo galios atžvilgiu, rekomenduojama nenaudoti ribinių radijo ryšio siųstuvo/imtovo spinduliuojamo signalo galios reikšmių.
4. Norint išvengti nepageidaujamo signalo atspindžių interferencijos efekto, reikėtų padidinti 70/80 GHz ruože veikiančių radijo ryšio siųstuvų/imtuvų pakėlimo aukštį nuo stogo paviršiaus.

Informacinių šaltinių sąrašas

1. E-band and V-band – survey on status of worldwide regulation. [žiūrėta 2016-03-05]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/ImtX4F>
2. Radijo dažnių planavimas ir valdymas. [žiūrėta 2016-03-05]. Prieiga per internetą <http://www.rrt.lt/lt/verslui/istekliai/radijo-dazniai/dazniu-valdymas.html>
3. Millimetre wave transmission. [žiūrėta 2016-03-05]. Prieiga per internetą <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/millimetre-wave-transmission>
4. Millimetre wave research in the nineteenth century. [žiūrėta 2016-03-07]. Prieiga per internetą https://www.cv.nrao.edu/~demerson/bose/emerson_delhi.pdf
5. Understanding millimeter wave wireless communication. [žiūrėta 2016-03-08]. Prieiga per internetą http://www.loecom.com/pdf%20files/L1104-WP_Understanding%20MMWCom.pdf
6. E-band technology. [žiūrėta 2016-03-09]. Prieiga per internetą <https://www.e-band.com/index.php?id=86>
7. The benefits of E-band systems over other wireless technologies. [žiūrėta 2016-03-12]. Prieiga per internetą <http://www.e-band.com/get.php?f.850>
8. E-band radio. [žiūrėta 2016-03-09]. Prieiga per internetą <http://www.bangladeshtelecom.com/2012/01/what-is-e-band-radio.html>
9. Second-generation E-band solutions: Opportunities for carrier-class LTE backhaul. [žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą <http://www.huawei.com/de/static/HW-206551.pdf>
10. The advantages of E-band wireless systems in mobile backhaul applications. [žiūrėta 2016-03-09]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/BYNwXI>
11. LTE overview. [žiūrėta 2016-03-25]. Prieiga per internetą <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
12. LTE-Advanced. [žiūrėta 2016-03-27]. Prieiga per internetą <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
13. Distributed antenna system. [žiūrėta 2016-04-19]. Prieiga per internetą <http://www.landmarkdividend.com/what-is-a-das-system/>
14. Multi-gigabit microwave and millimeter-wave wireless communications. [žiūrėta 2016-04-23]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/ZDQXeV>
15. Connection redundancy. [žiūrėta 2016-04-30]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/D4p3Rb>

16. Planning of the 71-76 GHz and 81-86 GHz bands for millimetre wave high capacity fixed link technology. [žiūrėta 2016-05-07]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/c0VG8i>
17. Engineering applications of neural networks. [žiūrėta 2016-05-14]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/DTHbU9>
18. Enabling technologies for multi-gigabit wireless communication in the E-band. [žiūrėta 2016-05-20]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/bGgzNI>
19. Multi-gigabit wireless communication technology in the E-band. [žiūrėta 2016-05-26]. Prieiga per internetą <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5172438&tag=1>
20. Atmospheric attenuation in wireless communication systems at millimeter and THz frequencies. [žiūrėta 2017-02-08]. Prieiga per internetą <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7061628&tag=1>
21. The water cycle: water storage in the atmosphere. [žiūrėta 2017-02-15]. Prieiga per internetą <https://water.usgs.gov/edu/watercycleatmosphere.html>
22. Atmospheric attenuation due to humidity. [žiūrėta 2017-02-19]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/RrbyLr>
23. The influence of fog on the propagation of the electromagnetic waves under Lithuanian climate conditions. [žiūrėta 2017-02-23]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/Kv2YlJ>
24. Calculation of free-space attenuation. [žiūrėta 2017-02-28]. Prieiga per internetą <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/en>
25. Characterization and modeling of large-scale fading for radio propagation in Rwanda. [žiūrėta 2017-03-02]. Prieiga per internetą http://file.scirp.org/pdf/CN_2016022911455146.pdf
26. Attenuation by atmospheric gases. [žiūrėta 2017-03-07]. Prieiga per internetą <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en>
27. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. [žiūrėta 2017-03-12]. Prieiga per internetą <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en>
28. Attenuation due to clouds and fog. [žiūrėta 2017-03-14]. Prieiga per internetą <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840-6-201309-I/en>
29. How to calculate MSE. [žiūrėta 2017-03-19]. Prieiga per internetą <http://sciencing.com/calculate-mse-8464173.html>
30. BER bit error rate tutorial and definition. [žiūrėta 2017-03-20]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/f72Sf6>
31. Packet loss rate. [žiūrėta 2017-03-20]. Prieiga per internetą <https://networkengineering.stackexchange.com/questions/7353/what-is-packet-loss-rate>

32. Understanding ITU-T error performance recommendations. [žiūrėta 2017-03-02].
Prieiga per internetą <https://goo.gl/zhZp54>
33. Unavailable seconds. [žiūrėta 2017-03-21]. Prieiga per internetą
<http://support.netrounds.com/hc/en-us/articles/201966337-Unavailable-Seconds-UAS->

Paveikslėlių šaltiniai:

1. Elektromagnetinių bangų spektras. [žiūrėta 2016-03-05]. Prieiga per internetą
<https://goo.gl/XxaIKZ>
2. Kanalų paskirstymas 71 – 76 ir 81 – 86 GHz diapazonuose. [žiūrėta 2016-03-05]. Prieiga per internetą <http://www.etsi.org/technologies-clusters/white-papers-and-brochures/etsi-white-papers>
3. J.C. Bose demonstruoja milimetrines bangas. [žiūrėta 2016-03-07]. Prieiga per internetą
<https://www.cv.nrao.edu/~demerson/bose/boserscc.jpg>
4. Didžiausi leistini kanalų pločiai 6 – 38 ir 71 – 86 GHz diapazonuose. [žiūrėta 2016-03-09]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/TFY43L>
5. Tradicinių ir milimetrinių radijo ryšio sistemų spinduliavimo diagramos. [žiūrėta 2016-03-08]. Prieiga per internetą http://www.loecom.com/pdf%20files/L1104-WP_Understanding%20MMWCom.pdf
6. Pasaulinis E-juostos prieinamumas. [žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą
<http://www.etsi.org/technologies-clusters/white-papers-and-brochures/etsi-white-papers>
7. Transportinis tinklas paremtas belaidžio ryšio technologija. [žiūrėta 2016-03-25]. Prieiga per internetą <https://www.trangosys.com/solutions/mobile-networks/>
8. LTE Advanced kanalų apjungimas. [žiūrėta 2016-03-27]. Prieiga per internetą
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
9. Lietuvos šviesolaidinio tinklo infrastruktūra. [žiūrėta 2016-03-27]. Prieiga per internetą
<https://goo.gl/GkkWt1>
10. DAS realizacija optinėmis ir 70/80 GHz diapazono radijo ryšio sistemomis. [žiūrėta 2016-04-19]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/ZDQXeV>
11. Tinklo rezervavimas naudojant radijo ryšio sistemą. [žiūrėta 2016-04-30]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/eYldzA>
12. Atskirų pastatų apjungimas 70/80 GHz diapazono mikrobangėmis sistemomis. [žiūrėta 2016-05-07]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/eYldzA>
13. Pastato prijungimas prie teritorinio šviesolaidinio tinklo žiedo naudojant E-juostos ruožo mikrobangę sistemą. [žiūrėta 2016-05-14]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/eYldzA>

14. Supaprastinta E-juostos ruože veikiančios sistemos blokinė diagrama. [žiūrėta 2016-05-26]. Prieiga per internetą <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5172438>
15. Sąveika tarp ore esančių molekulių ir elektromagnetinės spinduliuotės. [žiūrėta 2017-02-08]. Prieiga per internetą <http://www.mike-willis.com/Tutorial/gases.htm>
16. Elektromagnetinės bangos jėgos laukų vektoriai. [žiūrėta 2017-02-19]. Prieiga per internetą <https://www.wonderwhizkids.com/conceptmaps/EM-Radiation.html>
17. Meteorologinių vandens darinių matmenys. [žiūrėta 2017-02-19]. Prieiga per internetą <https://goo.gl/TpQDxf>
18. Atmosferos dujų įtakojamas, elektromagnetinių bangų iki 350 GHz, slopinimas. [žiūrėta 2017-03-07]. Prieiga per internetą https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-E.pdf
19. k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų priklausomybės nuo dažnio. [žiūrėta 2017-03-12]. Prieiga per internetą https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf
20. Paslaugų prieinamumo/neprieinamumo būsenų kaita. [žiūrėta 2017-03-21]. Prieiga per internetą <http://support.netrounds.com/hc/en-us/articles/201966337-Unavailable-Seconds-UAS->

Priedai

1 priedas. Spektroskopiniai duomenys deguonies slopinimui apskaičiuoti

29 lent. Spektroskopiniai duomenys deguonies slopinimui apskaičiuoti

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50.474214	0.975	9.651	6.690	0.0	2.566	6.850
50.987745	2.529	8.653	7.170	0.0	2.246	6.800
51.503360	6.193	7.709	7.640	0.0	1.947	6.729
52.021429	14.320	6.819	8.110	0.0	1.667	6.640
52.542418	31.240	5.983	8.580	0.0	1.388	6.526
53.066934	64.290	5.201	9.060	0.0	1.349	6.206
53.595775	124.600	4.474	9.550	0.0	2.227	5.085
54.130025	227.300	3.800	9.960	0.0	3.170	3.750
54.671180	389.700	3.182	10.370	0.0	3.558	2.654
55.221384	627.100	2.618	10.890	0.0	2.560	2.952
55.783815	945.300	2.109	11.340	0.0	-1.172	6.135
56.264774	543.400	0.014	17.030	0.0	3.525	-0.978
56.363399	1331.800	1.654	11.890	0.0	-2.378	6.547
56.968211	1746.600	1.255	12.230	0.0	-3.545	6.451
57.612486	2120.100	0.910	12.620	0.0	-5.416	6.056
58.323877	2363.700	0.621	12.950	0.0	-1.932	0.436
58.446588	1442.100	0.083	14.910	0.0	6.768	-1.273
59.164204	2379.900	0.387	13.530	0.0	-6.561	2.309
59.590983	2090.700	0.207	14.080	0.0	6.957	-0.776
60.306056	2103.400	0.207	14.150	0.0	-6.395	0.699
60.434778	2438.000	0.386	13.390	0.0	6.342	-2.825
61.150562	2479.500	0.621	12.920	0.0	1.014	-0.584
61.800158	2275.900	0.910	12.630	0.0	5.014	-6.619
62.411220	1915.400	1.255	12.170	0.0	3.029	-6.759
62.486253	1503.000	0.083	15.130	0.0	-4.499	0.844
62.997984	1490.200	1.654	11.740	0.0	1.856	-6.675
63.568526	1078.000	2.108	11.340	0.0	0.658	-6.139
64.127775	728.700	2.617	10.880	0.0	-3.036	-2.895
64.678910	461.300	3.181	10.380	0.0	-3.968	-2.590
65.224078	274.000	3.800	9.960	0.0	-3.528	-3.680
65.764779	153.000	4.473	9.550	0.0	-2.548	-5.002
66.302096	80.400	5.200	9.060	0.0	-1.660	-6.091
66.836834	39.800	5.982	8.580	0.0	-1.680	-6.393
67.369601	18.560	6.818	8.110	0.0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.640	0.0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.170	0.0	-2.492	-6.600

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
68.960312	1.334	9.650	6.690	0.0	-2.773	-6.650
118.750334	940.300	0.010	16.640	0.0	-0.439	0.079
368.498246	67.400	0.048	16.400	0.0	0.000	0.000
424.763020	637.700	0.044	16.400	0.0	0.000	0.000
487.249273	237.400	0.049	16.000	0.0	0.000	0.000
715.392902	98.100	0.145	16.000	0.0	0.000	0.000
773.839490	572.300	0.141	16.200	0.0	0.000	0.000
834.145546	183.100	0.145	14.700	0.0	0.000	0.000

2 priedas. Spektroskopiniai duomenys vandens garų slopinimui apskaičiuoti

30 lent. Spektroskopiniai duomenys vandens garų slopinimui apskaičiuoti

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
*22.235080	0.1079	2.144	26.38	0.76	5.087	1.00
67.803960	0.0011	8.732	28.58	0.69	4.930	0.82
119.995940	0.0007	8.353	29.48	0.70	4.780	0.79
*183.310087	2.273	0.668	29.06	0.77	5.022	0.85
*321.225630	0.0470	6.179	24.04	0.67	4.398	0.54
*325.152888	1.514	1.541	28.23	0.64	4.893	0.74
336.227764	0.0010	9.825	26.93	0.69	4.740	0.61
*380.197353	11.67	1.048	28.11	0.54	5.063	0.89
390.134508	0.0045	7.347	21.52	0.63	4.810	0.55
437.346667	0.0632	5.048	18.45	0.60	4.230	0.48
439.150807	0.9098	3.595	20.07	0.63	4.483	0.52
443.018343	0.1920	5.048	15.55	0.60	5.083	0.50
*448.001085	10.41	1.405	25.64	0.66	5.028	0.67
470.888999	0.3254	3.597	21.34	0.66	4.506	0.65
474.689092	1.260	2.379	23.20	0.65	4.804	0.64
488.490108	0.2529	2.852	25.86	0.69	5.201	0.72
503.568532	0.0372	6.731	16.12	0.61	3.980	0.43
504.482692	0.0124	6.731	16.12	0.61	4.010	0.45
547.676440	0.9785	0.158	26.00	0.70	4.500	1.00
552.020960	0.1840	0.158	26.00	0.70	4.500	1.00
*556.935985	497.0	0.159	30.86	0.69	4.552	1.00
620.700807	5.015	2.391	24.38	0.71	4.856	0.68
645.766085	0.0067	8.633	18.00	0.60	4.000	0.50
658.005280	0.2732	7.816	32.10	0.69	4.140	1.00
*752.033113	243.4	0.396	30.86	0.68	4.352	0.84
841.051732	0.0134	8.177	15.90	0.33	5.760	0.45
859.965698	0.1325	8.055	30.60	0.68	4.090	0.84
899.303175	0.0547	7.914	29.85	0.68	4.530	0.90

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
902.611085	0.0386	8.429	28.65	0.70	5.100	0.95
906.205957	0.1836	5.110	24.08	0.70	4.700	0.53
916.171582	8.400	1.441	26.73	0.70	5.150	0.78
923.112692	0.0079	10.293	29.00	0.70	5.000	0.80
970.315022	9.009	1.919	25.50	0.64	4.940	0.67
987.926764	134.6	0.257	29.85	0.68	4.550	0.90
*1 780.000000	17506.0	0.952	196.3	2.00	24.15	5.00

3 priedas. k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų dydžiai prie fiksuoto bangos dažnio

31 lent. k_H , α_H , k_V , α_V koeficientų dydžiai prie fiksuoto bangos dažnio

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8592
1.5	0.0000443	1.0185	0.0000574	0.8957
2	0.0000847	1.0664	0.0000998	0.9490
2.5	0.0001321	1.1209	0.0001464	1.0085
3	0.0001390	1.2322	0.0001942	1.0688
3.5	0.0001155	1.4189	0.0002346	1.1387
4	0.0001071	1.6009	0.0002461	1.2476
4.5	0.0001340	1.6948	0.0002347	1.3987
5	0.0002162	1.6969	0.0002428	1.5317
5.5	0.0003909	1.6499	0.0003115	1.5882
6	0.0007056	1.5900	0.0004878	1.5728
7	0.001915	1.4810	0.001425	1.4745
8	0.004115	1.3905	0.003450	1.3797
9	0.007535	1.3155	0.006691	1.2895
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
11	0.01772	1.2140	0.01731	1.1617
12	0.02386	1.1825	0.02455	1.1216
13	0.03041	1.1586	0.03266	1.0901
14	0.03738	1.1396	0.04126	1.0646
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.0440
16	0.05282	1.1086	0.05899	1.0273
17	0.06146	1.0949	0.06797	1.0137
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025
19	0.08084	1.0691	0.08642	0.9930
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
23	0.1286	1.0214	0.1284	0.9630

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
31	0.2588	0.9392	0.2465	0.9055
32	0.2778	0.9302	0.2646	0.8981
33	0.2972	0.9214	0.2833	0.8907
34	0.3171	0.9129	0.3026	0.8834
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761
36	0.3580	0.8967	0.3427	0.8690
37	0.3789	0.8890	0.3633	0.8621
38	0.4001	0.8816	0.3844	0.8552
39	0.4215	0.8743	0.4058	0.8486
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
41	0.4647	0.8605	0.4492	0.8357
42	0.4865	0.8539	0.4712	0.8296
43	0.5084	0.8476	0.4932	0.8236
44	0.5302	0.8414	0.5153	0.8179
45	0.5521	0.8355	0.5375	0.8123
46	0.5738	0.8297	0.5596	0.8069
47	0.5956	0.8241	0.5817	0.8017
48	0.6172	0.8187	0.6037	0.7967
49	0.6386	0.8134	0.6255	0.7918
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871
51	0.6811	0.8034	0.6687	0.7826
52	0.7020	0.7987	0.6901	0.7783
53	0.7228	0.7941	0.7112	0.7741
54	0.7433	0.7896	0.7321	0.7700
55	0.7635	0.7853	0.7527	0.7661
56	0.7835	0.7811	0.7730	0.7623
57	0.8032	0.7771	0.7931	0.7587
58	0.8226	0.7731	0.8129	0.7552
59	0.8418	0.7693	0.8324	0.7518
60	0.8606	0.7656	0.8515	0.7486
61	0.8791	0.7621	0.8704	0.7454
62	0.8974	0.7586	0.8889	0.7424
63	0.9153	0.7552	0.9071	0.7395

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
64	0.9328	0.7520	0.9250	0.7366
65	0.9501	0.7488	0.9425	0.7339
66	0.9670	0.7458	0.9598	0.7313
67	0.9836	0.7428	0.9767	0.7287
68	0.9999	0.7400	0.9932	0.7262
69	1.0159	0.7372	1.0094	0.7238
70	1.0315	0.7345	1.0253	0.7215
71	1.0468	0.7318	1.0409	0.7193
72	1.0618	0.7293	1.0561	0.7171
73	1.0764	0.7268	1.0711	0.7150
74	1.0908	0.7244	1.0857	0.7130
75	1.1048	0.7221	1.1000	0.7110
76	1.1185	0.7199	1.1139	0.7091
77	1.1320	0.7177	1.1276	0.7073
78	1.1451	0.7156	1.1410	0.7055
79	1.1579	0.7135	1.1541	0.7038
80	1.1704	0.7115	1.1668	0.7021
81	1.1827	0.7096	1.1793	0.7004
82	1.1946	0.7077	1.1915	0.6988
83	1.2063	0.7058	1.2034	0.6973
84	1.2177	0.7040	1.2151	0.6958
85	1.2289	0.7023	1.2265	0.6943
86	1.2398	0.7006	1.2376	0.6929
87	1.2504	0.6990	1.2484	0.6915
88	1.2607	0.6974	1.2590	0.6902
89	1.2708	0.6959	1.2694	0.6889
90	1.2807	0.6944	1.2795	0.6876
91	1.2903	0.6929	1.2893	0.6864
92	1.2997	0.6915	1.2989	0.6852
93	1.3089	0.6901	1.3083	0.6840
94	1.3179	0.6888	1.3175	0.6828
95	1.3266	0.6875	1.3265	0.6817
96	1.3351	0.6862	1.3352	0.6806
97	1.3434	0.6850	1.3437	0.6796
98	1.3515	0.6838	1.3520	0.6785
99	1.3594	0.6826	1.3601	0.6775
100	1.3671	0.6815	1.3680	0.6765
120	1.4866	0.6640	1.4911	0.6609
150	1.5823	0.6494	1.5896	0.6466
200	1.6378	0.6382	1.6443	0.6343

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
300	1.6286	0.6296	1.6286	0.6262
400	1.5860	0.6262	1.5820	0.6256
500	1.5418	0.6253	1.5366	0.6272
600	1.5013	0.6262	1.4967	0.6293
700	1.4654	0.6284	1.4622	0.6315
800	1.4335	0.6315	1.4321	0.6334
900	1.4050	0.6353	1.4056	0.6351
1 000	1.3795	0.6396	1.3822	0.6365

4 priedas. Hidrometeorologinės stotelės kodas

```

#include <SFE_BMP180.h>
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 8
#define DHTTYPE DHT11
#define ALTITUDE 1655.0
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
SFE_BMP180 pressure;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pressure.begin();
  Serial.println();
  Serial.println("Nuskaitytos temperatūros, drėgmės ir slėgio
vertės:");
  Serial.println();
}

void loop()
{
  char status;
  double T,P;

  status = pressure.startTemperature();
  if (status != 0)
  {
    delay(status);
    status = pressure.getTemperature(T);
    if (status != 0)
    {
      Serial.print("Temperature:   ");
      Serial.print(T+273.15);
      Serial.println(" K");
      Serial.println(T);
    }
  }

  float h = dht.readHumidity();
  Serial.print("Humidity:      ");
  Serial.print(h,2);
  Serial.println(" %");
}

```

```

status = pressure.startPressure(3);
if (status != 0)
{
    delay(status);
    status = pressure.getPressure(P,T);
    if (status != 0)
    {
        Serial.print("Air pressure:  ");
        Serial.print(P,2);
        Serial.println(" hPa");
    }
}

Serial.println();
delay(5000);
}

```

5 priedas. Išmatuotų RSL ir MSE parametrų priklausomybė nuo TSL ir dažnio verčių

32 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 72,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm															~RSL, dBm	
72,125	-10	-24,09	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47,00
	-9	-29,71	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45,00
	-8	-30,99	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-7	-31,93	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,00
	-6	-32,39	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,00
	-5	-32,95	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,00
	-4	-33,33	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
	-3	-33,59	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	-2	-33,75	-36	-37	-37	-36	-36	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-36,80
	-1	-33,84	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00
	0	-33,98	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00
1	-34,16	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00	
2	-34,32	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00	
3	-34,35	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
4	-34,38	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31,00	
5	-34,33	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30,00	
6	-34,28	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,00	
7	-34,16	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28,00	
8	-34,16	-28	-28	-27	-27	-27	-27	-28	-28	-27	-27	-28	-28	-28	-28	-28	-27	-27,60	
9	-33,95	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27,00	
10	-33,93	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27,00	

33 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 73,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm															~RSL, dBm	
73,125	-10	-29,72	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-9	-31,49	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-8	-32,96	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-7	-33,81	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43,00
	-6	-34,35	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,00
	-5	-34,92	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,00
	-4	-35,35	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
	-3	-35,69	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	-2	-35,95	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
	-1	-35,99	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-36,93
	0	-36,16	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00
1	-36,17	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00	
2	-36,15	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00	
3	-36,02	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00	
4	-35,88	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00	
5	-35,75	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31,00	
6	-35,55	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30,00	
7	-35,37	-30	-29	-30	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,13	
8	-35,24	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,00	
9	-35,09	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29,00	
10	-34,91	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28,00	

34 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 74,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm		
74,125	-10	-28,67	-48	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-48,93
	-9	-30,48	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-8	-32,21	-44	-45	-44	-44	-44	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-44,80
	-7	-33,25	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-43,60
	-6	-34,05	-41	-41	-41	-41	-42	-41	-42	-41	-41	-41	-41	-42	-41	-41	-41	-41	-41,20
	-5	-34,97	-40	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-41	-40	-40	-40	-40	-40,13
	-4	-35,23	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-39	-39	-39	-39,07
	-3	-35,79	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	-2	-35,82	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
	-1	-36,09	-36	-36	-37	-37	-36	-37	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,33
	0	-36,11	-35	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-35	-35	-35	-35	-35	-35,60
	1	-36,22	-34	-34	-34	-34	-34	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-34,67
	2	-36,22	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-33,93
	3	-36,08	-32	-32	-33	-33	-33	-33	-32	-32	-32	-32	-32	-33	-32	-32	-32	-32	-32,40
	4	-36,12	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,00
	5	-36,06	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-30	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-30,93
	6	-35,86	-30	-29	-30	-29	-30	-30	-29	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-29,80
	7	-35,55	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-29	-28,93
	8	-35,48	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-29	-28	-28	-28	-28	-28,07
	9	-35,37	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28,00
	10	-35,11	-28	-27	-27	-28	-28	-27	-28	-28	-28	-28	-27	-27	-28	-28	-28	-28	-27,67

35 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 82,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm		
82,125	-10	-27,19	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52,00
	-9	-28,56	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50,00
	-8	-30,07	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49,00
	-7	-30,88	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47,00
	-6	-31,62	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-5	-32,21	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45,00
	-4	-32,7	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,00
	-3	-33,21	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43,00
	-2	-33,74	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,60
	-1	-34,06	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,00
	0	-34,58	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,00
	1	-34,77	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39,00
	2	-34,98	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	3	-35,14	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
	4	-35,32	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00
	5	-35,32	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36,00
	6	-35,47	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00
	7	-35,59	-35	-34	-34	-35	-35	-35	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,27
	8	-35,65	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00
	9	-35,7	-33	-34	-33	-33	-33	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-33,73
	10	-35,69	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00

36 lent. RSL ir MSE verčių priklausomybė nuo TSL, kai signalo dažnis 83,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	MSE, dB	RSL, dBm														~RSL, dBm		
83,125	-10	-29,02	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50,00
	-9	-30,2	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49,00
	-8	-31,08	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48,00
	-7	-31,86	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47,00
	-6	-32,64	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46,00
	-5	-33,43	-44	-44	-44	-45	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44,07
	-4	-34,05	-43	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-43,93
	-3	-34,48	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43,00
	-2	-34,8	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42,00
	-1	-35,12	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41,00
	0	-35,46	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40,00
	1	-35,73	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38,00
	2	-35,8	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37	-37,00
	3	-35,99	-36	-37	-36	-37	-37	-37	-36	-36	-36	-36	-37	-36	-36	-37	-37	-37	-36,53
	4	-36,08	-36	-36	-36	-36	-36	-35	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-35,93
	5	-36,09	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35,00
	6	-36,12	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,47
	7	-36,16	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00
	8	-36,25	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34,00
	9	-36,28	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33,00
	10	-36,29	-32	-33	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32,07

39 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 73,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL_Antenos, dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ , dB
73,125	-10	28	-84,00	-46,00	108,82	112,00	3,18
73,125	-9	29	-84,00	-46,00	108,82	113,00	4,18
73,125	-8	30	-82,00	-44,00	108,82	112,00	3,18
73,125	-7	31	-81,00	-43,00	108,82	112,00	3,18
73,125	-6	32	-80,00	-42,00	108,82	112,00	3,18
73,125	-5	33	-79,00	-41,00	108,82	112,00	3,18
73,125	-4	34	-77,00	-39,00	108,82	111,00	2,18
73,125	-3	35	-76,00	-38,00	108,82	111,00	2,18
73,125	-2	36	-75,00	-37,00	108,82	111,00	2,18
73,125	-1	37	-74,93	-36,93	108,82	111,93	3,12
73,125	0	38	-74,00	-36,00	108,82	112,00	3,18
73,125	1	39	-73,00	-35,00	108,82	112,00	3,18
73,125	2	40	-72,00	-34,00	108,82	112,00	3,18
73,125	3	41	-71,00	-33,00	108,82	112,00	3,18
73,125	4	42	-70,00	-32,00	108,82	112,00	3,18
73,125	5	43	-69,00	-31,00	108,82	112,00	3,18
73,125	6	44	-68,00	-30,00	108,82	112,00	3,18
73,125	7	45	-67,13	-29,13	108,82	112,13	3,32
73,125	8	46	-67,00	-29,00	108,82	113,00	4,18
73,125	9	47	-67,00	-29,00	108,82	114,00	5,18
73,125	10	48	-66,00	-28,00	108,82	114,00	5,18

40 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 74,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL_Antenos, dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ , dB
74,125	-10	28	-86,93	-48,93	108,93	114,93	6,00
74,125	-9	29	-84,00	-46,00	108,93	113,00	4,07
74,125	-8	30	-82,80	-44,80	108,93	112,80	3,87
74,125	-7	31	-81,60	-43,60	108,93	112,60	3,67
74,125	-6	32	-79,20	-41,20	108,93	111,20	2,27
74,125	-5	33	-78,13	-40,13	108,93	111,13	2,20
74,125	-4	34	-77,07	-39,07	108,93	111,07	2,13
74,125	-3	35	-76,00	-38,00	108,93	111,00	2,07
74,125	-2	36	-75,00	-37,00	108,93	111,00	2,07
74,125	-1	37	-74,33	-36,33	108,93	111,33	2,40
74,125	0	38	-73,60	-35,60	108,93	111,60	2,67
74,125	1	39	-72,67	-34,67	108,93	111,67	2,73
74,125	2	40	-71,93	-33,93	108,93	111,93	3,00
74,125	3	41	-70,40	-32,40	108,93	111,40	2,47
74,125	4	42	-70,00	-32,00	108,93	112,00	3,07
74,125	5	43	-68,93	-30,93	108,93	111,93	3,00
74,125	6	44	-67,80	-29,80	108,93	111,80	2,87
74,125	7	45	-66,93	-28,93	108,93	111,93	3,00
74,125	8	46	-66,07	-28,07	108,93	112,07	3,13
74,125	9	47	-66,00	-28,00	108,93	113,00	4,07
74,125	10	48	-65,67	-27,67	108,93	113,67	4,73

41 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 82,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
82,125	-10	28	-90,00	-52,00	109,82	118,00	8,18
82,125	-9	29	-88,00	-50,00	109,82	117,00	7,18
82,125	-8	30	-87,00	-49,00	109,82	117,00	7,18
82,125	-7	31	-85,00	-47,00	109,82	116,00	6,18
82,125	-6	32	-84,00	-46,00	109,82	116,00	6,18
82,125	-5	33	-83,00	-45,00	109,82	116,00	6,18
82,125	-4	34	-82,00	-44,00	109,82	116,00	6,18
82,125	-3	35	-81,00	-43,00	109,82	116,00	6,18
82,125	-2	36	-80,60	-42,60	109,82	116,60	6,78
82,125	-1	37	-80,00	-42,00	109,82	117,00	7,18
82,125	0	38	-79,00	-41,00	109,82	117,00	7,18
82,125	1	39	-77,00	-39,00	109,82	116,00	6,18
82,125	2	40	-76,00	-38,00	109,82	116,00	6,18
82,125	3	41	-75,00	-37,00	109,82	116,00	6,18
82,125	4	42	-74,00	-36,00	109,82	116,00	6,18
82,125	5	43	-74,00	-36,00	109,82	117,00	7,18
82,125	6	44	-73,00	-35,00	109,82	117,00	7,18
82,125	7	45	-72,27	-34,27	109,82	117,27	7,44
82,125	8	46	-72,00	-34,00	109,82	118,00	8,18
82,125	9	47	-71,73	-33,73	109,82	118,73	8,91
82,125	10	48	-72,00	-34,00	109,82	120,00	10,18

42 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 83,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL _{Antenos} , dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ, dB
83,125	-10	28	-88,00	-50,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-9	29	-87,00	-49,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-8	30	-86,00	-48,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-7	31	-85,00	-47,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-6	32	-84,00	-46,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-5	33	-82,07	-44,07	109,93	115,07	5,14
83,125	-4	34	-81,93	-43,93	109,93	115,93	6,00
83,125	-3	35	-81,00	-43,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-2	36	-80,00	-42,00	109,93	116,00	6,07
83,125	-1	37	-79,00	-41,00	109,93	116,00	6,07
83,125	0	38	-78,00	-40,00	109,93	116,00	6,07
83,125	1	39	-76,00	-38,00	109,93	115,00	5,07
83,125	2	40	-75,00	-37,00	109,93	115,00	5,07
83,125	3	41	-74,53	-36,53	109,93	115,53	5,60
83,125	4	42	-73,93	-35,93	109,93	115,93	6,00
83,125	5	43	-73,00	-35,00	109,93	116,00	6,07
83,125	6	44	-72,47	-34,47	109,93	116,47	6,54
83,125	7	45	-72,00	-34,00	109,93	117,00	7,07
83,125	8	46	-72,00	-34,00	109,93	118,00	8,07
83,125	9	47	-71,00	-33,00	109,93	118,00	8,07
83,125	10	48	-70,07	-32,07	109,93	118,07	8,14

43 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 84,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	EIRP, dBm	RSL_Antenos, dBm	RSL, dBm	FSL, dB	PL, dB	Δ , dB
84,125	-10	28	-86,60	-48,60	110,03	114,60	4,57
84,125	-9	29	-85,00	-47,00	110,03	114,00	3,97
84,125	-8	30	-83,20	-45,20	110,03	113,20	3,17
84,125	-7	31	-82,00	-44,00	110,03	113,00	2,97
84,125	-6	32	-81,00	-43,00	110,03	113,00	2,97
84,125	-5	33	-80,60	-42,60	110,03	113,60	3,57
84,125	-4	34	-79,80	-41,80	110,03	113,80	3,77
84,125	-3	35	-79,00	-41,00	110,03	114,00	3,97
84,125	-2	36	-78,00	-40,00	110,03	114,00	3,97
84,125	-1	37	-77,00	-39,00	110,03	114,00	3,97
84,125	0	38	-76,00	-38,00	110,03	114,00	3,97
84,125	1	39	-74,93	-36,93	110,03	113,93	3,90
84,125	2	40	-73,00	-35,00	110,03	113,00	2,97
84,125	3	41	-72,00	-34,00	110,03	113,00	2,97
84,125	4	42	-71,00	-33,00	110,03	113,00	2,97
84,125	5	43	-70,00	-32,00	110,03	113,00	2,97
84,125	6	44	-69,00	-31,00	110,03	113,00	2,97
84,125	7	45	-68,93	-30,93	110,03	113,93	3,90
84,125	8	46	-68,00	-30,00	110,03	114,00	3,97
84,125	9	47	-68,00	-30,00	110,03	115,00	4,97
84,125	10	48	-67,07	-29,07	110,03	115,07	5,03

7 priedas. Apskaičiuotų parametru priklausomybė nuo TSL ir dažnio verčių

44 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 72,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
72,125	-10	113,00	110,65	2,35	2,12	0,63
72,125	-9	112,00	110,65	1,35	1,22	σ , %
72,125	-8	112,00	110,65	1,35	1,22	1,22
72,125	-7	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	-6	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	-5	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	-4	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	-3	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	-2	110,80	110,65	0,15	0,13	
72,125	-1	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	0	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	1	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	2	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	3	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	4	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	5	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	6	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	7	111,00	110,65	0,35	0,32	
72,125	8	111,60	110,65	0,95	0,86	
72,125	9	112,00	110,65	1,35	1,22	
72,125	10	113,00	110,65	2,35	2,12	

45 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 73,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
73,125	-10	112,00	112,72	-0,72	0,64	0,78
73,125	-9	113,00	112,72	0,28	0,24	σ , %
73,125	-8	112,00	112,72	-0,72	0,64	0,13
73,125	-7	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	-6	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	-5	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	-4	111,00	112,72	-1,72	1,53	
73,125	-3	111,00	112,72	-1,72	1,53	
73,125	-2	111,00	112,72	-1,72	1,53	
73,125	-1	111,93	112,72	-0,79	0,70	
73,125	0	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	1	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	2	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	3	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	4	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	5	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	6	112,00	112,72	-0,72	0,64	
73,125	7	112,13	112,72	-0,59	0,52	
73,125	8	113,00	112,72	0,28	0,24	
72,125	9	112,00	110,65	1,35	1,22	
72,125	10	113,00	110,65	2,35	2,12	

46 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 74,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
74,125	-10	114,93	112,84	2,09	1,85	0,97
74,125	-9	113,00	112,84	0,16	0,14	σ , %
74,125	-8	112,80	112,84	-0,04	0,04	0,28
74,125	-7	112,60	112,84	-0,24	0,22	
74,125	-6	111,20	112,84	-1,64	1,46	
74,125	-5	111,13	112,84	-1,71	1,51	
74,125	-4	111,07	112,84	-1,78	1,57	
74,125	-3	111,00	112,84	-1,84	1,63	
74,125	-2	111,00	112,84	-1,84	1,63	
74,125	-1	111,33	112,84	-1,51	1,34	
74,125	0	111,60	112,84	-1,24	1,10	
74,125	1	111,67	112,84	-1,18	1,04	
74,125	2	111,93	112,84	-0,91	0,81	
74,125	3	111,40	112,84	-1,44	1,28	
74,125	4	112,00	112,84	-0,84	0,75	
74,125	5	111,93	112,84	-0,91	0,81	
74,125	6	111,80	112,84	-1,04	0,92	
74,125	7	111,93	112,84	-0,91	0,81	
74,125	8	112,07	112,84	-0,78	0,69	
74,125	9	113,00	112,84	0,16	0,14	
74,125	10	113,67	112,84	0,82	0,73	

47 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 82,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
82,125	-10	118,00	117,64	0,36	0,30	0,98
82,125	-9	117,00	117,64	-0,64	0,55	σ , %
82,125	-8	117,00	117,64	-0,64	0,55	0,24
82,125	-7	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	-6	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	-5	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	-4	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	-3	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	-2	116,60	117,64	-1,04	0,89	
82,125	-1	117,00	117,64	-0,64	0,55	
82,125	0	117,00	117,64	-0,64	0,55	
82,125	1	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	2	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	3	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	4	116,00	117,64	-1,64	1,40	
82,125	5	117,00	117,64	-0,64	0,55	
82,125	6	117,00	117,64	-0,64	0,55	
82,125	7	117,27	117,64	-0,37	0,32	
82,125	8	118,00	117,64	0,36	0,30	
82,125	9	118,73	117,64	1,09	0,93	
82,125	10	120,00	117,64	2,36	2,00	

48 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 83,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
83,125	-10	116,00	115,79	0,21	0,18	0,56
83,125	-9	116,00	115,79	0,21	0,18	σ , %
83,125	-8	116,00	115,79	0,21	0,18	0,37
83,125	-7	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	-6	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	-5	115,07	115,79	-0,73	0,63	
83,125	-4	115,93	115,79	0,14	0,12	
83,125	-3	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	-2	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	-1	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	0	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	1	115,00	115,79	-0,79	0,68	
83,125	2	115,00	115,79	-0,79	0,68	
83,125	3	115,53	115,79	-0,26	0,22	
83,125	4	115,93	115,79	0,14	0,12	
83,125	5	116,00	115,79	0,21	0,18	
83,125	6	116,47	115,79	0,67	0,58	
83,125	7	117,00	115,79	1,21	1,04	
83,125	8	118,00	115,79	2,21	1,91	
83,125	9	118,00	115,79	2,21	1,91	
83,125	10	118,07	115,79	2,27	1,96	

49 lent. Apskaičiuotos parametru vertės, kai signalo dažnis 84,125 GHz

Dažnis, GHz	TSL, dBm	PL, dB	Lognormalusis, dB	$\Delta\Delta$, dB	PL/Lognormalusis, %	Vidurkis, %
84,125	-10	114,60	113,94	0,66	0,58	0,46
84,125	-9	114,00	113,94	0,06	0,05	σ , %
84,125	-8	113,20	113,94	-0,74	0,65	0,14
84,125	-7	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	-6	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	-5	113,60	113,94	-0,34	0,30	
84,125	-4	113,80	113,94	-0,14	0,12	
84,125	-3	114,00	113,94	0,06	0,05	
84,125	-2	114,00	113,94	0,06	0,05	
84,125	-1	114,00	113,94	0,06	0,05	
84,125	0	114,00	113,94	0,06	0,05	
84,125	1	113,93	113,94	-0,01	0,01	
84,125	2	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	3	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	4	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	5	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	6	113,00	113,94	-0,94	0,83	
84,125	7	113,93	113,94	-0,01	0,01	
84,125	8	114,00	113,94	0,06	0,05	
84,125	9	115,00	113,94	1,06	0,93	
84,125	10	115,07	113,94	1,12	0,99	