

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

MILDA TAMOŠIŪNAITĖ

IŠORINIO POVEIKIO ĮTAKA TERAHERCŲ TAIKYMAMS
TELEKOMUNIKACIJOSE

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2018 metai

Disertacija rengta 2012 – 2018 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro Optoelektronikos skyriuje.

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Gintaras Valušis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Padėka

Esu nuoširdžiai dėkinga darbo vadovui prof. Gintarui Valušiui už suteiktas galimybes, idėjas, vertingus patarimus ir visapusišką palaikymą. Taip pat noriu padėkoti straipsnių bendraautoriams bei kolegoms iš Fizinių ir technologijos mokslų centro Optoelektronikos skyriaus Terahercų fotonikos laboratorijos. Man yra didelė garbė, kad turėjau galimybę dirbti su Jumis.

Dėkoju savo šeimos nariams už palaikymą ir kantrybę.

Turinys

NAUDOJAMI SUTRUMPINIMAI	6
1. ĮVADAS	7
2. LITERATŪROS APŽVALGA	22
2.1. Pralaidumo juostos pločio problema	22
2.2. Bevielio ryšio sistemos	23
2.2.1. Radijo spektras ir jo reguliavimas.....	23
2.2.2. Evoliucija nuo 1G iki 5G/B5G.....	25
2.3. Silpninimas atmosferoje	29
2.3.1. Atmosferos sudėtis	29
2.3.2. Nuostolių atmosferoje mechanizmai.....	31
2.3.3. Elektromagnetinių bangų sklaidos tipai.....	32
2.3.4. Sugertis dėl atmosferoje esančių dujų.....	34
2.3.5. Silpninimas dėl vandens.....	36
2.3.6. Silpninimas dėl kitų atmosferoje esančių dalelių.....	38
2.3.7. Atmosferos lūžio rodiklis.....	38
2.4. Galios biudžeto analizė.....	40
2.4.1. Priimto signalo lygio skaičiavimas	40
2.4.2. FSL ir kiti sklidimo terpėje patiriami nuostoliai.....	41
2.4.3. THz ryšio sistemų galios biudžeto analizė.....	42
2.5. Zoninės plokštelės.....	45
3. MODELIAVIMO METODIKA	48
3.1. Empiriniai modeliai	48
3.1.1. Silpninimas dėl lietaus	48
3.1.2. Lietaus intensyvumas	52
3.2. Fiziniai modeliai	54

3.3. Atmosferos lūžio koeficientas	55
3.4. Zoninių plokštelių modeliavimas	57
4. MODELIAVIMAS NAUDOJANT REALIUS METEOROLOGINIUS DUOMENIS	58
4.1. THz bangų silpninimo dėl lietaus modeliavimo rezultatų priklausomybė nuo R vertės parinkimo	58
4.2. Atmosferos lūžio rodiklis	66
4.3. Skyriaus rezultatų apibendrinimas.....	72
5. MODELIAVIMAS NAUDOJANT KLASIKINĘ SKLAIDOS TEORIJĄ .	74
5.1. Teoriniai duomenų perdavimo scenarijai	74
5.2. Skaičiavimai naudojant Weibull'o pasiskirstymą	75
5.3. Skyriaus rezultatų apibendrinimas.....	83
6. SPINDULIUOTĖS NEATSPINDINČIŲ BEI SPINDULIUOTĖS FAZĘ REGULIUOJANČIŲ KOMPAKTIŠKŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ THZ DAŽNIŲ RUOŽUI MODELIAVIMAS.....	84
6.1. Struktūros modeliavimas	84
6.1.1. Ketvirčio bangos ilgio struktūrizuoti sluoksniai	86
6.1.2. Padidinto gylio struktūros	97
6.1.3. Fazės poslinkis AR struktūrose.....	102
6.1.4. Fokusavimo savybės dėl AR struktūrų fazės poslinkio	106
6.2. Skyriaus rezultatų apibendrinimas.....	110
REZULTATAI IR IŠVADOS	112
LITERATŪROS SĄRAŠAS	114

Naudojami sutrumpinimai

THz – terahercas (angl. *Terahertz*) ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)

Sub-THz – sub-terahercai (0,1 – 0,3 THz dažniai)

EM – elektromagnetinė/-is (angl. *electromagnetic*)

IoT – daiktų internetas (angl. *Internet of Things*)

5G – penktosios kartos (angl. *fifth generation*) mobiliojo tinklo infrastruktūra

B5G – „toliau 5G“ (angl. *beyond 5G*) mobiliojo tinklo infrastruktūra, veikianti pagal 5G technologijos principus terahercų dažniuose

FSL – sklidimo laisvoje erdvėje nuostoliai (angl. *Free-Space-Loss*)

SNR – signalo-triukšmo santykis (angl. *Signal-to-Noise Ratio*)

ITU-R – Tarptautinės telekomunikacijų sąjungos Radijo komunikacijų sektorius (angl. *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*)

MIMO - daugkartinio-įėjimo daugkartinio-išėjimo (angl. *Multiple-input multiple-output*) signalo apdorojimo technikos

AR – neatspindinčioji/neatspindintis (angl. *antireflective*)

ZP – zoninė plokštelė (angl. *zone plate*)

EIRP - efektyvioji izotropinės spinduliuotės galia (angl. *Effective Isotropic Radiated Power*)

RSL - priimto signalo lygis (angl. *Received Signal Level*)

BZP - dvinarė zoninė plokštelė (angl. *binary zone plate*)

FDTD - baigtinių skirtumų laiko skalėje metodas (angl. *Finite-Difference Time-Domain method*)

SEM - skenuojantis elektroninis mikroskopas (angl. *Scanning Electron Microscope*)

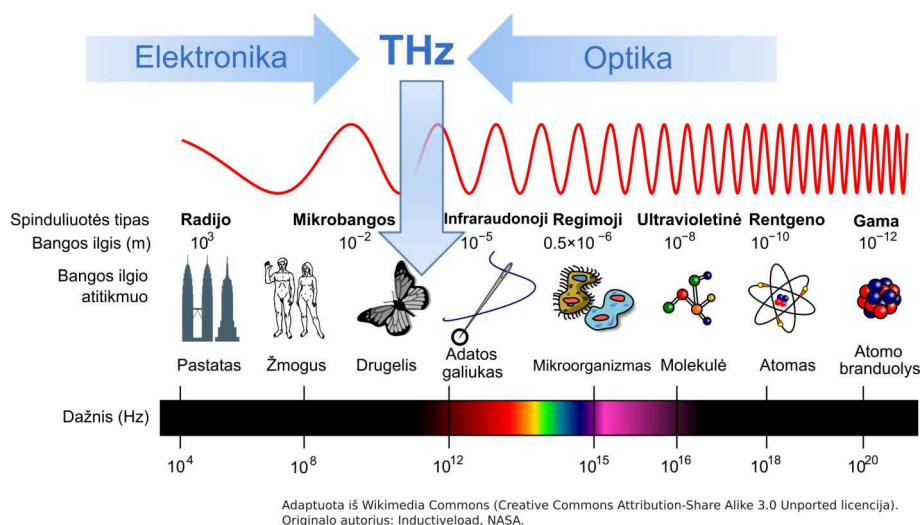
THz-TDS – terahercinė laikinės skyros spektroskopija (angl. *Terahertz Time-Domain spectroscopy*)

HR Si – didelės varžos silicis (angl. *highly resistive silicon*)

FWHM – pluošto plotis pusės maksimalios vertės lygyje (angl. *Full-Width at Half-Maximum*)

1. Įvadas

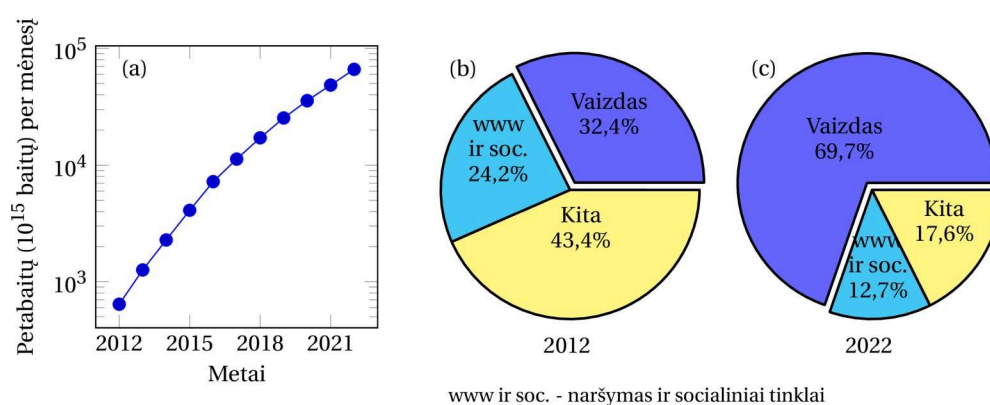
Terahercine (THz, angl. *Terahertz*) spinduliuote yra vadinamos elektromagnetinės (EM) bangos, kurių dažnis yra tarp 100 GHz ir 10 THz [1]. Vienas terahercas ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) atitinka $300 \mu\text{m}$ bangos ilgį vakuume. Terahercų dažnių juosta dar vadinama T-spinduliais [2], decimilimetrinėmis bangomis [3], „teraherciniu tarpu“ (angl. *terahertz gap*) [4]. Pastarąjį pavadinimą THz sritis gavo dėl to, kad ji skiria elektronikos ir optikos dažnių ruožus (1 pav.). Tiek elektronikos, tiek optikos sritys prisidėjo prie THz technologijos spartaus vystymosi ir įrangos sukūrimo: pavyzdžiui, fotonika prisidėjo prie kvantinio kaskadinio lazerio vystymo, o tuo tarpu iš elektronikos buvo pritaikyti kietakūniai komponentai, pvz., rezonansiniai tuneliniai diodai [4].



1 pav. Terahercų (THz) dažnių juosta. Tiek elektronikos, tiek optikos sričių pasiekimai prisidėjo prie spartaus THz technologijos vystymosi [4] (ilustracija adaptuota iš [PS1]).

THz technologijos yra galingas įrankis, tinkantis taikymams įvairiose srityse. Dalyje jų terahercai jau sėkmingai naudojami (pvz., medicinoje, farmacijoje, saugumo sistemose, identifikuojant pavojingas medžiagas maiste, vaistuose ir kt. [5]), o telekomunikacijose, kurių duomenų srautai pastaraisiais

dešimtmečiais sparčiai augo (2 pav.), jie yra svarstomi kaip galimas pralaidumo juostos pločio problemos sprendimas [6], [7]. Edholm'o dėsnis (panašus į gerai žinomą Moore'o dėsnį tranzistoriams) teigia, kad per pastaruosius tris dešimtmečius belaidžių duomenų perdavimo sparta augo beveik eksponentiškai - padvigubėdavo kas 18 mėnesių ir sparčiai artėja link laidinių ryšio sistemų pajėgumo [8]. Manoma, kad ši tendencija išliks dar mažiausiai kelerius metus, o 2018 m. interneto srautas pasieks¹ virš 130 exabaitų ($1,3 \times 10^{14}$ megabaitų) per mėnesį [9].



2 pav. Pasauliniai mobiliųjų duomenų srautai (a), jų pasiskirstymas pagal sritis 2012 metais (b) ir prognozuojamas pasiskirstymas 2022 metais (c), remiantis [10] pateiktais duomenimis (ilustracija adaptuota iš [IP2]).

Didžiąją dalį šio srauto generuoja delšai jautrūs vaizdo duomenys. Bell'o laboratorijų (*Bell Labs*) ataskaitoje [11] prognozuojama, kad 2020 m. bus daugybė tarpusavyje susietų įrenginių, kurie keisis informacija. Ši informacija formuos naujas žinias, kurios, savo ruožtu, bus panaudotos automatizuojant procesus taip, kad jie vyktų efektyviau. Tokie pokyčiai keis technologijų vartotojų elgseną ir didins priklausomybę nuo galėjimo dalintis informacija čia ir dabar, vienu išmaniuoju įrenginiu. Be to, srautus generuos ne tik žmonės, bet ir daiktai, kurie ateityje turėtų tapti pagrindiniais srauto kūrėjais: išmanūs

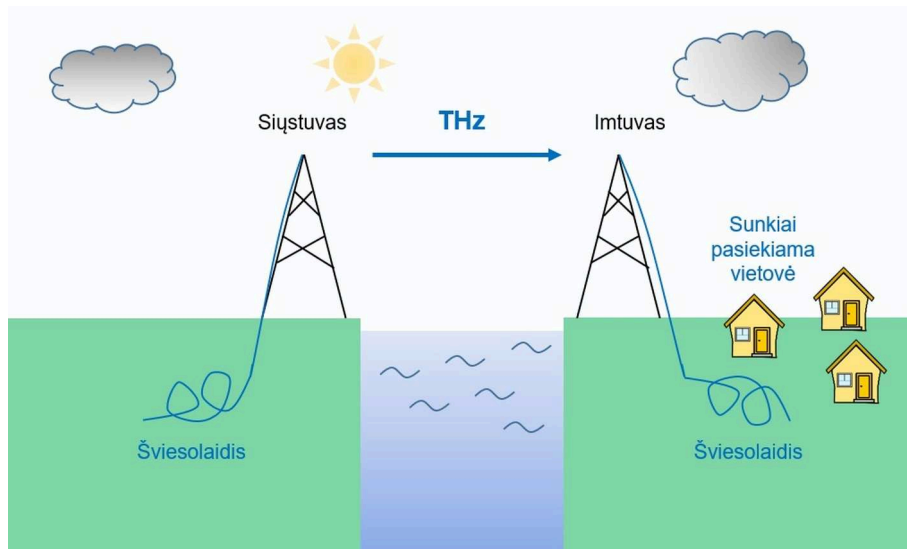
¹ Ar ši prognozė pasitvirtins, paaiškės tik 2019 m., kai bus paskelbtos metinės ataskaitos.

įrenginiai, naudodami tinklo resursus, komunikuos su debesija (angl. *cloud*), kuri atliks talpinimo, duomenų analizės ir kontrolės funkcijas (pvz., daiktų internetas (IoT, angl. *Internet of Things*), įrenginys-įrenginiui technologija (M2M, angl. *machine-to-machine*) ir pan.). Tokia situacija kelia tiek technologinius, tiek reguliavimo iššūkius. Todėl šiuo metu kuriami penktosios kartos (5G, angl. *fifth generation*) bevielio ryšio tinklai [12]. Tikimasi, kad jie pradės veikti 2020 m. Numatoma, kad dabartinės 3G, 4G/LTE, Wi-Fi technologijos kartu su kuriamomis naujomis 5G technologijomis galės patenkinti iki 81 proc. 2020 m. planuojamo poreikio [11].

Pagrindiniai faktoriai, ribojantys informacijos perdavimo greitį, yra pralaidumo juostos plotis ir jau įvykęs aplinkos įtakai mažiausiai jautrių dažnių intervalų priskyrimas konkreitiems taikymams. Todėl naudojamos vis aukštesnės, iki šiol buvusios tuščios, dažnių juostos. Numatoma, kad 5G technologija veiks mikrobangų srityje. Konkreitiems taikymams nepasiskirstytos sub-terahercų (sub-THz) ir terahercų dažnių juostos, kuriose galima rasti iki 120 GHz pločio spektro juostas, kur sugertis atmosferoje yra santykinai maža, kartu su sparčiai vystomais komponentais [7], [13], paskatino svarstymus apie galimą sub-THz/THz dažnių panaudojimą telekomunikacijoms, kuriant šeštosios kartos 6G (arba kitaip - B5G (angl. *beyond 5G*)) technologiją. Tačiau tiek mikrobangų, tiek terahercų atveju, kyla daug iššūkių dėl sklidimo erdvėje nuostolių.

Vandens lašai (lietus, debesys, rūkas) ir jo garai yra viena iš THz spinduliuotę stipriausiai sugeriančių medžiagų. Taip pat reikia atsižvelgti į atmosferoje esančių dujų molekulių rezonansinius dažnius. Be to, atmosferos lūžio rodiklio fliktuacijos, kurias įtakoja temperatūros, slėgio ir drėgmės pokyčiai, gali keisti EM bangos sklidimo kryptį, suardyti jos fazinį frontą [7]. Dėl šių reiškinių visumos, galimas THz spinduliuotės sklidimo atstumas labai sumažėja. [13] ir [6] numatoma, kad teoriškai THz linijos ilgis galėtų būti 1-5 km, o naudojamas dažnis priklausytų nuo taikymų, nes kuo aukštesnis darbinis dažnis, tuo trumpesnis tikėtinas atstumas, kurį THz dažnio banga gautų nusklisti (~100 – 150 GHz ilgiems atstumams (~1 km ir daugiau, iki 10 km), <350 GHz

vidutiniams atstumams (~100 m – 1 km) ir <500 GHz patalpose (~10–100 m)) [6]. Tačiau dėl „THz sienos“ [14] (situacijos, kai norint perduoti signalą THz dažniais ilgesniu nei 100 m atstumu, tam reikalingos galios daugeliu atvejų būtų nepraktiškai didelės) ir didelio silpninimo atmosferoje, labiausiai tikėtini vos kelių metrų atstumai [15].



3 pav. Šviesolaidžio-THz „tilto“ tarp miesto ir sunkiai pasiekiamos vietovės pavyzdys (ilustracija adaptuota iš [PS1]).

THz dažnių juostos galimybės buvo pademonstruotos 2012 m., kai, naudojant THz technologiją, buvo pasiekti 20 kartų didesni greičiai nei tuo metu naudojamame Wi-Fi standarte [16]. Nepaisant šio rezultato, iki šiol geriausias THz bevielių tinklų veikimas buvo pademonstruotas patalpose. Nors turi trūkumų, THz bangos gali būti puikus sprendinys kuriant komunikacijos kanalus trumpais atstumais (pavyzdžiui, šviesolaidžio-THz „tiltus“ (WOF, angl. *wireless-over-fiber*) sunkiai pasiekiamose vietovėse (3 pav.)) pritaikant 5G technologijos principus.

Šiame darbe išanalizuotos THz tinklų taikymo galimybės silpninimo atmosferoje sąlygomis, didžiausią dėmesį skiriant silpninimui dėl lietaus ir atmosferos lūžio rodiklio, taip pat sumodeliuotas vienas iš labiausiai tikėtinų technologinių scenarijų (trumpi atstumai bei kvazioptinis perdavimas (angl.

quasi-optical transmission)) ir gauti rezultatai palyginti su laboratorijoje kontroliuojamo lietaus eksperimento duomenimis. Dauguma esamos pramonėje naudojamos įrangos nėra suprojektuota atlikti kalibruotus 5G/B5G belaidžių tinklų matavimus bangai sklindant oru [17], todėl tokie eksperimentai gali būti naudojami siekiant prognozuoti tikėtiną duomenų perdavimo našumą.

Atmosferoje vykstančių reiškinių valdyti negalime, todėl silpninimo atmosferoje modeliavimas yra tik vienas iš žingsnių plėtojant THz telekomunikacijas. Ne mažiau svarbūs naudojamos įrangos parametrai (siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimai, naudojamos siųstuvo galios ir imtuvo jautrumo lygiai) bei komponentai. Todėl viena iš šio darbo užduočių buvo atlikti spinduliuotės neatspindinčių bei spinduliuotės fazę reguliuojančių kompaktiškų optinių elementų THz dažnių ruožui modeliavimą ir pademonstruoti jų fokusavimo funkcionalumą. Modeliavimo rezultatai buvo panaudoti zoninės plokštelės (ZP, angl. *zone plate*) su abiem struktūrizuotais paviršiais dizainui sukurti, kuriame suderinamos atspindžius mažinančios dangų savybės, fokusavimas ir visa tai gaunama viename 500 μm storio silicio padėkle. Zoninių plokštelių lėšiai yra fokusuojančių elementų tipas, kuris atlieka fazės poslinkio funkciją [18]. Tokie lėšiai yra plonesni nei standartiniai fokusuojantys elementai [19], [20], todėl THz antenose [15] galėtų pakeisti išgaubtus lėšius, būti panaudoti kryptinėse antenose, kaip buvo pademonstruota 5G technologijos atveju [21]. Kadangi fokusavimas zoninėmis plokštelėmis, sukomponuotomis iš plačiajuosčių spinduliuotės neatspindinčių struktūrų vietoje anksčiau pademonstruotų lėšių [22], [23], [24], turi potencialo kompaktiškumo ir efektyvumo požiūriu, jos gali būti svarstomos kaip racionalus sprendinys, siekiant pagerinti optinių komponentų pralaidumą THz srityje.

Darbe atliktas lazeriu sukurtų AR struktūrų, skirtų THz dažniams (apie 0,6 THz), nuoseklus optimizavimas, tuo pačiu pademonstruojant jų fokusavimo našumą ir pagerintą tinkamumą integruoti į kompaktiškus optinius komponentus, pagamintus santykinai plonuose puslaidininkiniuose padėkluose. Pasiektas pralaidumas siekia >90% 0,5 – 0,6 THz dažniams. Taip pat pasiektas artimas difrakcija ribotam pluošto sąsmaukos plotis židinyje. Toks rezultatas

atveria kelią aukšto efektyvumo su mažais nuostoliais zoninių plokštelių gamybai.

Darbo tikslas - įvertinti terahercinio dažnio elektromagnetinių bangų sklidimo bei nuostolių ypatumus šiuolaikinėse bei ateities bevielių komunikacijų sistemose realiomis atmosferos sąlygomis ir pasiūlyti integruotus, atspindžius mažinančius bei fokusuojančius pasyvius komponentus siaurų pluoštų THz komunikacijų sistemoms.

Uždaviniai:

1. Teoriškai išnagrinėti momentinės lietaus intensyvumo vertės ir atmosferos lūžio rodiklio pokyčių įtaką THz dažnių ruožo elektromagnetinių bangų silpninimui atmosferoje.
2. Įvertinti, kokią įtaką THz dažnių ruožo elektromagnetinių bangų sklidimui turės atsitiktiniai silpninimo Lietuvoje svyravimai B5G technologijų atveju.
3. Teoriniais skaičiavimais pagrįsti atspindžius sumažinančių struktūrizuotų sluoksnių dizainus, kurie būtų suderinami su gamyba, naudojant lazerinės abliacijos būdą.
4. Ištirti fazės poslinkio ypatumus atspindžius mažinančiuose sluoksniuose ir ištirti galimybes juos panaudoti fokusuojančių elementų formavimui puslaidininkinių padėklų paviršiuose.

Darbo naujumas

Pademonstruota momentinės lietaus intensyvumo vertės ir atmosferos lūžio rodiklio pokyčių įtaka nagrinėjant sub-THz (100 GHz) ir THz (300 GHz) dažnių ruožo elektromagnetinių bangų silpninimą atmosferoje. Buvo parodyta, kad suvidurkintos lietaus intensyvumo vertės iškraipo modeliavimo rezultatus: didelės momentinės lietaus intensyvumo vertės sumažėja, mažos išauga, o silpninimo maksimumas pasislenka laike. Taip pat pademonstruota, kad silpnos

aprėpties zonoje kintant atmosferos lūžio rodikliui, tuo pačiu metu vyksta ir signalo stiprumo pokyčiai.

Pirmą kartą nuosekliai suskaičiuoti tikėtini sugerties koeficiento nuokrypiai THz dažnių ruožo spinduliuotei siaurų spinduliuotės pluoštų (kvazioptinis perdavimas) ir trumpų atstumų scenarijui, kurio galima tikėtis B5G tinkluose. Buvo parodyta, kad šie nuokrypiai yra reikšmingi palyginus su vidurkiu, o kai kuriais atvejais (pavyzdžiui, eksperimentų laboratorijose atveju) jį gali ir viršyti.

Buvo nuosekliai optimizuotos ir lazerinės abliacijos būdu pagamintos atspindžius mažinančios struktūros THz dažnių ruožui, iširti fazių poslinkio jose ypatumai. Šie fazių poslinkiai buvo panaudoti zoninės plokštelės dizainui sukurti, kuriame suderinamos atspindžius mažinančios dangų savybės, fokusavimas ir visa tai gaunama viename 500 μm storio silicio padėkle.

Praktinė nauda

Kadangi iki šiol dauguma esamos pramonėje naudojamos įrangos nėra suprojektuota atlikti kalibruotus 5G/B5G belaidžių tinklų matavimus bangai sklindant oru, momentinio lietaus intensyvumo ir atmosferos lūžio rodiklio tikslesnis įvertinimas padės patikimiau įvertinti galimą ryšio kokybę.

Be to, THz spinduliuotės silpninimo Lietuvoje tyrimai leis geriau įvertinti ne tik (jau standartizuotus ir anksčiau gerai suprastus) vidutinio sugerties koeficiento skaičiavimus, bet ir tikėtinus nuokrypius trumpų atstumų ir kvazioptinio duomenų perdavimo atveju.

Dėl fazių poslinkio lazeriu abliuotose atspindžius mažinančiose struktūrose veikiančios zoninės plokštelės ateityje galėtų pakeisti dabar naudojamus HR-Si lęšius ir, lyginant su jais, užtikrinti mažesnius nuostolius paviršiuose, taip pagerinant signalo-triukšmo santykį ir išvengiant stiprių parazitinių atspindžių nuo paviršių fokusuojančiuose elementuose.

Realizuojant sub-THz/THz ryšio sistemas gali būti reikalingi dideli antenų masyvai. Zoninės plokštelės yra kompaktiškesnės nei standartiniai fokusuojantys elementai, todėl padėtų sumažinti antenų matmenis.

Ginamieji teiginiai

- Modeliuojant 5G/B5G tinkluose naudojamų elektromagnetinių bangų silpninimą atmosferoje, būtina nustatyti momentines („vienos minutės“) lietaus intensyvumo ir atmosferos lūžio rodiklio vertes, nes suvidurkinti duomenys dėl ženklių nuokrypių neatspindi realių verčių.
- Dėl 5G/B5G tinklams numatomo kvazioptinio perdavimo ir santykinai mažų atstumų dabartinių bevielio ryšio sistemų atžvilgiu, galimi silpninimo nuokrypiai nuo verčių, apskaičiuojamų pagal šiaudien naudojamus standartizuotus modelius.
- Atspindžius mažinančiuose sluoksniuose, kuriuose struktūros periodas yra artimas krintančios bangos ilgiui, galima suploninti atspindžius mažinantį sluoksnį ir palengvinti sluoksnių gamybą lazeriniu apdirbimu, kartu išlaikant mažą atspindžio koeficientą.
- Fazės poslinkiai struktūrizuotuose atspindžius mažinančiuose sluoksniuose yra pakankamai gerai kontroliuojami, kad iš jų būtų galima gauti kokybiškus fokusuojančius elementus tiek sub-THz/THz komunikacijų, tiek ir THz vaizdinimo sistemoms, leidžiančius pasiekti artimą difrakcija ribotam pluošto sąsmaukos plotį židinyje.

Disertacijos planas

Disertaciją sudaro šeši skyriai ir išvados.

Įvadinėje dalyje (1 skyrius) trumpai pristatomi 5G/B5G tinklų veikimo principai ir iššūkiai. Taip pat apžvelgiamos galimybės, kurias atvertų sėkmingas sub-THz/THz dažnių ruožų pritaikymas telekomunikacijose. 2 skyriuje pateikiama literatūros apžvalga. Aptariama pralaidumo juostos pločio problema

(2.1 dalis), radijo spektro paskirstymas (2.2.1 dalis), ryšio sistemų evoliucija bei pagrindiniai 5G technologiniai principai, kuriais greičiausiai remsis ir sub-THz/THz dažnių ruožuose veikianti B5G technologija (2.2.2 dalis). Toliau aptariami silpninimo atmosferoje mechanizmai (2.3 dalis), kurie yra svarbūs galios biudžeto analizei (2.4 dalis). Dėl didelio silpninimo atmosferoje bus reikalingi didelio stiprinimo antenų masyvai, antenų matmenys turės būti itin maži. Zoninės plokštelės (2.5 dalis) yra vienas iš būdų mažinti antenų matmenis. Pateikiama 5G/B5G technologijų antenoms skirtų zoninių plokštelių apžvalga, lazerinis gamybos būdas palygintas su kitais gamybos būdais. 3 skyriuje aptariama darbe naudojama modeliavimo metodika, daugiausiai dėmesio skiriant silpninimui dėl lietaus ir atmosferos lūžio rodiklio pokyčių, palyginami empiriniai ir fiziniai modeliai. Taip pat aptariama zoninių plokštelių modeliavimui naudota programinė įranga. 4 skyriuje pateikti modeliavimo naudojant realius meteorologinius duomenis rezultatai, o 5 skyriuje atliktas modeliavimas klasikinės teorijos rėmuose. Kiekvieno iš šių skyrių pabaigoje pateikiami apibendrinimai ir gautų rezultatų pagrindu suformuluoti ginamieji teiginiai. 6 skyriuje pateiktas nuoseklus spinduliuotės neatspindinčių bei spinduliuotės fazę reguliuojančių kompaktiškų optinių elementų THz dažnių ruožui modeliavimas, kurio rezultatai buvo panaudoti zoninės plokštelės prototipo gamybai. Skyriaus pabaigoje pateikiamas apibendrinimas ir gautų rezultatų pagrindu suformuluoti ginamieji teiginiai.

Rezultatai apibendrinti išvadose.

Autorės indėlis

Autorė atliko modeliavimo darbus, ruošė su disertacijos tema susijusių straipsnių rankraščius, dalyvavo rengiant pranešimus konferencijoms ir dalį jų pristatė pati.

Straipsnių bendraautorių indėlis: AR dangų ir zoninių plokštelių abliavimo darbai buvo atlikti FTMC Lazerinių tyrimų skyriuje dr. S. Indrišiūno

ir dr. G. Račiukaičio. THz-TDS ir THz vaizdinimo eksperimentai buvo atlikti kartu su dr. L. Minkevičiumi. Visi straipsnių bendraautoriai prisidėjo juos redaguojant ir parengiant spaudai.

Publikacijų sąrašas

Publikacijų sąrašas disertacijos tema ISI sąrašo leidiniuose [IP]

- [IP1] **M. Tamošiūnaitė**, S. Indrišiūnas, V. Tamošiūnas, L. Minkevičius, A. Urbanowicz, G. Račiukaitis, I. Kašalynas, G. Valušis, Focusing of Terahertz Radiation with Laser-Ablated Antireflective Structures, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* [spaudoje, DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2859619].
- [IP2] **M. Tamošiūnaitė**, V. Tamošiūnas, G. Valušis. Wireless Communications Beyond 5G: Uncertainties of Terahertz Wave Attenuation Due to Rain, *Lithuanian Journal of Physics* Vol. **58**, No. 2, 149–158 (2018).
- [IP3] M. Zilinskas, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, E. Brilius, M. Tamosiuniene, Model for Determination of Territorial Distribution of Surface Radio Refractivity, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Stockholm, Sweden, Aug. 12-15, 2013*, 1525-1529 (2013).
- [IP4] M. Zilinskas; **M. Tamosiunaite**, M. Tamosiuniene, E. Valma, and S. Tamosiunas; Gradient of Radio Refractivity in Troposphere, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 19-23*, 603-607 (2012).
- [IP5] M. Žilinskas, S. Tamošiūnas, **M. Tamošiūnaitė**. M. Tamošiūnienė. Yearly, Seasonal and Daily Variations of Radio Refractivity, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 119, No. 4, 533-536 (2011).

- [IP6] E. Valma, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, M. Tamosiuniene, M. Žilinskas, Variation of radio refractivity with height above ground, *Electronics and Electrical Engineering*, No. 5 (111), 23-26 (2011).
- [IP7] **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, V. Daukšas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. Prediction of electromagnetic waves attenuation due to rain in the localities of Lithuania. *Electronics and Electrical Engineering*, Nr. 9 (105), 9-12 (2010).
- [IP8] E. Valma, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. Determination of radio refractive index using meteorological data. *Electronics and Electrical Engineering*, Nr. 10 (106), 125-128 (2010).
- [IP9] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. The influence of the climatic peculiarities on the electromagnetic waves attenuation in the Baltic Sea Region. *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, March 24-28, 2008, Hangzhou, China*, Vol. 1, 227-231 (2008).

Parengtų spausdinimui publikacijų sąrašas [PS]

- [PS1] **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, M. Žilinskas, G. Valusis. Atmospheric Attenuation of the Terahertz Wireless Networks, in: *Broadband Communications Networks - Recent Advances and Lessons from Practice*, InTech [priimta 2017 m. lapkričio mėn., parengta spaudai].

Publikacijų sąrašas disertacijos tema kituose recenzuojamuose leidiniuose [P]

- [P1] M. Žilinskas, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, M. Tamosiuniene, E. Stankevicius, The influence of atmospheric radio refractivity on the WiMAX signal level in the areas of weak coverage, in: *Proceedings of*

The 36th PIERS, Prague, Czech Republic, European Union, 6-9 July, 2015

- [P2] **Tamošiūnaitė M.**, Žilinskas M., Tamošiūnienė M., Tamošiūnas S. Atmospheric Attenuation due to Humidity. Chapter 8, pp. 157-172 // in: *Electromagnetic Waves*, Ed. Vitaliy Zhurbenko, ISBN: 978-953-307-304-0 (InTech, 2011)-510 p.

Publikacijos, neįtrauktos į disertaciją [NP]

- [NP1] **M. Tamošiūnaitė**, M. Tamošiūnienė, A. Gruodis, S. Tamošiūnas. Prediction of electromagnetic wave attenuation due to water in atmosphere. 1. Attenuation due to rain. *Innovative Infotechnologies for Science, Business and Education*, Vol. 2, No. 9, 3-10 (2010). ISSN 2029-1035.
- [NP2] S. Tamošiūnas, **M. Tamošiūnaitė**, M. Žilinskas, M. Tamošiūnienė. The influence of fog on the propagation of the electromagnetic waves under Lithuanian climate conditions. *PIERS Online*. Vol. 5, No. 6 (2009).
- [NP3] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. Calculation of electromagnetic wave attenuation due to rain for various percentages of time. *Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March 23–27, 2009 Proceedings*, 541-545 (2009).
- [NP4] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. The influence of the climatic peculiarities on the electromagnetic waves attenuation in the Baltic Sea Region. *PIERS Online*, Vol.4, No. 3, 321-325 (2008).

Pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose [K]

- [K1] **M. Tamosiunaite**, S. Indrasiunas, V. Tamosiunas, L. Minkevicius, A. Urbanowicz, G. Raciukaitis, I. Kasalynas, G. Valusis, Laser-Ablated Antireflective and Phase Shifting Structures for Terahertz Range Optical

- Systems, *19-oji tarptautinė konferencija – mokykla "Advanced Materials and Technologies 2017", Palanga, 2018 m. rugpjūčio 27-31 d.* Programa: [https://advancedmaterials.ktu.edu/2017/doc/AMT2017_Programme.pdf].
- [K2] **M. Tamošiūnaitė**, M. Žilinskas, S. Tamošiūnas, R. Rimkevičius, Atmosferos lūžio rodiklio įtaka radijo bangų signalo lygiui, *41-oji Lietuvos Nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2015 m. birželio 17-19 d.* Programa [http://lnfk.ftmc.lt/wp-content/uploads/LNFK_PROGRAMA.pdf].
- [K3] **M. Tamošiūnaitė**, A. Gruodis, S. Tamošiūnas, Patikslintas blogiausio mėnesio modelis elektromagnetinių bangų slopai atmosferoje dėl vandens įtakos, *41-oji Lietuvos Nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2015 m. birželio 17-19 d.* Programa [http://lnfk.ftmc.lt/wp-content/uploads/LNFK_PROGRAMA.pdf].
- [K4] **M. Tamošiūnaitė**, 4G interneto silpnybės ir galimi sprendimai, pritaikant RTD/SL sistemas, 4-oji doktorantų mokslinė konferencija FizTech, Fizinių ir technologijos mokslų centras (2014).
- [K5] M. Zilinskas, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, M. Tamosiuniene, E. Stankevicius, The influence of atmospheric radio refractivity on the WiMAX signal level in the areas of weak coverage, The 36th PIERS, Prague, Czech Republic, European Union, 6-9 July, 2015.
- [K6] M. Zilinskas, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, E. Brilius, M. Tamosiuniene, Model for Determination of Territorial Distribution of Surface Radio Refractivity, *Progress In Electromagnetics Research Symposium, Stockholm, Sweden, Aug. 12-15, 2013, Abstracts*, 1302 (2013).
- [K7] A. Gruodis, **M. Tamošiūnaitė**, E. Valma, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas, Prediction of electromagnetic wave attenuation due to water in atmosphere. Variation of radio refractivity. 5th

- International Conference Innovative information technologies for science, business and education IIT-2012, May 10-12, 2012, Vilnius, Programme and Theses, p. 48 (Vilnius Business College, 2012).
- [K8] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, M. Tamošiūnienė, E. Valma, S. Tamošiūnas, Gradient of radio refractivity in troposphere, *PIERS 2012 Moscow, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Moscow, Russia, Aug. 19–23, 2012*, Program, p. 35.
- [K9] E. Valma, **M. Tamosiunaite**, S. Tamosiunas, M. Tamosiuniene, M. Zilinskas. Variation of radio refractivity with height above ground, *The 15th Int. Conf. on ELECTRONICS E 2011, May 17–19, 2011*, Kaunas and Vilnius, Lithuania.
- [K10] **M. Tamošiūnaitė**, A. Gruodis, M. Tamošiūnienė, S. Tamošiūnas, Elektromagnetinių bangų silpninimas dėl kritulių įtakos (Electromagnetic wave attenuation due to influence of precipitation), *39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konf., skirta Rutherfordo atomo modelio 100 metų jubiliejui paminėti, Vilnius, 2011 m. sp. 6–8 d. : Programa ir pranešimų tezės*, p. 254. ISBN 9789955634645. [elektroninis išteklius: <http://www.ff.vu.lt/sites/default/files/LNFK39_programa_0.pdf>].
- [K11] M. Žilinskas, S. Tamošiūnas, **M. Tamošiūnaitė**, M. Tamošiūnienė. *Determination of radio refractivity using meteorological data*. MIKON-2010 : 4th Microwave & radar week MRW-2010, 18th International conference on microwaves, radar, and wireless communications : Vilnius, Lithuania, June 14-16, 2010. Vol. 2. Vilnius, 2010.
- [K12] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. *Determination of radio refractive index meteorological data*. 14th International conference on electronics : conference program : May 18-20, 2010, Kaunas and Vilnius, Lithuania. [S.l.], 2010.
- [K13] **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. *Elektromagnetinių bangų silpninimas dėl lietaus Lietuvos vietovėse*. 38-

oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija: programa ir pranešimų tezės: Vilnius, 2009 m. birželio 8-10 d. Vilnius: Vilniaus universitetas, 2009.

- [K14] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. *Calculation of electromagnetic waves attenuation due to rain for various percentages time*. Progress in electromagnetics research symposium (PIERS 2009) : abstracts, Beijing, China, March 23-27, 2009 Beijing, 2009.
- [K15] M. Žilinskas, **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė. *The influence of the climatic peculiarities on the electromagnetic waves attenuation in the Baltic Sea region*. Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2008), Hangzhou, China, March 24-28, 2008: abstracts. Cambridge (MA): The Electromagnetics Academy, 2008.
- [K16] **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. *Influence of clouds on attenuation of electromagnetic waves*. Lithuanian Journal of Physics. Vol. 48, No. 1 (2008).
- [K17] S. Tamošiūnas, **M. Tamošiūnaitė**, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. *Attenuation due to rain for various percentages of time*. Radiation interaction with material and its use in technologies: International conference: Program and Materials. (2008).
- [K18] **M. Tamošiūnaitė**, S. Tamošiūnas, M. Tamošiūnienė, M. Žilinskas. *Debesų įtaka elektromagnetinių bangų sklidimui*. 37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija: programa ir pranešimų tezės, Vilnius, 2007 m. birželio 11-13 d. Vilnius: Vilniaus universitetas (2007).

Kita: IEEE Spectrum, <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/are-your-apps-sluggish-blame-summer>

2. Literatūros apžvalga

2.1. Pralaidumo juostos pločio problema

Telekomunikacijų sistemose informacija perduodama įvairių dažnių elektromagnetinėmis (EM) bangomis. Banga yra sugeneruojama ir išspinduliuojama siųstuve, perduodama aplinka ir priimama siųstos informacijos apdorojimui skirtame imtuve. Informacijos srautą perneša laike kintančios EM bangos. Kuo daugiau informacijos reikia perduoti, tuo platesnė turi būti dažnių juosta. Taigi, pralaidumo juosta W yra vienas iš pagrindinių faktorių, ribojančių informacijos perdavimo greitį C (bitai/s). Remiantis klasikine Shannon'o formule [25]:

$$C = W \log_2(1 + P/N_G), \quad (1)$$

čia P ir N_G atitinkamai yra vidutinės signalo ir triukšmo galios.

Sub-THz ir THz dažniuose galima rasti iki 120 GHz pločio spektro juostas, kuriose sugertis atmosferoje yra santykinai maža (esant tropinėms drėgmės sąlygoms), tačiau kyla daug iššūkių dėl sklidimo laisvoje erdvėje nuostolių (FSL, angl. *Free-Space-Loss*), rūko ir lietaus, kurie turi būti tinkamai įvertinti svarstant galimybes tam tikromis sąlygomis pritaikyti THz komunikacijas.

Bangos ilgio λ FSL nuostoliai gali būti įvertinti naudojant klasikinę Friis'o radijo jungties formulę [26]:

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} P_t, \quad (2)$$

čia P_r ir P_t yra priimta ir perduota galia, kurią priėmė ir perdavė antenos, kurių stiprinimas atitinkamai yra G_r ir G_t , esant nuotoliui d . Esant fiksuotam P_r/P_t santykiui, trumpesni bangų ilgiai turi būti kompensuojami arba sumažinant nuotolį d , arba didinant antenų stiprinimą G_r , G_t . Tačiau antenų galios gali būti didinamos tik tam tikrose ribose, kurias nustato higienos normos [27]. Ryšio aprėptis apibrėžiama kaip didžiausias galimas atstumas, kuriam esant vis dar būtų išlaikytas pakankamas signalo-triukšmo santykis (SNR, angl. *Signal-to-*

Noise-Ratio), o imtuve būtų priimamas patikimas signalas [28]. Tai yra viena iš pagrindinių priežasčių, dėl ko 5G tinklams, kurie veiks milimetrinėse bangose, bus naudojamos antenų sistemos su pluošto formavimu (angl. *beamforming*) [29] ir daugkartinio-įėjimo daugkartinio-išėjimo (MIMO, angl. *Multiple-input multiple-output*) signalo apdorojimo technikos [30]. Tačiau itin kryptingų antenų panaudojimas gali būti netrivialus netgi trumpuose atstumuose dėl problemų, susijusių su stovinčiomis bangomis ir antenų netiksliu tapatinimu (angl. *antenna misalignment*; tai situacija, kai siųstuvo ir imtuvo antenos viena kitos atžvilgiu yra sulygiuotos neteisingai) artimo lauko THz komunikacijų atveju [31].

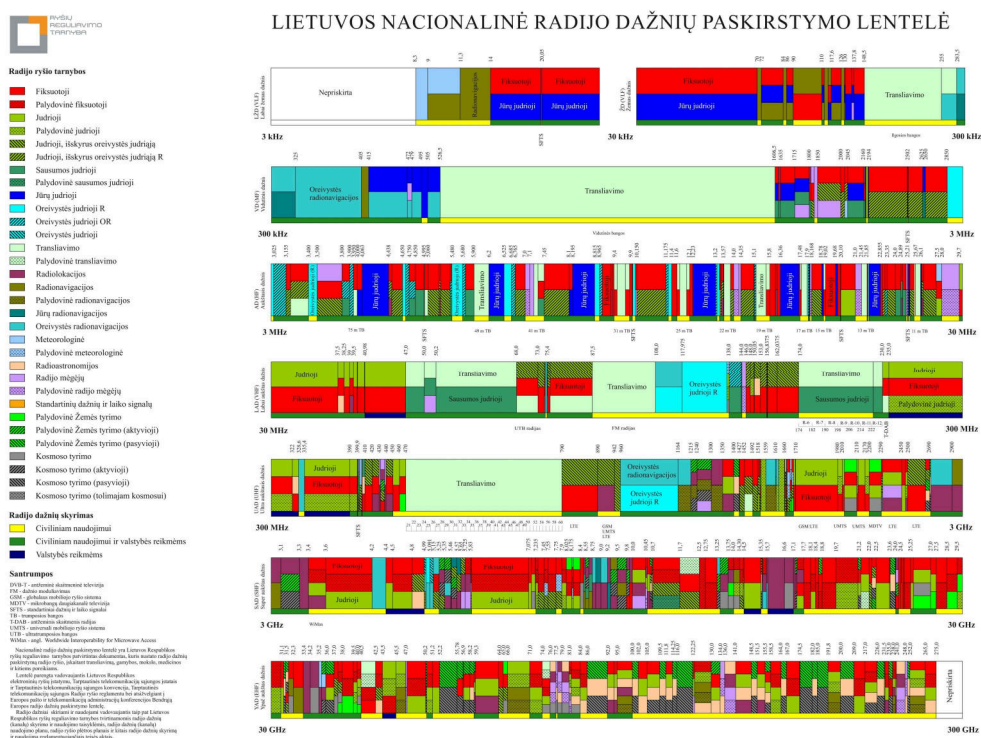
2.2. Bevielio ryšio sistemos

2.2.1. Radijo spektras ir jo reguliavimas

Radijo spektrą sudaro devynios dažnių juostos nuo labai žemų dažnių (VLF, angl. *very low frequency*) juostos ties 3 kHz, iki nepaprastai aukšto dažnio juostos (THF, angl. *tremendously high frequency*) [32] (300 GHz – 3 THz). Jeigu dvi ryšio linijos toje pačioje geografinėje vietovėje dalintųsi ta pačia dažnių juosta, vyktų interferencija, todėl radijo spektro pasiskirstymą tarptautiniu lygiu griežtai reguliuoja Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (ITU), o nacionaliniu lygiu – LR Ryšių reguliavimo tarnyba (RRT) (nacionalinė radijo dažnių paskirstymo lentelė pateikta 4 pav.). Kiekvienai ryšio linijai priskiriama tam tikra dažnių juosta, tam tikras spinduliavimo modelis ir maksimali leidžiama siųstuvo galia.

Radijo stotys, televizija ir mobilioji telefonija veikia labai aukšto dažnio (VHF, angl. *very high frequency*) ir itin aukšto dažnio (UHF, angl. *ultra high frequency*) juostose, kurių dažniai apima 30 MHz – 3 GHz, o bangos ilgiai yra 10 m – 10 cm. Žemesni dažniai būtų dar patogesni dėl didelių bangos ilgių, tačiau dėl laisvų plačių dažnių juostų trūkumo nėra tinkami plačiajuostėms komunikacijoms. Galingi UHF siųstuvai gali informaciją perduoti dideliais

atstumais dėl perduodamos energijos sklaidos nuo troposferos (žemiausias atmosferos sluoksnis) sluoksnuose esančių netolygumų. Tačiau jie išsklaido signalą daugeliu krypčių, todėl tik dalis perduoto signalo galios gali pasiekti imtuvą.



4 pav. Nacionalinė radijo dažnių paskirstymo lentelė (ilustracija iš www.rrt.lt).

Superaukšto dažnio (SHF, angl. *super high frequency*) ir ekstremaliai aukšto dažnio (EHF, angl. *extremely high frequency*) juostos yra 3 GHz – 300 GHz dažnio, 1 cm – 1 mm bangos ilgio, o juostų pločiai yra 30 MHz – 300 MHz eilės, todėl sudaro galimybes didelio greičio komunikacijoms [28]. Tačiau tokio aukšto dažnio bangos patiria nuostolius ne tik dėl silpninimo atmosferoje, bet ir pereidamos per pastatų sienas. Dėl smarkaus silpninimo atmosferoje ir didelių nuostolių dėl lietaus, šiuo metu EHF ir THF juostos yra mažiausiai užimtos juostos antžeminių komunikacijų taikymams, tačiau yra sėkmingai naudojamos palydovinio ryšio reikmėms.

Pasaulyje jau yra pradėtos 5G dažnių reguliavimo veiklos. Telekomunikacijų standartus belaidžio ryšio srityje plėtojantis projektas 3GPP (www.3gpp.com) 2017 m. gruodžio mėn. išleido pirmą oficialų 5G standartą, kuriame pasiūlė 5G technologiją vadinti „*New Radio*“ (NR) [33]. Išskiriamos dvi NR versijos: savarankiška (angl. *stand-alone*) ir nesavarankiška (angl. *non-stand-alone*). Numatoma, kad pirmiausia bus realizuota nesavarankiška NR versija, kurios pranašumas – galimybė diegimo metu panaudoti esamą infrastruktūrą [34]. Taip pat pradedamos ir THz dažnių reguliavimo veiklos sub-THz/THz srityje: 252-325 GHz dažnių juosta pavadinta THz PHY [35].

2.2.2. Evoliucija nuo 1G iki 5G/B5G

Pirmosios kartos, 1G, technologija pradėjo veikti dar 1981 m. – tai buvo ribotos aprėpties balso ryšiui skirta paslauga, kurios darbinis dažnis buvo 450 MHz (NMT, „Ericsson“ [36]), vėliau - 900 MHz [37]. 2G technologija pasaulyje pradėjo veikti 1991 m. 900, 1800 - 2000 MHz dažniuose, tačiau jos veikimas dar neatitiko lūkesčių. 2000 m. 1800 - 2200 MHz dažniuose pradėjo veikti 3G technologijos tinklai, kurių veikimas atitiko to meto lūkesčius ir suteikė prieigą prie įvairaus multimedijos turinio. 2G ir 3G technologijos tinklų patikimumas buvo geresnis nei ankstesnės kartos tinklų, be to, esant poreikiui, buvo galimybė persijungti į ankstesnės kartos tinklą. Dabartiniai 4G tinklai pradėjo veikti 2009 m. pabaigoje („Telia Sonera“ [38]) 700, 800 ir 2600 MHz dažniuose naudojant dvi technologijas: LTE (angl. *Long Term Evolution*) ir HSPA+ (angl. *Evolved High Speed Packet Access*). Buvo plėtojama ir trečia 4G technologija - WiMAX (angl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), tačiau ji taip ir netapo mobiliuoju ryšiu. Šios technologijos skiriasi naudojamomis galiomis, padengimu ir kaina [37].

Jeigu viskas vyks pagal planą, tikimasi, kad 5G technologija pradės veikti 2020 m. (oficialiai ji debiutavo 2018 m. Pyeongchang'o Olimpinėse žaidynėse). Perėjimas prie naujosios technologijos turėtų būti itin greitas, nes iki šiol

kiekviena telekomunikacijų karta būdavo pritaikoma greičiau nei ankstesnė [39]. Siekiant, kad 5G tinklai atitiktų lūkesčius, yra numatyti šeši technologiniai principai [40]:

- 1) Milimetrinės bangos. Didėjantis vartotojų ir išmaniųjų įrenginių skaičius bei jų generuojami duomenų srautai reiškia, kad visiems tenka mažiau pralaidumo ir mažėja greičiai. Todėl reikia pereiti prie dažnių, kurie iki šiol nebuvo naudojami tokio tipo paslaugoms. Milimetrinės bangos apima 30 – 300 GHz dažnių ruožą. Trūkumai: milimetrinės bangos negali lengvai pereiti pastatų ar kitų kliūčių, jas sugeria lapija ir lietus;
- 2) Maži narveliai (angl. *small cells*) ir tinklo infrastruktūros tankėjimas (angl. *densification*) (1 lentelė). Tai mažos kilnojamos bazinės stotys, kurioms reikia itin mažai galios. Numatoma, kad miestuose bus sumontuota tūkstančiai mažų narvelių (maždaug 250 m atstumais), tokiu būdu suformuojant tankų tinklą. Kuo mažesnis bangos ilgis, tuo mažesni gali būti antenos matmenys. Itin trumpų milimetrinių (ar sub-THz) bangų srityje veikiančių mažų narvelių antenos galės būti ženkliai mažesnės nei tradicinės antenos, todėl maži narveliai gali būti lengvai tvirtinami ant pastatų. Numatoma, kad tokia neįprasta tinklo infrastruktūra leistų kryptingiau ir efektyviau naudoti spektrą: esant daugiau bazinių stočių, jų naudojami dažniai galėtų būti naudojami kitų stotelių, esančių kitose zonose. Trūkumai: gali būti sudėtinga mažų narvelių tinklą įrengti užmiesčio vietovėse;
- 3) Dideli MIMO masyvai (angl. *massive MIMO*). 5G bazinės stotys galės turėti apie šimtą portų (žymiai daugiau nei dabartinės 4G antenos), kas reiškia, kad viename masyve galėtų tilpti dešimtytys ar net šimtai antenų, todėl bazinė stotis galėtų vienu metu aptarnauti žymiai daugiau vartotojų ir tinklo pajėgumus padidinti apie 22 kartus [41]. Trūkumai: signalų interferencijos tikimybė.

- 4) Pluošto formavimas (angl. *beamforming*). Tai yra srauto paskirstymas bazinėms stotims, identifikuojant efektyviausią kelią iki konkretaus vartotojo ir taip sumažinant MIMO masyvuose atsirandančios interferencijos tikimybę. Yra kelios galimybės tai įgyvendinti. MIMO bazinėje stotyje signalo apdorojimo algoritmai numato geriausią signalo perdavimo kelią iki kiekvieno vartotojo. Taip pat būtų galima išsiųsti atskirus duomenų paketus skirtingomis kryptimis, o jie atsispindėtų nuo pastatų ir kitų objektų tiksliai numatytu keliu. Pluošto formavimas padėtų nukreipti signalą koncentruotu spinduliu tik vartotojo kryptimi, taip padidinant signalo galimybes nepažeistam pasiekti tikslą.
- 5) Pilnas duplexas (angl. *full duplex*). Milimetrinėmis bangomis ir MIMO technologija padidinus duomenų perdavimo spartą ir spektro efektyvumą, taip pat stengiamasi pasiekti didelį pralaidumą ir itin trumpą delsos laiką, todėl bus naudojama pilno duplexo technologija, t.y. siųstuvai-imtuvai signalus perduos ir priims vienu metu. Dabartinės bazinės stotys vienu metu tuo pačiu dažniu perduoda ir priima informaciją pakaitomis. Prireikus vienu metu ir priimti, ir perduoti informaciją, naudojami skirtingi dažniai. Neseniai buvo pademonstruoti silicio tranzistoriai, veikiantys kaip itin greitai jungikliai [42], kurie sustabdo bangų grįžimą, todėl bus galimybė transliuoti ir priimti signalus tuo pačiu dažniu vienu metu. Tai dvigubai padidins spektro efektyvumą. Trūkumai: atsiranda daugiau signalo trukdžių, todėl reikalinga speciali aido pašalinimo technologija.
- 6) Daiktų internetas (IoT, angl. *Internet of Things*), kuris per artimiausius dešimtmečius apjungs milijardus [43], [44] prie interneto prijungtų fizinių įrenginių, rinks informaciją ir ją perduos į internetą tolesniam apdorojimui ir panaudojimui konkrečiam veiksmui atlikti [45]. Numatoma, kad IoT ženkliai prisidės prie išmaniųjų miestų kūrimo (angl. *Smart Cities*) [46] ir ketvirtosios

pramonės revoliucijos (angl. *Industry 4.0*) [47]. Atskiras IoT atvejis yra „įrenginio įrenginiui“ (M2M, angl. *Machine-to-Machine*) technologijos, leidžiančios įrenginiams keistis informacija tarpusavyje be žmogaus įsikišimo [48].

1 lentelė. Mažų narvelių tipai pagal taikymo sritį ir vartotojų skaičių [49].

Narvelio tipas	Išėjimo galia (W)	Veikimo spindulys (km)	Vartotojų skaičius	Taikymai
Femto-narvelis	0,001 – 0,25	0,010 – 0,1	1 – 30	Vidaus
Piko-narvelis	0,25 – 1	0,1 – 0,2	30 – 100	Vidaus/lauko (aplink pastatą)
Mikro-narvelis	1 – 10	0,2 – 2,0	100 – 200	Vidaus/lauko (mieste)
Makro-narvelis	10 - > 50	8 – 30	> 2000	Lauko (priemiesčiuose)

Nors numatoma, kad 5G technologija užtikrins galimybę perduoti didesnius duomenų srautus ir sumažinti delsą, ji pilnai nepakeis šiuo metu veikiančios 4G technologijos. 5G tiesiog padidins taikymų įvairovę, ko negali pasiūlyti 4G, todėl manoma, kad abi technologijos bus vystomos kartu [49]. Naujos technologijos pradedamos vystyti daug anksčiau nei jos yra pritaikomos vartotojui, todėl nenuostabu, kad vis dar vykstant varžyboms kas greičiau pradės naudoti 5G, jau yra svarstoma apie šeštosios kartos, B5G arba 6G (naudojami abu terminai), technologiją [50], kuri veiks sub-THz/THz dažnių ruožuose. Šios technologijos kūrėjai yra ambicingi: numatoma sukurti bazines stotis, kurios galėtų vienu metu išspinduliuoti tūkstantį signalų, ir pasiekti 10 Gb/s spartą, o viena bazinė stotis galėtų perduoti 10 Tb/s duomenų [50], tačiau sub-THz/THz dažnių silpninimas atmosferoje yra viena iš didžiausių kliūčių.

2.3. Silpninimas atmosferoje

2.3.1. Atmosferos sudėtis

Atmosfera yra dujinis apvalkalas, drauge su jame esančiais aerzoliais judantis kartu su Žeme ir dėl didelės jos masės, traukos jėgos bei santykinai žemos dujų temperatūros išsilaikantis prie paviršiaus [51]. Atmosferą sudarantis dujų mišinys vadinamas oru. Kaip ir kitos dujos, oras gali būti suspaudžiamas, todėl jo tankis didėjant aukščiui mažėja, o jo savybes apibūdina slėgis, temperatūra, tankis ir cheminė sudėtis. Augant temperatūrai, o dujų tūriui nesikeičiant, molekulių judėjimo greitis didėja, o kartu auga ir slėgis. Jo dydis labai priklauso nuo aukščio, todėl išmatuotas slėgis yra perskaičiuojamas jūros lygiui (kinta nuo 830 iki 1083,8 hPa). Oro temperatūra yra oro molekulių judėjimo greičio (kinetinės energijos) išraiška – kuo greičiau juda oro molekulės, tuo aukštesnė yra oro temperatūra. Dažnai literatūroje galima pamatyti sąvoką „*standartinės sąlygos*“. Tarptautinės standartinės atmosferos apibrėžime tai yra vidutinė 15°C temperatūra ir 1013,25 hPa slėgis.

Sausą orą daugiausiai sudaro dvi pagrindinės dujos – azotas (N₂) ir deguonis (O₂), o likusį 1% tūrio sudaro Argonas (Ar), anglies dioksidas (CO₂) ir labai mažai neono (Ne). Į oro sudėtį kartu su kitomis dujomis patenka ir vandens garai, kurių dalis ore labai kinta: nuo šimtųjų procento dalių iki keleto procentų. Todėl meteorologijoje dažnai atskirai nagrinėjamas „*sausas oras*“ (be vandens garų) ir „*drėgnas oras*“ (2.3.7 ir 3.3 bus nagrinėjamas atmosferos lūžio rodiklis (arba koeficientas), kurio išraiškoje yra sausoji ir drėgnoji dalys). Taip pat oro sudėtyje gali būti smulkių, santykinai nedidelės masės kietų ir skystų ore pakibusių dalelių – aerzolių (dulkės, žiedadulkės, miško gaisrų, kuro deginimo produktai ir t.t.). Jų koncentracija mažėja tiek didėjant aukščiui, tiek horizontalia kryptimi tolstant nuo patekimo į orą vietos (tačiau į orą patekusius aerzolius aukštyn einantys oro srautai pakelia į viršų ir gali nunešti dideliu atstumu). Stambūs aerzoliai nusėda ant paviršiaus per keliolika minučių, o smulkiausias dalelės ore gali išsilaikyti net keletą metų [51]. Kai kurie aerzoliai turi didelę

reikšmę vandens garų kondensacijai atmosferoje, kadangi apie juos formuojasi vandens lašeliai, debesys, dėl jų gali iškristi didesnis kritulių kiekis.

Vandens garai į atmosferą patenka garavimo nuo žemės paviršiaus metu. Vykstant oro maišymuisi dalis vandens garų patenka į aukštesnius atmosferos sluoksnius, bet 99% vandens garų kaupiasi troposferoje. Didėjant aukščiui vandens garų koncentracija greitai mažėja (taigi didesnis antenų aukštis padėtų sumažinti silpninimą dėl vandens garų). Kuo aukštesnė oro temperatūra, tuo daugiau ore gali būti garų būsenos vandens. Oro drėgmė kinta paros metu. Ryte kylant oro temperatūrai prasideda intensyvus garavimas nuo paviršiaus, todėl vandens garų kiekis ore išauga. Pirmoje dienos pusėje virš išilusio paviršiaus pradeda vykti turbulencija, kuri ypač sustiprėja apie vidurdienį. Tada vandens garais prisotintas oras juda aukštyn, o iš aukštesnių sluoksnių nusileidžia sausesnis oras. Garavimas nuo paviršiaus nespėja kompensuoti drėgmės nuostolių, ir vandens garų slėgis sumažėja. Artėjant vakarui turbulencija silpnėja, o garavimas nuo paviršiaus vis dar pakankamai stiprus, todėl vandens garų slėgis vėl pradeda augti. Nakties valandomis garavimas beveik visiškai nutrūksta, o atvėsus paviršiui prasideda vandens garų kondensacija – iškrinta rasa, formuojasi rūkas, todėl vandens garų kiekis ore sumažėja [51].

Vandens garų slėgio metinė kaita sutampa su temperatūros kaita. Metinė vandens garų slėgio amplitudė yra tuo didesnė, kuo didesnė metinė temperatūros amplitudė. Tai reiškia, kad žemyninio klimato atveju ji yra didesnė nei jūrinio klimato sąlygomis. Didėjant aukščiui vandens garų slėgis mažėja. Santykinės oro drėgmės svyravimai giedromis dienomis yra žymiai didesni nei debesuotomis, nes yra didesnė paros oro temperatūros amplitudė. Mažesni oro temperatūros svyravimai lemia mažesnius santykinės oro drėgmės pokyčius šaltuoju metų laikotarpiu. Santykinės oro drėgmės metinė kaita yra atvirkščiai proporcinga oro temperatūrai: žiema ji yra didžiausia, o pavasario pabaigoje bei vasarą – mažiausia.

Realioje atmosferoje vertikalus slėgio, temperatūros ir tankio gradientai (kaita vertikalia kryptimi) būna labai įvairūs. Atmosferos slėgio kaita vertikalia

kryptimi yra apibrėžiama bariniais žingsniais – tai slėgio vertikaliam gradientui atvirkščias dydis, kuris yra tiesiogiai proporcingas oro temperatūrai ir atvirkščiai proporcingas atmosferos slėgiui [51]. Išaugus temperatūrai 1°C, barinis žingsnis padidėja apie 0,4%. Mažėjant slėgiui, barinis žingsnis taip pat mažėja. Vertikalaus temperatūros gradiento dydis priklauso nuo paros bei metų laiko, aukščio ir kitų veiksnių. Apatiniame kelių ar keliolikos kilometrų atmosferos sluoksnyje jis dažniausiai būna teigiamas, nes oras šyla nuo paviršiaus ir didėjant aukščiui jo temperatūra mažėja. Tačiau dažnai pasitaiko, jog temperatūra didėjant aukščiui ne krinta, o kyla – toks temperatūros pasiskirstymas vertikaloje skalėje vadinamas inversija. Kadangi oro tankis yra tiesiogiai proporcingas atmosferos slėgiui ir atvirkščiai proporcingas oro temperatūrai, jis taip pat kinta vertikalia kryptimi. Didžiausią įtaką šiam kitimui daro atmosferos slėgis, kuris didėjant aukščiui visada mažėja. Temperatūros poveikis nėra toks didelis.

Slėgio, temperatūros ir tankio pokyčiai įtakoja atmosferos lūžio rodiklio ir jo gradiento pokyčius.

2.3.2. Nuostolių atmosferoje mechanizmai

Visos EM bangos daugiau ar mažiau kinta sklisdamos atmosferoje. Sklidimo kelias gali būti tiesi linija arba užlinkimas aplink įvairius kelyje pasitaikiusius objektus. Yra trys pagrindiniai nuostolių mechanizmai [28]:

1. Triukšmai (atsitiktiniai, nenuspėjami, nepageidaujami elektromagnetiniai signalai);
2. Iškreipimai (bet kokie nepageidaujami amplitudės ar fazės pokyčiai);
3. Silpninimas (angl. *attenuation*) dėl
 - a. Sklaidos;
 - b. Sugerties;
 - c. Nuokrypio nuo sklidimo krypties.

Siekiant išvengti triukšmų ir iškraipymų, sukurta įvairių moduliacijos ir kodavimo sistemų, didinamas signalo-triukšmo santykis.

Skaidos ir sugerties mastai skirtingose spektro srityse skiriasi.

2.3.3. Elektromagnetinių bangų sklaidos tipai

Skaidos tipas ir mastas priklauso nuo kelyje pasitaikiusių dalelių dydžio, kiekio, sklindančios bangos ilgio, taip pat nuo dalelių koncentracijos, kuri kinta tiek dienos metu, tiek keičiantis metų laikams. Pagal tai sklaida skirstoma į tris kategorijas (2 lentelė).

2 lentelė. Elektromagnetinių bangų sklaidos tipai (paruošta remiantis [52]).

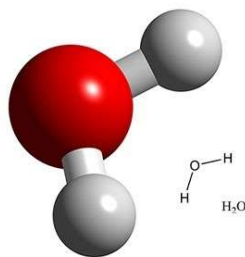
Skaidos tipas	Skaidos intensyvumas	Dalelių dydis	Dalelių tipas	Skaidos mechanizmas
Relėjaus (angl. <i>Rayleigh scattering</i>)	$\sim \lambda^{-4}$	$< 1 \mu\text{m}$	Oro molekulės	<p>Pasireiškia, kai dalelių matmenys yra mažesni už bangos ilgį.</p> <p>Efektas λ^{-4}, todėl trumpesnės bangos sklaidomos labiau nei ilgesnės bangos.</p> <p>Nesant šios sklaidos, dangus atrodytų juodas.</p>
Mi (angl. <i>Mie scattering</i>)	$\sim \lambda^0$ iki λ^{-4}	Nuo 0,1 iki $10 \mu\text{m}$	Dūmai, migla, aerozoliai (dujų, vandens garų ir dulkių mišinys)	<p>Pasireiškia, kai dalelių matmenys yra bangos ilgio eilės.</p> <p>Vyksta žemesniuose atmosferos sluoksniuose.</p> <p>Dominuoja esant debesuotumui.</p> <p>Įtakoja visą spektrą.</p>
Neselektyvi (angl. <i>non-selective</i>)	$\sim \lambda^0$	$> 10 \mu\text{m}$	Dulkės, rūkas, debesys, vandens lašai	<p>Pasireiškia, kai dalelių matmenys yra ženkliai didesni nei bangos ilgis.</p> <p>Visas spektras įtakojamas vienodai.</p> <p>Dėl šios sklaidos debesys atrodo balti (juose esantys vandens lašai visus bangos ilgius sklaido vienodai).</p>

2.3.4. Sugertis dėl atmosferoje esančių dujų

Sugertis vyksta, kai sklindančios EM bangos dažnis yra tos pačios eilės kaip atmosferos sudėtinių dujų rezonansiniai dažniai. Molekulių rezonansinius dažnius galima rasti HITRAN duomenų bazėje [53]. Silpninimą dėl dujų, γ_g (dB/km), standartinėje atmosferoje galima apskaičiuoti naudojant [54] aprašytas procedūras, skirtas dažniams iki 1 THz.

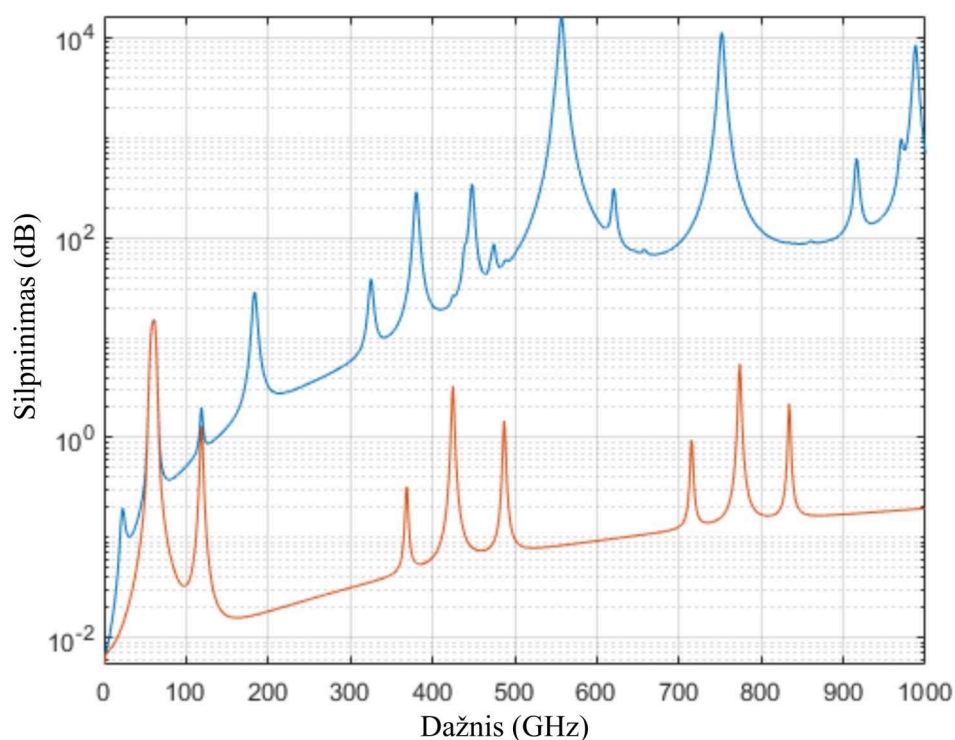
Labiau nei bet kuri kita spektro sritis, sub-THz/THz dažnio EM bangos yra itin pažeidžiamos dėl kelyje pasitaikančių polinių vandens molekulių (5 pav.), turinčių stiprias sugerties linijas [55]. Išlenktose vandens molekulėse deguonies molekulės traukia vandenilio atomus (vandenilinis ryšys), todėl deguonies dalis tampa neigiamai įelektrinta, o vandenilio – teigiamai įelektrinta. Skystyje vandens molekulės orientuojasi taip, kad teigiamas molekulės polius būtų kuo arčiau neigiamo kitos molekulės poliaus. Stipriame elektriniame lauke vandens molekulės sukasi, kol poliai susilygiuoja su elektriniu lauku. Tuo metu vandens molekulės sukasi, trunkosi viena į kitą ir šyla [IP7], t.y., vanduo sugeria dalį EM energijos ir paverčia ją šilumine energija. Vandens savitoji šiluma yra didelė, todėl jis sugeria daug šilumos.

Taigi, nors vandens garai yra nedidelė atmosferos sudedamoji dalis, kartu su deguonimi yra pagrindinė silpninimo atmosferoje dėl dujų priežastis. Todėl silpninimas dėl dujų, γ_g , yra silpninimo dėl vandens garų ir deguonies suma, padauginta iš atstumo.



5 pav. Vandens molekulė.

Sugerties atmosferoje spektras (6 pav.) kinta nepastoviai – jame yra santykinio skaidrumo sričių tarp sugerties pikų. Tokios sugerties spektro dalys vadinamos pralaidumo langais. Esant standartinėms atmosferos sąlygoms, pralaidumo langai randami ties maždaug $<0,300$, $0,330\text{--}0,370$, $0,390\text{--}0,440$, $0,625\text{--}0,725$ ir $0,780\text{--}0,910$ THz. Kai sklindančios bangos dažnis viršija 1 THz, ji patiria kritinę sugertį atmosferoje [6]. Sugerties dėl vandens garų laikinės skyros spektroskopijos būdu (THz-TDS) charakterizavimo 0,2 – 2 THz dažnių srityje rezultatai gerai sutapo su žinomais duomenimis silpnoms vandens linijoms, tačiau atskleidė didesnę silpninimą pralaidumo languose tarp šių linijų [56].



6 pav. Silpninimo dėl atmosferoje esančių dujų spektras 1 – 1000 GHz dažniams (jūros lygyje, kai atmosferos slėgis yra 1013 hPa, temperatūra yra 15°C, vandens garų tankis yra $7,5 \text{ g/m}^3$ (mėlyna linija) ir 0 (raudona linija)). Apskaičiuota pagal ITU-R metodiką [S-21] naudojant MATLAB programinį paketą ir funkciją *gaspl*.

2.3.5. Silpninimas dėl vandens

Netgi saulėtomis dienomis atmosferoje yra visų trijų agregatinių būsenų vandens: skystojo (lietus, rūkas, debesys), kietojo (snaigės, ledo kristalai) ir dujinio (vandens garai, žr. 2.3.4 dalį). Bet kurio agregatinio būvio vanduo, esantis EM bangos sklaidimo kelyje, yra kliūtis. Pagrindinės silpninimo dėl vandens priežastys yra sklaida ir sugertis. Kuris iš šių reiškinų dominuos, priklauso nuo sklindančios bangos ilgio santykio su lašų matmenimis: kai bangos ilgis yra santykinai didelis, palyginus su lašų matmenimis, dominuoja sklaida; priešingu atveju dominuoja sugertis [57]. Kuo aukštesnis sistemos darbinis dažnis, tuo didesnis silpninimas dėl lietaus, debesų, rūko, sniego ir t.t.

Skirtingų agregatinių būvių vandens indėlis yra nevienodas. Pavyzdžiui, silpninimas dėl sniego yra mažesnis nei silpninimas dėl lietaus, o į silpninimą dėl sauso sniego mikrobangų juostoje gali būti visai neatsižvelgiama [58]. Rūkas ir debesys sub-THz dažniuose gali būti traktuojami kaip lengvi lietūs. Silpninimo dėl rūko vertė yra proporcinga dažniui, temperatūrai ir jį sudarančio skysto vandens kiekiui (jam didėjant, mažėja matomumas) [P2]. Kadangi didėjant dažniui silpninimo dėl rūko vertė taip pat didėja, maždaug ties 1 THz silpninimas dėl rūko jau viršija silpninimą dėl stipraus lietaus. Silpninimas dėl debesų priklauso nuo jų tipo [P2].

EM bangų silpninimas dėl lietaus yra vienas iš labiausiai pastebimų nuostolių, kai sistemos darbinis dažnis didesnis nei 10 GHz [59]. Iki 10 GHz silpninimas dėl sugerties atmosferoje (angl. *atmospheric absorption*) ir lietaus (angl. *rainfall loss*) bendruoju atveju gali būti ignoruojami, nes laikoma, kad juos užgožia triukšmai [59].

Silpninimas dėl lietaus yra išreiškiamas kaip funkcija, priklausanti nuo lietaus intensyvumo, R (mm/h) (lietaus skirstymas pagal intensyvumą yra pateiktas 3 lentelėje), kuris priklauso nuo skysto būvio vandens kiekio ir lašų kritimo greičio, kuris savo ruožtu priklauso nuo lašų dydžio pasiskirstymo

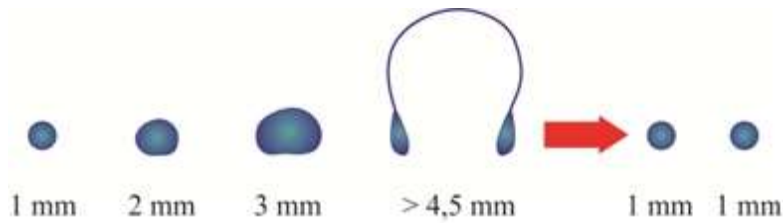
(DSD, angl. *drop size distribution*). Yra žinoma įvairių lašų dydžio pasiskirstymų (toliai šiame darbe bus naudojamas Weibull'o pasiskirstymas).

Modeliuojant lašai laikomi kintančio skersmens sferomis. Ypatingai tiksliai aprašyti EM bangos ir lietaus lašų sąveiką trukdo lašo forma, kuri priklauso nuo lašo dydžio. Iš tiesų tik labai maži lašai yra taisyklingos sferos formos. Tokie lašai susiformuoja debesyse ant kondensacijos branduolių. Po to lašai tarpusavyje jungiasi, vyksta evoliucija į didesnius lašus. Dėl didelio paviršiaus įtempimo vandens molekulės gerai laikosi kartu. Didesnių nei 1 mm lašų forma nebėra sferinė, nes krisdami jie susiploja ir išlįsta horizontalia kryptimi (7 pav.). Kai lašo dydis pasiekia 3 mm, jo apačioje paviršiaus įtempimas nebeatlaiko oro pasipriešinimo, atsiranda įdubimas, kuris didėja, o lašo dydžiui pasiekus 4,5 mm ir daugiau, padalina lašą į dvi sujungtas dalis. Galiausiai lašas suyra, susiformuoja du nauji lašeliai, ir procesas prasideda iš pradžių [43].

3 lentelė. Lietaus skirstymas pagal intensyvumą R [60].

Lietaus tipas	R (mm/h)
Dulksna	$\leq 0,25$
Lengvas lietus	0,26 – 1,00
Vidutinis lietus	1,01 – 4,00
Smarkus lietus	4,01 – 16,00
Audra	16,01 – 35,00
Ekstremalus lietus	35,01 – 100,00

Be to, vandens molekulės dėl Rayleigh'aus sklaidos veikia kaip nekryptinės antenos, perspinduliuojančios sklindančios EM bangos energiją įvairiomis kryptimis [57]. Taip pat paminėtina didelė vandens dielektrinė konstanta, dėl ko vanduo tampa nuostolinga dielektrine terpe.



7 pav. Lietaus lašo evoliucija. Didesnių nei 1 mm lašų forma nebėra sferinė, nes krisdami jie susiploja ir ištįsta horizontalia kryptimi. Kai lašo dydis pasiekia 3 mm, jo apačioje paviršiaus įtempimas nebeatlaiko oro pasipriešinimo. Atsiranda įdubimas, kuris didėja, o lašo dydžiui pasiekus 4,5 mm ir daugiau, padalina lašą į dvi sujungtas dalis. Galiausiai lašas suyra, susiformuoja du nauji lašeliai, ir procesas prasideda iš pradžių (ilustracija iš [NP1]).

2.3.6. Silpninimas dėl kitų atmosferoje esančių dalelių

Atskira kategorija yra aerozoliai [61] bei dūmų ir dulkių dalelės, kurių indėlis į bendrą silpninimą bendruoju atveju yra minimalus, tačiau išauga karo ir gaisrų zonose [7]. Apie aerozolius gali formuotis vandens lašai, debesys ir iškristi didesnis kritulių kiekis [51].

2.3.7. Atmosferos lūžio rodiklis

Atmosferos lūžio rodiklis (angl. *atmospheric refractive index*), n , yra sklindančios EM bangos greičio tuščioje erdvėje ir jos sklidimo greičio tam tikroje realioje erdvėje santykis [59]. Jis įtakoja EM bangų sklidimą, nes keičia jų judėjimo greitį ir kryptį. Nevienodi EM bangų išlinkimai atmosferoje pasireiškia, kai radijo bangos keliauja skirtingais greičiais skirtingos dielektrinės skvarbos medžiagose. Vanduo yra lėtesnė terpė nei oras, todėl sklidimo kelyje sutikusi vandens lašų, EM banga jų viduje juda lėčiau, o riboje tarp oro ir lašo skirtingos bangos dalys lašą pasiekia ne vienu metu, todėl užlinksta. Be to, dalis bangos energijos tiesiog atsispindi. Kalbant ne apie pavienius lašus, o atmosferos sluoksnius, esant standartinėms sąlygoms atmosferos lūžio rodiklis mažėja didėjant aukščiui (nes kylant aukštyn atmosferoje temperatūra, oro drėgmė ir slėgis mažėja, todėl mažėja ir oro dielektrinė skvarba). Tai reiškia, kad

viršutinės spindulio dalys juda greičiau, todėl spindulys šiek tiek išlinksta link Žemės paviršiaus. Dėl to signalas gali sklisti toliau matomos geometrinės horizonto linijos. Laikini trikdžiai atmosferoje gali keisti lūžio rodiklio profilį, dėl ko spindulys užlinksta kitaip nei numatyta, todėl gali visai nepasiekti imtuvo antenos. Be to, atmosferos lūžio rodiklio pokyčiai gali suardyti atmosfera sklindančios bangos fazinį frontą [7].

Atmosferos lūžio rodiklio vertė yra artima vienetui (netoli jūros lygio $n = 1,0003$), o jos pokyčiai yra stebimi tik ketvirtame skaičiuje po kablelio. Tačiau net ir šie maži pokyčiai yra reikšmingi. Siekiant išryškinti atmosferos lūžio rodiklio pokyčius, praktikoje dažniau naudojamas lūžio koeficientas (angl. *refractivity*), N , apskaičiuojamas iš atmosferos lūžio rodiklio vertės atimant sveikąją dalį ir gautą skaičių padidinant milijoną kartų. Lūžio koeficientas gali būti apskaičiuotas kaip funkcija nuo temperatūros, atmosferos slėgio ir dalinio garų slėgio. Kintant šiems dydžiams, stebimi lūžio koeficiento pokyčiai [62]. Pažymėtina, kad net nedideli temperatūros, drėgmės ir dalinio vandens garų slėgio pokyčiai² sąlygoja atmosferos lūžio rodiklio pokyčius [63], [64].

Atmosfera sklindanti EM banga tuo stipriau išlinksta, kuo didesnę lūžio rodiklio kitimą sutinka savo kelyje. Bangos išlinkimui nusakyti naudojamas K-faktorius, kuris yra lygus lygiaverčio žemės spindulio ir tikrojo žemės spindulio santykiui [59].

Visų aptartų nuostolių mechanizmų visuma įtakoja sklidimo terpės³ pasirinkimą. Kitaip nei laidinėje ar optinėje terpėje, atmosferoje EM bangos sklidimo terpė kinta priklausomai nuo paros laiko, metų laiko, troposferoje esančių vandens lašų tankio pokyčių, drėgmės gradiento kitimo, įvairių kliūčių EM sklidimo kelyje ir t.t.

² Lietuva priklauso padidinto drėgnumo zoni: santykinė drėgmė yra apie 70% pavasarį ir vasarą, kai tuo tarpu žiemą ji siekia 85 – 90% [66]. Taip pat yra stebimos didelės temperatūrinės fliktuacijos: skirtumas tarp šilčiausio ir šalčiausio mėnesių yra 21,8°C [67].

³ Sklidimo terpė gali būti oras, šviesolaidis ir t.t.

Taigi, kuriant aplinkos įtakai jautrias 5G/B5G technologijas, dizainas ir slopinimo reiškinų supratimas tampa svarbiu dalyku. Reikia parinkti tinkamiausias metodikas, patikrinti jų veikimą realiais (ekstremaliais) atvejais. Modeliavimo metodikos aprašytos 3 skyriuje, o modeliavimo naudojant realius meteorologinius duomenis rezultatai yra pateikti 4 skyriuje.

2.4. Galios biudžeto analizė

2.4.1. Priimto signalo lygio skaičiavimas

Projektuojant naujas ryšio stotis reikia atsižvelgti į daugybę faktorių, kurie yra plačiai aprašyti R. Freeman knygoje [59] ir reguliuojami Tarptautinės telekomunikacijų sąjungos Radijo komunikacijų sektoriaus (ITU-R) standartais (<https://www.itu.int/pub/R-REC>). Nuostoliai dažniausiai vertinami decibelais ($10 \log (P_r/P_t)$ (dB)⁴). Norint įvertinti, kokios galios signalas pasieks imtuvą, atliekama biudžeto analizė.

Bendruoju atveju ryšio sistemų galios biudžeto analizės procedūra yra tokia [59]:

- 1) Apskaičiuojama efektyvioji izotropinės spinduliuotės galia EIRP (angl. *effective isotropic radiated power*). Ji parodo galią, kurią turėtų spinduliuoti hipotetinė izotropinė antena, kad būtų gautas toks pat signalo lygis nustatytos antenos maksimalaus spinduliavimo kryptyje. Ji apskaičiuojama kaip siųstuvo galios (dBm) bangolaidžio jungėje, jungčių slopinimo (dB) (nuostolis, todėl su minuso ženklu) ir siųstuvo stiprinimo (dBi) suma.
- 2) Atimami FSL ir kiti sklidimo terpėje patiriami nuostoliai P_L ;
- 3) Pridedamas imtuvo antenos stiprinimas G_r ;
- 4) Atimami kiti linijos nuostoliai (angl. *line losses*) L_{Lr} :

⁴ Silpninimas, lygus 0 dB, reikštų, kad signalas sklidimo terpę praėjo be nuostolių.

$$RSL = EIRP - FSL - P_L + G_r - L_{L_r}, \quad (3)$$

čia RSL yra priimto signalo lygis (angl. *received signal level*) (dBW).

Literatūros šaltiniuose THz ryšio sistemų galios biudžeto analizė paprastai atliekama langui, kurio centrinis dažnis yra 300 GHz, nes čia turima eksperimentinių duomenų, tačiau norint užtikrinti stabilias Tbps (terabitai per sekundę, angl. *terabits per second*) linijas reikės naudoti arba aukštesnio dažnio langus, arba kelis langus vienu metu [65].

2.4.2. FSL ir kiti sklidimo terpėje patiriami nuostoliai

EM bangai sklindant atmosfera visada patiriami laisvo sklidimo, FSL, nuostoliai, kurie gali būti įvertinti naudojant Friis'o formulę (2) [26]. Pavyzdžiui, FSL nuostoliai 300 GHz dažnio signalui, sklindančiam 10 m atstumu, yra 100 dB [66]. Tačiau atmosferoje yra įvairių rūšių kliūčių ir dalelių, kurios papildomai silpnina ir išsklaido sklindančią bangą. Bendroju atveju jų indėlį į silpninimą galima numatyti atliekant kelių lygių modeliavimą. Tam yra reikalingi meteorologiniai duomenys (lietaus intensyvumas, temperatūra, drėgmė ir t.t.).

Linijos nuostoliai priklauso nuo dažnio ir yra apskaičiuojami kaip:

$$A_{\text{sum}} = 92,45 + 20\log F + 20\log(d_l) + A_g + A_r + A_{O_2} + A_d + A_l, \quad (4)$$

čia F yra dažnis (GHz), d_l yra linijos ilgis (km), A_g yra silpninimas dėl vandens garų (dB), A_r yra silpninimas dėl miglos ir rūko (dB), A_{O_2} yra silpninimas dėl atmosferos deguonies (dB), A_d yra sugerties nuostoliai dėl kitų dujų (dB), A_l yra silpninimas dėl lietaus (dB).

2.4.3. THz ryšio sistemų galios biudžeto analizė

Nuostoliai sklidimo terpėje THz atveju yra labai dideli. Aplinkos keisti negalime, todėl projektuojant naujas ryšio sistemas svarbu kuo tiksliau atlikti galios biudžeto analizę - įvertinti nuostolius sklidimo terpėje, galimus siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientus, siųstuvo galios ir imtuvo jautrumo lygius. Kitas žingsnis – sistemų komponentai, kurie turi kuo labiau sumažinti nuostolius.

Ryšio sistemų galios biudžeto skaičiavimo procedūra yra aprašyta 2.4.1 dalyje. Šioje dalyje reikėtų trumpai priminti, kad sugerties dėl atmosferoje esančių dujų spektras yra pateiktas 6 pav., o sugerties spektro dalys tarp sugerties pikų yra vadinamos (pralaidumo) langais. Literatūroje THz ryšio sistemų galios biudžeto analizė paprasta atliekama langui, kurio centrinis dažnis yra 300 GHz. FSL nuostoliai (2) [26] 300 GHz dažniui, kai siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimas yra 25 dBi⁵, yra apie 40 dB/m. Vien dėl FSL nuostolių signalo stiprumas didėjant nuotoliui visada mažėja. Vertinant silpninimą dėl lietaus, paprastai laikoma, kad tai yra stiprus lietus, kurio intensyvumas yra $R = 25$ mm/h. Tokiu atveju laikoma, kad 300 GHz dažnio EM bangos silpninimas dėl lietaus yra apie 10 dB/km. Tačiau, kaip bus pademonstruota 4.1 dalyje, stipraus lietaus intensyvumo vertės gali būti kelis kartus didesnės, o tada padidėja ir silpninimo dėl lietaus vertė. Silpninimo dėl rūko vertė ties 300 GHz atitinka lengva lietu, tačiau didėja proporcingai dažniui.

Norint užtikrinti stabilias Tbps linijas, reikės naudoti arba aukštesnio nei 300 GHz centrinio dažnio langus, arba kelis langus vienu metu [65]. [67] buvo atlikta teorinė THz ryšio sistemų biudžeto analizė 300-900 GHz dažnių ruože. Išskirti penki atmosferos langai, kuriuose tikimasi didžiausio juostos pločio ir mažesnio nei 100 dB/km silpninimo (4 lentelė). Toliau buvo daromos prielaidos, kad juostos pločio žingsnis yra 1 GHz, perduodama galia (angl. *transmit power*)

⁵ dBi yra izotropinės antenos galios (EIRP) matas, [dB] \approx [dBi] – 2,15.

yra 10 dBm⁶ (šis dydis pasirinktas kaip tuo metu maksimalus technologiškai tikėtinas, tačiau yra nuomonių, kad jis galėtų būti didesnis [68]), triukšmo rodiklis (angl. *noise figure*) yra 10 dB, temperatūra yra 300 K, atstumas yra 1 km (parinktas kaip įprastas atstumas nagrinėjant korinio ryšio tinklus [6]). Pirmosios dvi prielaidos reiškia, kad, esant 10 GHz juostos pločiui, perduodama galia turi būti 10×10 dBm [67]. Keičiant siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientus (angl. *antenna gains*) nuo 50 iki 70 dBi (pasirinktas kaip tuo metu maksimalus maksimalus galimas stiprinimo koeficientas [67]; tačiau reikalingos antenos, kurių stiprinimo koeficientas 1 km linijoje galėtų būti 100 dBi [6]), buvo apskaičiuota tikėtina kanalo pralaida (angl. *channel capacity*) kiekviename lange (taip pat pateikta 4 lentelėje).

4 lentelė. Atmosferos langai, jų juostos pločiai, centriniai dažniai ir apskaičiuota tikėtina kanalo pralaida, esant skirtingiems antenų stiprinimo koeficientams (duomenys iš [67]).

Langas	Juostos plotis (GHz)	Centrinis dažnis (GHz)	Kanalo pralaida (Gbps), kai antenų stiprinimo koeficientai:		
			50 dBi	60 dBi	70 dBi
I	76	338	24,6	357,8	858,5
II	58	414	1,8	98	452,6
III	62	484	0	0,4	32,9
IV	85	669	0	0	0,9
V	94	855	0	0	0,1

I ir II languose tikėtina didesnė nei 10 Gbps/GHz kanalo pralaida, kai antenų stiprinimo koeficientas yra 70 dBi [68]. Tai reiškia, kad belaidės THz ryšio sistemos, esant 1 km atstumui ir 100 Gb/s kanalo pralaidumui, technologiškai yra įmanomos.

[6], [13] numato, kad pritaikius visas THz technologijų galimybes [7], [13], teoriškai THz linijos ilgis galėtų siekti 1 - 5 km, tačiau realiu atveju dėl didelio silpninimo atmosferoje galima tikėtis ne ilgesnių nei kelių dešimčių šimtų metrų atstumų [15].

⁶ dBm parodo signalo stiprumą dB skalėje, lyginant su 1 mW.

Nuostolius galima sumažinti naudojant kryptines aktyviai valdomas antenas (angl. *actively steerable antennas*) vietoje silpnai kryptinių antenų (angl. *weakly directional aerials*) [67]. [69] darbe buvo palyginti abu antenų tipai. Toliau buvo daroma prielaida, kad dažnis yra 300 GHz, sklidimo atstumas yra 10 m, perduodamoji galia yra 3 dBm, nekryptinių siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientai yra 5 dBi, o kryptinių siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientai yra 25 dBi. Nekryptinių antenų atveju, 10 m nusklidusio 300 GHz signalo stiprumas būtų -88 dBm (silpnas signalas), o valdomų antenų atveju būtų -48 dBm (stiprus signalas) [69]. Kitoje biudžeto analizėje [70] numatoma, kad, norint pasiekti 10% pralaidumo juostos pločio ties 350 GHz, reikėtų antenų, kurių stiprinimo koeficientai yra 22 dB, 27 dB, 30 dB ir 33 dB atitinkamai 1 m, 3 m, 5 m ir 10 m atstumams.

[6] reziumuoja, kad norint pasiekti didelį duomenų perdavimo greitį vis dar reikia daugiau išėjimo galios (angl. *output power*) siųstuvo pusėje. Pavyzdžiui, fotoninis emiteris (angl. *photonic emitter*) galėtų sugeneruoti apie 1 mW išėjimo galios, esant 300 GHz dažniui, ir 40 Gbps srautus [6]. Tuo tarpu kambario temperatūroje veikiančio imtuvo (pagaminto Schottky'io diodų pagrindu) jautrumo lygis galėtų būti 4×10^{-19} W/Hz. Esant tokioms charakteristikoms ir naudojant 40 dBi stiprinimo antenas, ilgiausias atstumas, kurį nuskristų THz banga, esant stipriam lietaui (tariant, kad silpninimo dėl lietaus nuostoliai yra apie 10 dB/km) būtų vos 280 m [6]. Tai yra žymiai mažiau nei 1 km, todėl, nors moduliacija pagerintų padėtį, reikia geresnių siųstuvo, imtuvo bei didesnių antenų stiprinimo koeficientų [6]. Tam bus reikalingi dideli antenų masyvai, todėl THz antenų matmenys turės būti itin maži [65].

2.5. Zoninės plokštelės

Akivaizdu, kad norint sumažinti antenų matmenis, reikės naudoti kompaktiškesnes sudedamąsias dalis. Vienas iš būdų tai padaryti – keisti siųstuvo antenose naudojamus lęšius [15] zoninėmis plokštelėmis. Šiame darbe buvo nuosekliai optimizuotos ir lazerinės abliacijos būdu pagamintos atspindžius mažinančios struktūros THz dažnių ruožui bei ištirti fazių poslinkio jose ypatumai, kurie buvo panaudoti zoninės plokštelės dizainui sukurti, kuriame suderinamos atspindžius mažinančios dangų savybės, fokusavimas ir visa tai gaunama viename 500 μm storio silicio padėkle. Pagamintas 0,6 THz dažniui (atitinka vieną iš langų THz srityje (6 pav., 4 lentelė)) pritaikytas optinis komponentas – atspindžius mažinanti ir spinduliuotės fazę reguliuojanti zoninė plokštelė, kurios veikimas buvo sėkmingai pademonstruotas [IP1].

Tokia zoninė plokštelė turi plačias taikymo galimybes. Visų pirma, toks atspindžius mažinantis bei spinduliuotės fazę reguliuojantis kompaktiškas optinis elementas galėtų būti naudojamas gaminant B5G technologijos kryptines antenas, fokusuojančias signalą į siaurą spindulį, kuris nukreipiamas į konkretų imtuvą. Fresnel'io zoninės plokštelės (FZP, angl. *Fresnel zone plates*) yra fokusuojančių elementų tipas, kuris atlieka fazės poslinkio funkciją [18] ir yra plonesnis nei standartiniai fokusuojantys elementai [19], [20]. [21] darbe buvo pademonstruotos 5G technologijos antenos, veikiančios FZP pagrindu. Tai buvo kryptinės antenos, sudarytos iš sulankstytos struktūros (angl. *folded structure*), bangolaidžio ir griovėto FZP lęšio, atliekančio fazę koreguojančios diafragmos funkciją. THz srityje „8-laiptelių“ FZP lęšiai, skirti 625 GHz dažniui, buvo modeliavimo būdu palyginti su iš vienos pusės išgaubtais (angl. *plane-hyperbolic*) lęšiais [20]. „8-laiptelių“ FZP lęšių stiprinimo koeficientas buvo 0,8 dB mažesnis nei iš vienos pusės išgaubto lęšio, tačiau „8-laiptelių“ FZP buvo daug kompaktiškesnis gylio, tūrio ir svorio požiūriu [20]. Taip pat buvo pademonstruota fotoindukuotos FZP pagrindu veikianti antena su dvimačio dinaminio valdymo (angl. *dynamically steering*) ir pluošto formavimo galimybėmis ties 750 GHz, kurią siūloma naudoti THz MIMO masyvuose [71].

Zoninių plokštelių panaudojimo telekomunikacijose, integruojant jas į antenas, idėja nėra visiškai nauja. Tačiau nauji yra plokštelės dizainas ir parinktas gamybos būdas. Kaip jau minėta, šiame darbe pristatoma zoninė plokštelė turi atspindžius mažinančių ir fazę reguliuojančių savybių bei yra pagaminta kiek neįprastu lazeriniu būdu (labiau įprastas gamybos būdas yra ėsdinimas). Plačiajuostės neatspindinčiosios (AR, angl. *antireflective*) ir atspindžius mažinančios (AR struktūros, kurių pralaidumas yra beveik 100%) struktūros gali būti svarstomos kaip racionalus sprendinys, siekiant pagerinti optinių komponentų pralaidumą THz srityje. Efektyvus lūžio rodiklio pritaikymas ir dviguba refrakcija (angl. *birefringence*) buvo pademonstruoti modifikuojant užpildymo faktorių giliojo indukcinio plazminio ėsdinimo (DRIE, angl. *deep inductive plasma etching*) metodo Bosch'o procesu (angl. *Bosch process*) [72] pagamintose silicio struktūrose. Verta pažymėti, kad pateiktas mokslinis tyrimas remiasi teoriniu modeliu lūžio rodikliui, paremtu talpų analize. Vėliau DRIE metodas taip pat buvo pritaikytas norint eksperimentiškai pademonstruoti trisluoksnių apverstų piramidžių tipo plačiajuostes neatspindinčias struktūras 2,5 – 6 THz dažnių ruožui [73]. Ankstesniame tos pačios grupės darbe [74] mikropiramidžių masyvo formos neatspindinčios struktūros buvo gautos naudojant silicio anizotropinį drėgnąjį ėsdinimą (angl. *anisotropic wet etching*). Tačiau toks sprendimas pasirodė mažiau lankstus, nes kristalo kristalografinės ašys nulemia piramidžių formą, o tai apriboja AR struktūrų veikimą [73].

Neseniai buvo pademonstruotos lazeriniu būdu abliuotos AR struktūros [75], įskaitant AR struktūras ant išlenkto lęšio paviršiaus. Griovėtos silicio struktūros taip pat buvo tiriamos kaip alternatyva ketvirčio bangos ilgio ($\lambda/4$) storio paryleno dangoms, projektuojant lęšius kosminėms misijoms [22]. Žemesniuose dažniuose (60 GHz) lazerinė polimerinių darinių stereolitografija (angl. *space-resolved laser polymerization stereolithography*) buvo pritaikyta gaminant lęšius su gofruotais paviršiais [23]. 77 GHz automobilių radarinių antenų su struktūriškai suderintais sluoksniais pluošto nuskaitymo

charakteristikų patobulinimai buvo pademonstruoti [24]. Mechaninio pjaustymo būdu (angl. *dicing blade-based*) buvo siekiama pagaminti efektyvias AR struktūras su >95% pralaidumu 186 – 346 GHz dažnių diapazonui [76].

Kitos taikymo galimybės

Verta paminėti, kad dėl fokusavimo našumo, atkuriamumo ir pagerinto tinkamumo integruoti į kompaktiškus optinius komponentus, šiame darbe aprašomas zoninė plokštelė galėtų ir būti spektroskopinių THz vaizdinimo sistemų sudėtinė dalis.

Spektroskopinis THz vaizdinimas yra galingas įrankis daugybei taikymų, pradedant medicininiais tyrimais (pvz., vėžinių ir nevėžinių žmogaus storosios žarnos audinių vaizdinimas [77], medžiagų ir reagentų identifikavimas [78]) iki su saugumu susijusių klausimų [79]. Spektroskopinio vaizdinimo pranašumas - realus įgyvendinimas įrašant skirtingų dažnių „momentines nuotraukas“, dėl ko išvengiama tiesioginių THz spektro matavimų stiprios sklaidos aplinkoje. THz vaizdinimo dažniai gali būti nustatyti iš Furje spektro [80]; kitas žingsnis - optimizuoti spektroskopinę sistemą, minimizuojant nuostolius pasirinktiems dažniams visuose sudėtinuose komponentuose, valdyti pluošto profilį (pvz., lazeriu abliuotos zoninės plokštelės [81], daugialygmeniai faziniai Fresnel'io lęšiai [82] arba tinkamas rezonansinių jutiklių dizainas, kaip su antenomis integruoti mikrobolometrai (angl. *THz antenna-coupled micro-bolometers*) [83], nanometriniai lauko tranzistoriai [84] ir peteliškės formos (angl. *bow-shaped*) diodai [85]). Spektroskopinio vaizdinimo atveju, sistemos su standartiniais lęšiais (tokiais, kaip žemesniuose dažniuose pademonstruoti [86], [87], [88]) nebūtų pilnai išnaudotos, todėl vis dar ieškoma kompaktiškesnių sprendinių.

3. Modeliavimo metodika

3.1. Empiriniai modeliai

3.1.1. Silpninimas dėl lietaus

Šiame darbe daug dėmesio bus skiriama EM bangų silpninimui dėl lietaus, kuris yra kritinis, kai sistemos darbinis dažnis yra didesnis nei 10 GHz [39]. Silpninimo dėl lietaus prognozavimo metodai gali būti skirstomi į dvi grupes: fizinius ir empirinius. Taikant fizinius modelius bandoma kuo tiksliau įvertinti visus silpninimą sukeliančius procesus, o empiriniai modeliai yra paremti meteorologiniais duomenimis, gautais skirtingose zonose. Dėl taikymo patogumo ir gana sėkmingų skaičiavimo rezultatų, labiausiai paplitę yra empiriniai modeliai [89]. Kai nėra galimybės surinkti reikiamų duomenų tiksliai silpninimo skaičiavimams, ITU-R siūlo naudoti jų nustatytas vertes.

Vienas iš plačiausiai naudojamų silpninimo dėl lietaus nustatymo metodų yra santykis tarp silpninimo A_R ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$) ir lietaus intensyvumo R ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) (angl. *rain rate*) [59], [90]:

$$A_R = kR^\xi, \quad (5)$$

čia k ir ξ yra koeficientai-funkcijos, priklausantys nuo darbinio dažnio f (GHz) ir lietaus temperatūros t ($^\circ\text{C}$).

1-1000 GHz dažniams koeficientai apskaičiuojami tokiu būdu [90]:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (6)$$

$$\xi = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\xi \log_{10} f + c_\xi, \quad (7)$$

kadangi dėl suplotos, horizontaliai ištįsusios lašo formos horizontaliai poliarizuotos elektromagnetinės bangos patiria didesnius nuostolius nei vertikalčiai poliarizuotos bangos, atitinkamos koeficientų k ir ξ vertės yra skirtingos horizontaliai ir vertikalčiai poliarizuotoms bangoms: čia k yra arba k_H ,

arba k_V , o ξ yra arba ξ_H , arba ξ_V , t.y. atitinkamai horizontaliai arba vertikaliai poliarizacijai; a_j, b_j, c_j, m_k, c_k yra koeficientai.

Skaičiavimui naudojami koeficientai $a_j, b_j, c_j, m_k, c_k, m_\xi, c_\xi$ yra pateikti 5, 6, 7, 8 lentelėse [90], o apskaičiuotos k_H, k_V, ξ_H , ir ξ_V vertės 1-1000 GHz dažniams yra pateiktos 8 pav. ir 9 lentelėje [90].

Taikant šį empirinį metodą, rezultato tikslumas labai priklauso nuo teisingos R vertės pasirinkimo. Vienoks tikslumas bus naudojant vidutinę ilgu laikotarpiu apskaičiuotą R vertę, kitoks – naudojant momentinę vertę. Plačiau R vertės pasirinkimo ypatumai aprašomi sekančioje dalyje.

5 lentelė. Koeficientai k_H skaičiavimui [90].

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		

6 lentelė. Koeficientai k_V skaičiavimui [90].

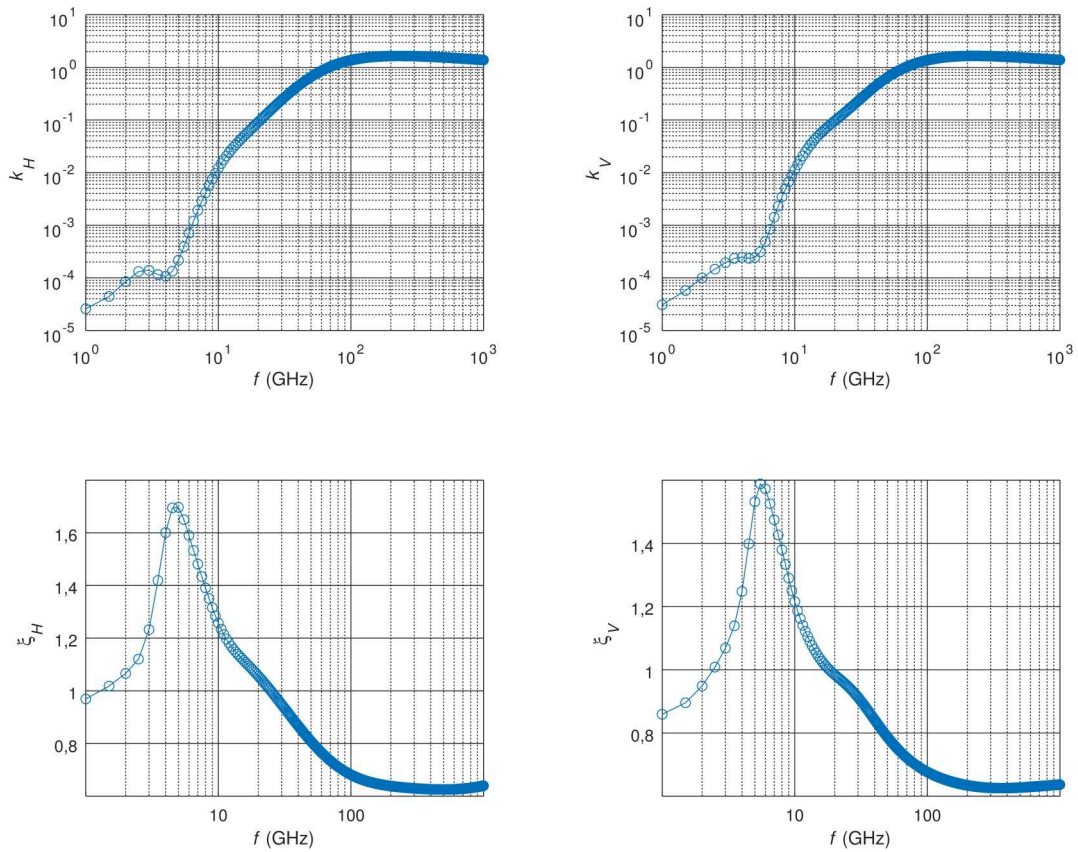
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

7 lentelė. Koeficientai ξ_H skaičiavimui [90].

j	a_j	b_j	c_j	m_ξ	c_ξ
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		

8 lentelė. Koeficientai ξ_V skaičiavimui [90].

j	a_j	b_j	c_j	m_ξ	c_ξ
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		



8 pav. Iš kairės pagal laikrodžio rodyklę: apskaičiuotos k_H , k_V , ξ_H ir ξ_V vertės 1-1000 GHz dažniams.

9 lentelė. Koeficientų k_H , k_V , ξ_H ir ξ_V vertės 100-1000 GHz dažniams (50-100 GHz intervalais) [90].

$f(\text{GHz})$	k_H	ξ_H	k_V	ξ_V
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
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

3.1.2. Lietaus intensyvumas

Taikant empirinius silpninimo dėl lietaus skaičiavimo modelius pirmasis ir svarbiausias žingsnis yra lietaus intensyvumo R nustatymas (lietaus skirstymas pagal intensyvumą yra pateiktas 3 lentelėje). Jis matuojamas specialiais meteorologiniais matuokliais, kuriuose akumuliuojami iškritę krituliai. Lietaus intensyvumą galima apibrėžti kaip per tam tikrą laiko intervalą (valandą) iškritusių kritulių sluoksnio storį (mm), su sąlyga, kad krituliai neišgaravo, nesusigėrė ir nebuvo nupūsti vėjo [IP7]. Lietaus intensyvumo vertė ir jos kitimas labai priklauso nuo vietovės, todėl turi būti matuojama konkrečioje vietovėje (pvz., šalyje, mieste, klimato zonoje). Kuo šios vietovės apimtis yra mažesnė, tuo tikslesnė yra R vertė.

Pirmieji bandymai įvertinti R vertę ir jos kitimo ypatumus Lietuvoje ir Baltijos regione yra aprašyti [91], [92], [57], [93], [IP9]. Lietuvoje pastebimi esminiai skirtumai tarp metinių, sezoninių, mėnesio ir dienos lietaus intensyvumo verčių, be to, jos nevienodai pasiskirsto šalies vietovėse [IP9]. Nei vienas metų mėnuo nėra „vidutinis mėnuo“. Dėl šios priežasties buvo iš naujo įvertinti ITU-R pasiūlyti empiriniai modeliai, kurie buvo išvesti naudojant kitų šalių statistinius duomenis. Pavyzdžiui, [91] buvo išanalizuoti metiniai lietaus intensyvumo duomenys Lietuvoje ir, turint omenyje šalies klimato ypatumus, buvo pasiūlyti pakeitimai [94] modelio pagrindu, o vėliau pasiūlytas ir naujas modelis [92].

Nors lietaus intensyvumo, R , vertė yra išreiškiama milimetrais per valandą (mm/h), nepastovaus klimato šalyse matavimai turėtų būti atlikti kaip įmanoma trumpesniais intervalais. Laiko intervalas tarp R verčių nuskaitymo vadinamas integracijos laiku, τ . Jo pasirinkimas gali iš esmės įtakoti R vertės tikslumą [IP7]. Kelių minučių trukmės stipri liūtis padarytų žymiai daugiau žalos nei kelias savaites trunkanti lengva dulksna [59]. Tačiau dėl liūčių prigimties (didelis kritulių kiekis, neilga trukmė), matuojant lietaus intensyvumą ilgais intervalais, aukštos R vertės gali likti nepastebėtos, nes suvidurkintos tampa žymiai mažesnės nei momentinė R vertė. Pavyzdžiui, per valandą palijus

vos 5 minutes ir prisikaupus 5 mm kritulių, vidutinis valandos lietaus intensyvumas būtų $R = 5$ mm/h, tačiau lijimo momentu lietaus intensyvumo vertė būtų lygi $R = 60$ mm/h. Tai atvejais, kai sistemos patikimumas turi būti 99,99%, reikia nustatyti R vertę, kuri yra viršijama ne daugiau nei 0,01% laiko. Kai yra reikalingas didesnis tikslumas, laiko intervalas dar sumažėja (pavyzdžiui, atitinkamai 99,999% ir 0,001%). Tačiau čia atsiranda nauji iššūkiai.

Kai integracijos laikas yra viena minutė, $\tau = 1$ min, atitinkamos R vertės vadinamos „vienos minutės“ lietaus intensyvumu, $R_{1 \text{ min.}}$. Ši vertė gaunama vienos minutės intervalu išmatuotą lietaus intensyvumo vertę padauginus iš 60 [95]. Tačiau dažniausiai meteorologiniai duomenys apie lietaus intensyvumą yra renkami 1, 3 ar 6 valandų intervalais, be to, dažnai įranga net neturi techninės galimybės matuoti lietaus intensyvumo trumpesniais nei kelios minutės laiko intervalais. Todėl $R_{1 \text{ min.}}$ vertė gali būti apskaičiuota iš turimos R vertės, naudojant konvertavimo modelius, kurių yra įvairių [96].

Tiesa, „vienos minutės“ modeliai yra ne visada patogūs dėl to, kad reikia surinkti itin daug duomenų ir juos apdoroti. Todėl ITU-R pasiūlė juos papildantį „blogiausio mėnesio“ modelį [97]. Pagrindinis šio modelio privalumas yra tai, kad galima rinkti tik blogiausio mėnesio statistiką, be to, jį galima taikyti ir tada, kai pageidaujamas kitoks nei 99,99% sistemos patikimumas. Blogiausią mėnesį galima apibrėžti kaip kalendorinį mėnesį (30 iš eilės einančių dienų) metuose (12 iš eilės einančių mėnesių), per kuriuos patikimumo slenkstis buvo viršytas ilgiausiai. Blogiausias mėnuo nebūtinai turi būti tas pats kasmet. Šis modelis taip pat buvo patikslintas pagal Lietuvos klimato ypatumus [P2].

ITU-R pasiūlyti supaprastinti empiriniai metodai yra tik vieni iš galimų. Pavyzdžiui, [98] darbe taikant Mie sklaidos teoriją penkiems lašų dydžio pasiskirstymams buvo nustatyta, kad Weibull'o pasiskirstymas geriausiai aprašo silpninimą dėl lietaus aukštesniems nei 30 GHz dažniams. Vėlesniame darbe buvo pademonstruota, kad Mie sklaidos teorija, kartu su Best ir P-S paskirstymais, geriausiai aprašo eksperimentines vertes 90-225 GHz dažnių

intervale, tuo tarpu ITU-R modelis ir Mie sklaidos teorija su Weibull'o pasiskirstymu geriau aprašo 313-355 GHz dažnių intervalą.

Taip pat reikėtų pažymėti, kad lietaus lašų dydžio pasiskirstymo (DSD) [99] ir geriausio empirinio jo apibūdinimo [100] paieškos vyko tiek iki, tiek ir po ITU-R rekomendacijos P.838-3 [90], kuri pasirodė 2005 metais (rekomendacijos nuolat atnaujinamos), todėl alternatyvūs aprašymo mechanizmai gali ir turi būti apsvarstyti.

3.2. Fiziniai modeliai

Sklaida vandens lašais gali būti aprašyta klasikinės plokščių bangų sklaidos sferinėmis dalelėmis teorija [101], kuri yra plačiai taikomas (įskaitant [7], [98], [102], [103]) instrumentas detaliam silpninimo THz diapazone analizei. Šiame darbe ji tarnauja kaip pradinis taškas skaičiavimams. Šios teorijos rėmuose silpninimo dėl lietaus koeficientas α yra apskaičiuojamas taip:

$$\alpha = 4,343 \int_0^{\infty} N(D) Q_t(D, \lambda, m) dD, \quad (8)$$

$$Q_t(D, \lambda, m) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{z=1}^{\infty} (2z + 1) \operatorname{Re}[a_z + b_z], \quad (9)$$

čia D yra lašo skersmuo, $N(D)$ yra lašų dydžio pasiskirstymas, $Q_t(D, \lambda, m)$ yra silpninimo skerspjūvis laše, λ yra bangos ilgis, m yra vandens lūžio koeficientas, a_z ir b_z yra Mie sklaidos koeficientai, 4,343 daugiklis yra reikalingas norint gauti vertes decibelais (dB) atstumo vienetui (pvz., dB/km). Šiame darbe koeficiento m vertės sub-THz ir THz sritims yra paimtos iš [104], o Mie sklaidos koeficientai apskaičiuoti naudojant MATLAB programiniam paketui skirtą funkciją iš [105]. $N(D)$ buvo apskaičiuotas naudojant Weibull'o pasiskirstymą ir koeficientus iš [98], [102]:

$$N(D) = N_0 \frac{c}{b} \left(\frac{D}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{D}{b}\right)^c}, \quad (10)$$

čia $N_0 = 1000 \text{ m}^{-3}$, $b = 0,26R^{0,44} \text{ mm}$, $c = 0,95R^{0,14}$ ir R yra lietaus intensyvumas (mm/h).

3.3. Atmosferos lūžio koeficientas

Atmosferos lūžio rodiklio, n , sąryšis su atmosferos lūžio koeficientu, N [106]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (11)$$

N gali būti apskaičiuotas naudojant meteorologinius parametrus, kuriuos galima išmatuoti:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (12)$$

čia pirmasis formulės narys yra vadinamasis „sausasis narys“, visi likusieji – „drėgnasis narys“, P – atmosferos slėgis (hPa), T – absoliutinė temperatūra (K), e – vandens garų slėgis (hPa)

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100}, \quad e = \frac{\rho T}{216,7}, \quad (13)$$

čia H – santykinė drėgmė (%), e_s – soties garų slėgis (hPa), esant t (°C) temperatūrai, ρ - vandens garų tankis (g/m³), kurio vertes galima rasti [107], ir

$$e_s = EF \cdot a_{e_s} \cdot \exp \left[\frac{\left(b_{e_s} - \frac{t}{d_{e_s}} \right) \cdot t}{t + c_{e_s}} \right], \quad (14)$$

čia vandens atveju koeficientai $a_{e_s} = 6,1121$, $b_{e_s} = 18,678$, $c_{e_s} = 257,14$, $d_{e_s} = 234,5$ (koeficientai galioja nuo -40 iki +50°C) ir

$$EF = 1 + 10^{-4} [7,2 + P \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)]. \quad (15)$$

N išraiška gali būti supaprastinta prarandant 0,02% tikslumo⁷ [106]:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (16)$$

Atmosferos lūžio rodiklio gradientas G (N -vnt./km) [59]:

$$G_N = \frac{\Delta n}{\Delta h} = \frac{\Delta N}{\Delta h} (10^{-6}), \quad (17)$$

⁷ [39] teigiama, kad ši išraiška gali būti naudojama visiems dažniams iki 100 GHz su iki 0,5% paklaida.

$$\frac{\Delta N}{\Delta h} = \frac{N_1 - N_2}{h_1 - h_2}, \quad (18)$$

čia N_1 ir N_2 – atmosferos lūžio koeficiento vertės atitinkamai aukščiauose h_1 ir h_2 .

Atmosferos lūžio gradientas yra svarbus parametras, nes jis apibrėžia atmosferos reakcijos tipą, kuris nulemia kaip sklindantis signalas užlinks. G_N vertė nuo 0 iki -79 (N -vnt./km) reiškia, kad refrakcija yra normali. Standartinės refrakcijos reikšmė yra -40 N -vnt./km. Kai G_N vertė yra lygi nuo -79 iki -157 (N -vnt./km), yra sąlygos super-refrakcijai (situacija, kai sklindantis signalas užlinksta link žemės). Žemiau -157 N -vnt./km yra sąlygos susidaryti atmosferos bangolaidžiui (angl. *ducting*), kuriuo signalas gali nusklisti žymiai toliau nei tikimasi, o už jo ribų esančių zonų signalas nepasiekia [59].

3.4. Zoninių plokštelių modeliavimas

Spinduliuotės neatspindinčių bei spinduliuotės fazę reguliuojančių kompaktiškų optinių elementų THz dažnių ruožui modeliavimas (pralaidumo ir atspindžio spektrai) atliktas baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu (FDTD, angl. *Finite-Difference Time-Domain method*), naudojant atviro kodo MIT Meep programinį paketą (<https://github.com/stevengj/meep>).

FDTD metodas yra skirtas elektromagnetinės bangos sąveikos su medžiaga trimačio uždavinio sprendimui, padalinant erdvės dalį, kurioje EM laukai modeliuojami taip, kad Maxwell'o lygčių dalines išvestines būtų galima pakeisti kompiuteriu modeliuojamomis baigtinių skirtumų išraiškomis [108]. Kadangi tai yra laiko skalės metodas, sprendiniai gali apimti plačią dažnių sritį bei taip įvertinti netiesines medžiagos savybes atliekant vieną skaičiavimą.

Pagamintų testinių struktūrų pralaidumo priklausomybė nuo dažnio buvo tiriama naudojant „Ekspla-Teravil“ laikinės skyros spektroskopijos (THz-TDS) ir vaizdinimo sistemą.

4. Modeliavimas naudojant realius meteorologinius duomenis

4.1. THz bangų silpninimo dėl lietaus modeliavimo rezultatų priklausomybė nuo R vertės parinkimo

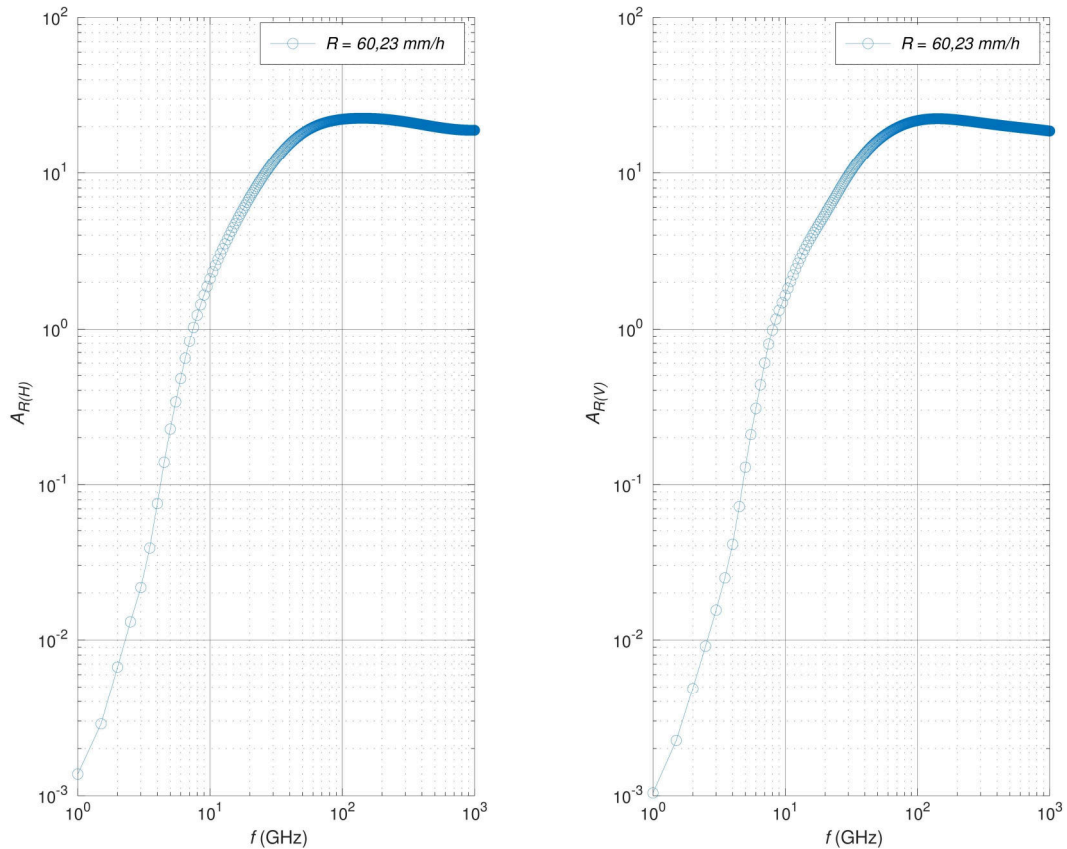
Ilgamečių lietaus duomenų analizė atskleidė, kad Lietuvoje stipraus lietaus ir liūčių galima tikėtis nuo gegužės iki rugsėjo mėnesio, todėl pasiūlyta taikyti Rice ir Holmberg modelį [109], patikslintą atsižvelgiant į Lietuvos klimato ypatumus [IP9]:

$$R_{1 \text{ min.}} = \frac{\ln\left(0,0144 \frac{M_{V-IX}}{t_{\text{val.}}}\right)}{0,03}, \quad (19)$$

čia $R_{1 \text{ min.}}$ yra „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertė, M_{V-IX} yra lietaus pavidalo kritulių kiekis, toje vietovėje iškritęs gegužės – rugsėjo mėnesiais (šiuo laikotarpiu iškrenta daugiausia kritulių), $t_{\text{val.}}$ yra valandų metuose skaičius, kai lietaus intensyvumo vertė gali būti lygi arba viršyti $R_{1 \text{ min.}}$ vertę (pavyzdžiui, kai reikalingas sistemos patikimumas yra 99,99%, $R_{1 \text{ min.}}$ vertė gali būti lygi arba viršijama 0,01% metų laiko).

Vėliau tyrimas buvo pakartotas atskiriant ir palyginant pajūrio bei žemynines vertes. Apskaičiuotos orientacinės lietaus intensyvumo vertės, esant skirtingiems sistemos patikimumo reikalavimams (kai sistemos patikimumas turi būti 99,99%, orientacinė vertė yra 45 mm/h, kai 99,999% - 69,8 mm/h) [NP3]. Po šių darbų ITU-R rekomenduojamos orientacinės lietaus intensyvumo vertės buvo padidintos.

Remiantis (17) modeliu buvo apskaičiuota, kad Lietuvoje $R_{1 \text{ min.}}$ vertė yra lygi 60,23 mm/h [IP7]. Tai yra maždaug dvigubai daugiau nei ITU-R rekomenduojama vertė. 9 pav. yra pateiktas 1-1000 GHz dažnių silpninimas esant $R_{1 \text{ min.}} = 60,23$ mm/h vertei pagal (5) formulę.



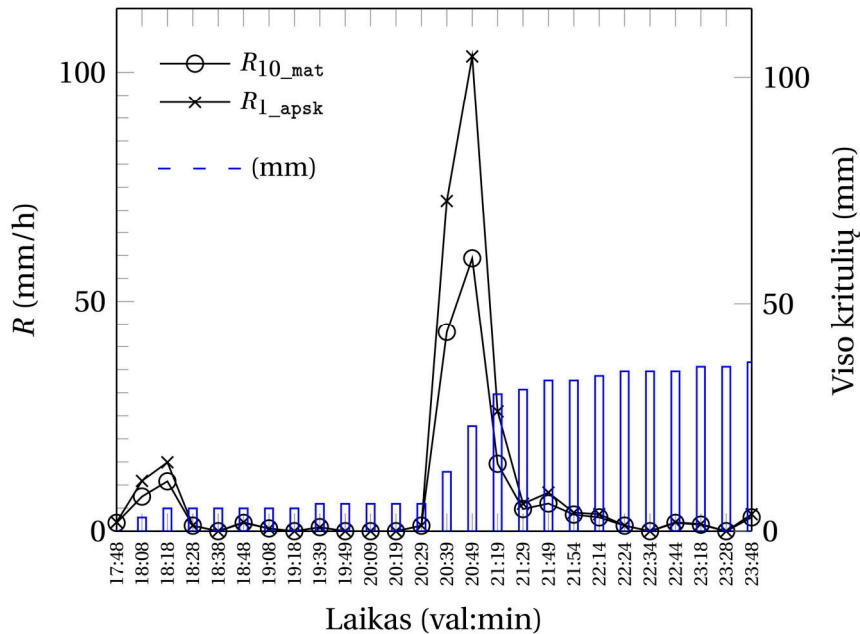
9 pav. 1-1000 GHz dažnių silpninimas esant $R_{(1 \text{ min.})} = 60,23 \text{ mm/h}$ lietaus intensyvumo vertei.

10 pav. yra pateikti stipraus lietaus atvejo duomenys. Lietus truko 6 valandas, per tą laiką lietaus intensyvumas kito nuo lengvo lietaus iki stipraus lietaus, ir prisirinko 37 mm kritulių (brėžinyje pažymėta „(mm)“). Tuo metu buvo matuojamas lietaus intensyvumas (brėžinyje pažymėta „ R_{10_mat} “), kuris dėl techninių priežasčių buvo matuojamas 10 min. intervalais. Todėl „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertė buvo apskaičiuota iš turimų duomenų, naudojant Moupfouma ir Martin metodą⁸ [110]:

$$R_{(1 \text{ min.})} = (R_{(\tau_{\text{min.}})})^{0,987\tau_{\text{min.}}^{0,061}}, \quad (20)$$

⁸ Šiame darbe Moupfouma ir Martin metodas naudojamas siekiant konvertuoti pavienes tam tikrais laiko intervalais išmatuotas R vertes į atitinkamas „vienos minutės“ R vertes, $R_{(1 \text{ min.})}$. Norint apskaičiuoti R vertę, kuri yra viršijama ne daugiau 0,01% metų laiko (atitinka 99,99% sistemos patikimumą), Lietuvoje rekomenduojama naudoti patikslintą Rice ir Holmberg modelį [IP9].

čia $R_{(\tau_{\min})}$ yra lietaus intensyvumo vertė, išmatuota per integracijos laiką τ_{\min} (minutėmis).

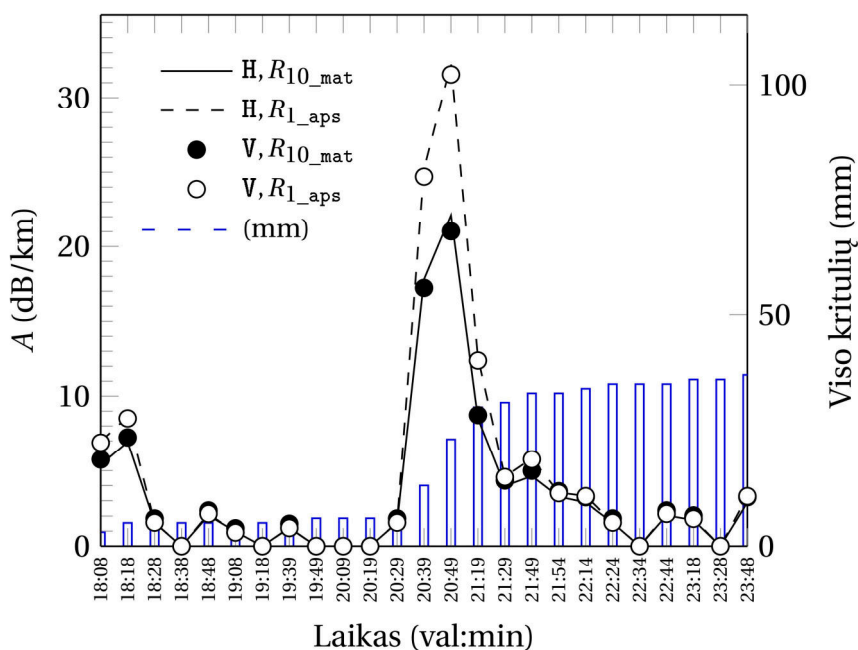


10 pav. Stipraus lietaus atvejis. Pavaizduotos pikinės lietaus intensyvumo vertės, esant 10 min. (išmatuota vertė, žymima „ R_{10_mat} “) ir 1 min. (apskaičiuota vertė, žymima „ R_{1_apsk} “) laiko intervalams tarp matavimų. Per visą laikotarpį iškritęs kritulių kiekis žymimas stulpeliais „(mm)“ (duomenys iš [PS1]).

Matavimų duomenimis (matavimus atliekant 10 min. intervalais), didžiausia R vertė buvo išmatuota 20:49 ir buvo lygi $R = 59,4$ mm/h. Perskaičiavus ją į „vienos minutės“ vertę, buvo gauta beveik dvigubai didesnė vertė, $R_{(1\text{ min})} = 103,45$ mm/h. Abi šios vertės yra didesnės nei ITU-R rekomenduojama vertė, $R = 35$ mm/h [111].

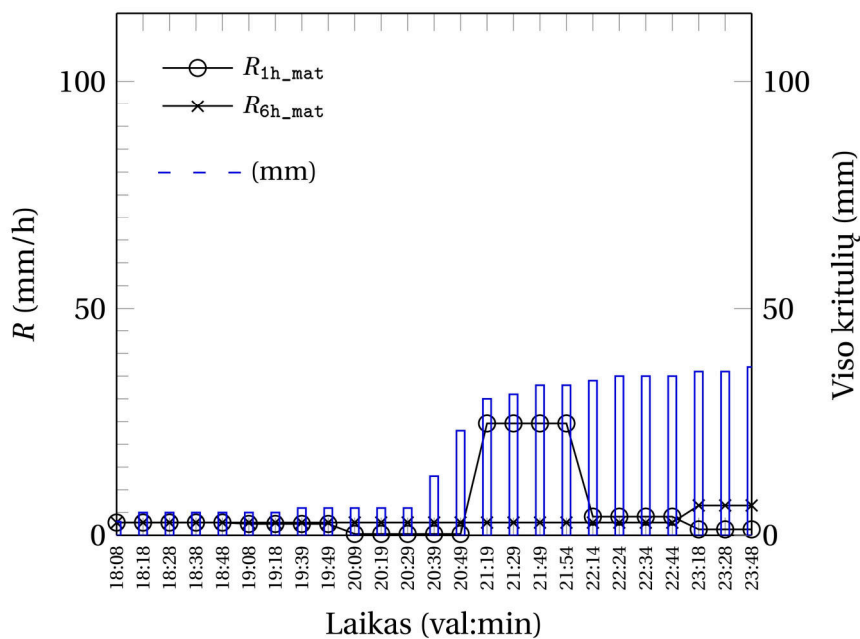
11 pav. yra pavaizduotos iš šių duomenų apskaičiuotos silpninimo dėl lietaus, A , vertės, apskaičiuotos pagal (5) formulę 0,1 THz dažniui. Kaip ir buvo galima tikėtis, šios vertės yra skirtingos 10 min. ir 1 min. integracijos laiko atveju. „Vienos minutės“ atveju 20:49 silpninimo vertė yra lygi 32,27 dB/km (horizontaliai poliarizuotoms bangoms) ir 31,55 dB/km (vertikaliai

poliarizuotoms bangoms). 10 min. intervalo atveju gautos vertės yra mažesnės (atitinkamai 22,11 dB/km ir 21,02 dB/km). Taip pat galima pastebėti, kad ženkliai sumažėjus lietaus intensyvumui (nuo 21:29), laiko intervalas tarp matavimų tampa nebe toks svarbus, nes tiek naudojant 10 min. intervalais išmatuotą R vertę, tiek apskaičiavus „vienos minutės“ R vertę gaunamas panašus rezultatas.

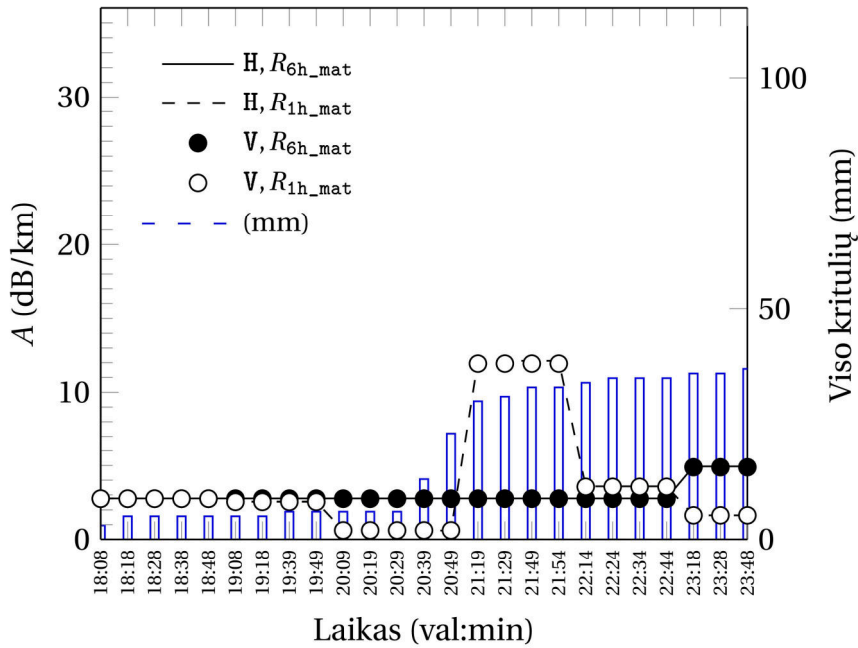


11 pav. Pagal (5) formulę apskaičiuotas silpninimas dėl lietaus 0,1 THz dažniui, naudojant 1 min. ir 10 min. intervalais išmatuotas/apskaičiuotas lietaus intensyvumo R vertės. Žymėjimai tokie patys kaip 10 pav. ir „H“ – horizontali poliarizacija, „V“ – vertikalioji poliarizacija. Esant skirtingiems integracijos laikams (laiko intervalui tarp R vertės matavimų) rezultatai skiriasi. „Vienos minutės“ vertė $R = 103,45$ mm/h atskleidžia maksimalų 32,27 dB/km silpninimą horizontaliai poliarizuotoms EM bangoms ir 31,55 dB/km silpninimą vertikalioji poliarizuotoms EM bangoms (duomenys iš [PS1]).

Siekiant įvertinti, ar toks pat rezultatas gaunamas ir didesnių laiko intervalų atveju, silpninimo skaičiavimai buvo pakartoti naudojant 1 val. ir 6 val. laiko intervalus. Tokie intervalai buvo pasirinkti dėl to, kad plačiausiai prieinami meteorologinių duomenų archyvuose duomenys pateikiami tokiais intervalais. Skaičiavimų rezultatai yra pateikti 12 pav. ir 13 pav. (siekiant išryškinti skirtumus, vertikalių ašių aukščiai palikti tokie patys kaip atitinkamai 10 pav. ir 11 pav.).

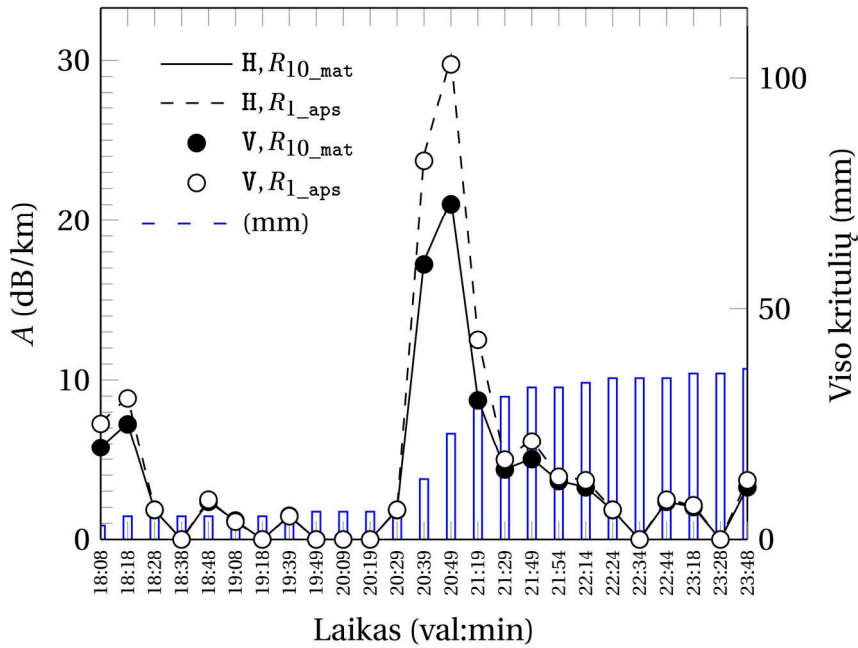


12 pav. Stipraus lietaus atvejis. Pavaizduotos pikinės lietaus intensyvumo vertės, esant 1 val. (žymima „ R_{1h_mat} “) ir 6 val. (žymima „ R_{6h_mat} “) laiko intervalams tarp matavimų. Per visą laikotarpį iškritęs kritulių kiekis žymimas stulpeliais „(mm)“ (duomenys iš [PS1]).

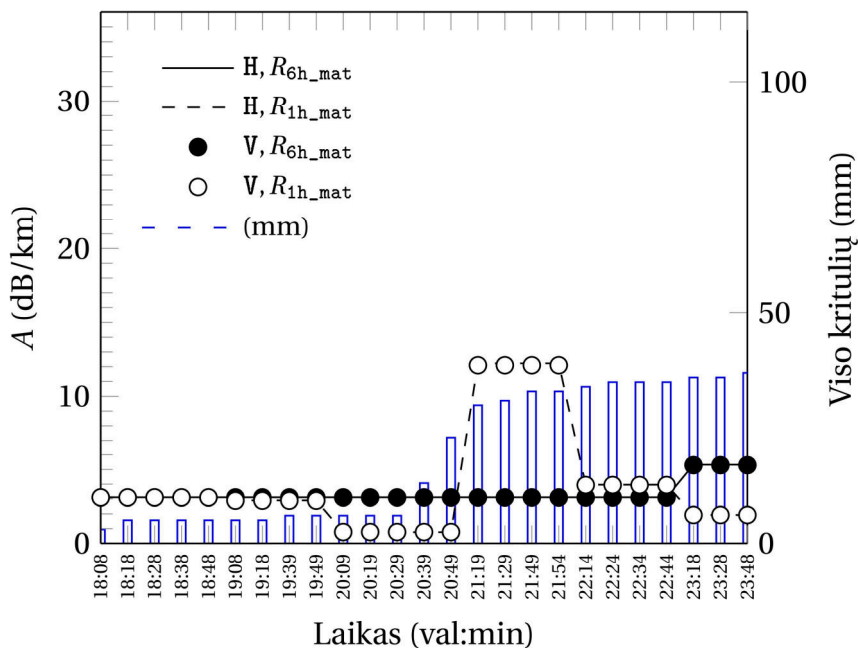


13 pav. Pagal (5) formulę apskaičiuotas silpninimas dėl lietaus 0,1 THz dažniui naudojant suvidurkintas R vertes. Žymėjimai tokie patys kaip 12 pav. ir „H“ – horizontali poliarizacija, „V“ – vertikali poliarizacija), per visą laikotarpį iškritęs kritulių kiekis žymimas stulpeliais „(mm)“. Palyginus su 11 pav., rezultatai yra iškraipyti: žemesnės silpninimo vertės tampa aukštesnėmis, aukštesnės – žemesnėmis, silpninimo maksimumas pasislenka laike (duomenys iš [PS1]).

Nustatyta, kad tokie laiko intervalai iškraipo duomenis, nes didžiausio lietaus intensyvumo vertė yra ženkliai mažesnė ir pasislinkusi laike (12 pav., 1 val. atveju buvo gauta $R = 24,6$ mm/h ties 21:19; 6 val. atveju buvo gauta $R = 6,56$ mm/h vertė ties 23:18). Taip pat reikia paminėti, kad mažos silpninimo vertės išauga, o pikinės vertės sumažėja (13 pav., 1 val. atveju apskaičiuota silpninimo vertė lygi 12,13 dB/km horizontaliai poliarizuotoms bangoms, palyginus su 11 pav., 32,27 dB/km). 6 val. atveju, dėl R vertės susividurkinimo ir pasislinkimo, apskaičiuojamos labai žemos ir uždelstos silpninimo vertės.



14 pav. Pagal (5) formulę apskaičiuotas silpninimas dėl lietaus 0,3 THz dažniui, naudojant 1 min. ir 10 min. intervalais išmatuotas/apskaičiuotas lietaus intensyvumo R vertės. Žymėjimai tokie patys kaip 11 pav. (duomenys iš [PS1]).



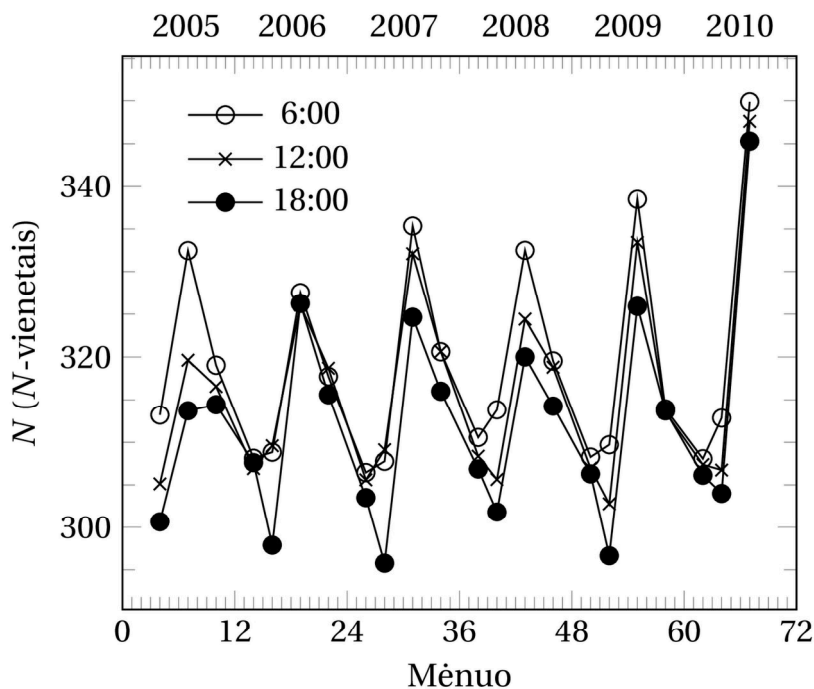
15 pav. Pagal formulę (5) apskaičiuotas silpninimas dėl lietaus 0,3 THz dažniui, naudojant suvidurkintas R vertės. Žymėjimai tokie patys kaip 13 pav. Palyginus su 13 pav., rezultatai yra iškraipyti: žemesnės silpninimo vertės tampa aukštesnėmis, aukštesnės – žemesnėmis, silpninimo maksimumas pasislenka laike (duomenys iš [PS1]).

Tokiu pačiu principu buvo atlikti skaičiavimai 0,3 THz dažniui (300 GHz), rezultatai yra pavaizduoti 14 ir 15 pav. (siekiant išryškinti skirtumus, vertikalių ašių aukščiai 15 pav. palikti tokie patys kaip 14 pav.). Tendencijos išlieka panašios kaip 0,1 THz atveju, tačiau apskaičiuotos silpninimo vertės dėl modelio ypatumų yra mažesnės nei 0,1 THz⁹. „Vienos minutės“ atveju 20:49 silpninimo vertė yra lygi 30,22 dB/km (horizontaliai poliarizuotoms bangoms) ir 29,75 dB/km (vertikaliai poliarizuotoms bangoms). 10 min. intervalo atveju gautos vertės yra mažesnės (atitinkamai 21,31 dB/km ir 21,02 dB/km). 1 val. ir 6 val. intervalų atveju rezultatai iškraipomi ir pasislenka laike.

⁹ Pagal naudojamą ITU-R modelį, silpninimas dėl lietaus didžiausią vertę pasiekia maždaug ties 0,1-0,25 THz, o dar aukštesniuose dažniuose pradeda šiek mažėti ir asimptotiškai artėti prie tiesės **Invalid source specified**. Galima to priežastis – neselektyvi sklaida, pasireiškianti, kai dalelių dydžiai tampa žymiai didesni nei bangos ilgis. Neselektyvi sklaida visą spektrą įtakoja vienodai (2 lentelė).

4.2. Atmosferos lūžio rodiklis

Remiantis daugiamečiais duomenimis, buvo įvertinti metiniai, sezoniniai, paros laiko atmosferos lūžio koeficiento svyravimai [IP5], [IP8]. Temperatūros, drėgmės ir atmosferos slėgio duomenys buvo paimti iš internete prieinamų („Weather Underground“ <https://www.wunderground.com/history/> ir „Reliable Prognosis“ <https://rp5.ru>) ir Lietuvos Hidrometeorologijos tarnybos (<http://www.meteo.lt>) archyvų. Dalinis vandens garų slėgis buvo apskaičiuotas naudojant (13)-(14) formules, o atmosferos lūžio koeficientas buvo apskaičiuotas naudojant (16) formulę. Gauti rezultatai yra pateikti 16 pav. Matomi dėšningumai: N vertės padidėjimas vasaros mėnesiais ir didžiausia vertė ryte, mažiausia – vakare.



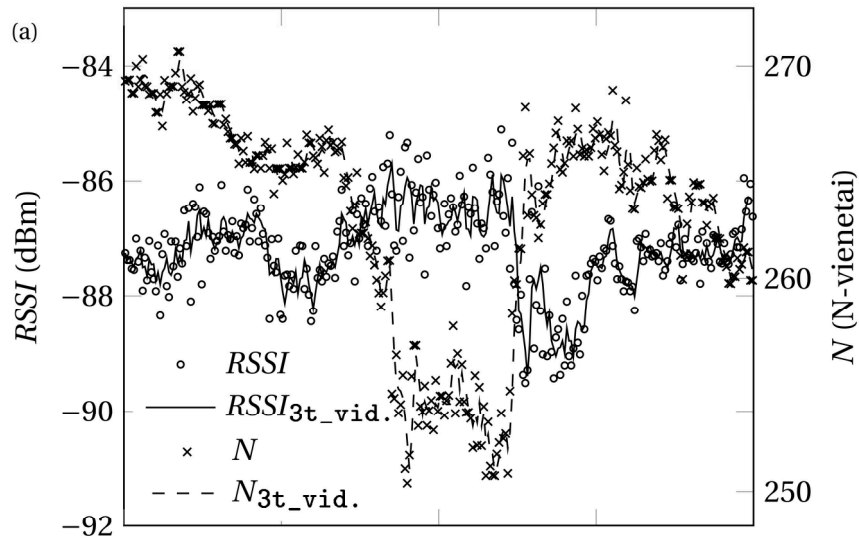
16 pav. Atmosferos lūžio koeficiento N kitimas nuo dienos ir metų laiko 2005 – 2010 m. (duomenys iš [IP5]).

Kadangi atmosferos lūžio koeficiento išraiškose (12), (16) nėra priklausomybės nuo dažnio, ir laikoma, kad jos yra teisingos iki 100 GHz, žemesniuose dažniuose atliktų atmosferos lūžio rodiklio ir koeficiento skaičiavimo rezultatai gali būti naudojami sub-THz dažniamss.

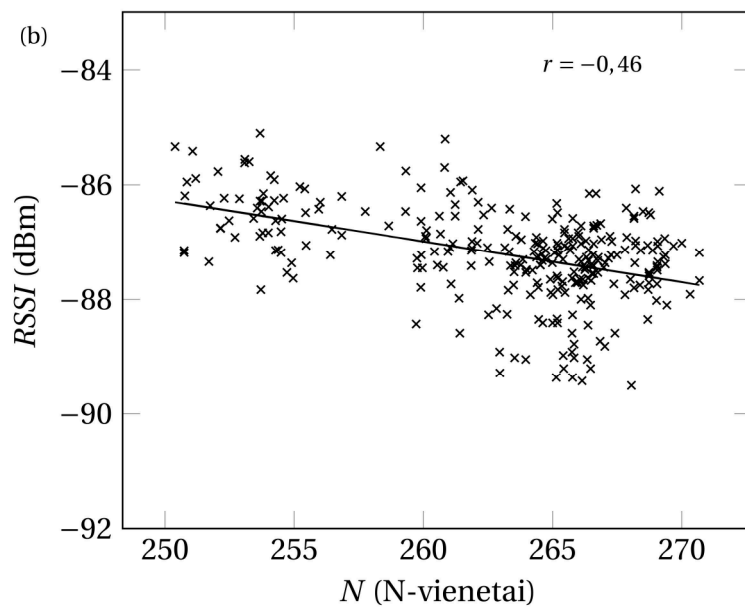
17 pav. yra pavaizduoti vienos dienos matavimai. Darbinis įrangos dažnis 3,5 GHz (buvęs WiMAX), matavimai buvo atlikti silpnos aprėpties¹⁰ zonoje [PS1]. Signalų stiprumas įvertintas RSSI (angl. *Received signal strength indication*) vienetais (dBm) ir palygintas su lūžio koeficiento verte, apskaičiuota iš tuo pačiu laiko momentu toje pačioje vietovėje išmatuotų meteorologinių parametrų pagal (16) formulę. Rezultatai pavaizduoti 17(a) pav. Rezultatai yra labai išsibarstę, todėl kitimo tendencijos pavaizduotos linijomis, pravestomis per trijų taškų vidurkius. Galima vizualiai pastebėti, kad esminiai signalo pokyčiai atsiranda tuo pačiu metu, kai keičiasi lūžio rodiklis [PS1]. Siekiant šią priklausomybę įvertinti kokybiškai, 17(b) pav. tie patys duomenys atvaizduoti tiesine regresija ir nustatytas koreliacijos koeficientas, kuris yra lygus $r = -0,46$. Tai yra vidutinio stiprumo neigiama koreliacija (t.y. lūžio koeficientui didėjant, signalo stiprumas mažėja).

Pagal ITU-R metodiką [59] buvo apskaičiuotas atmosferos lūžio rodiklio gradientas (kitimo priklausomybė nuo aukščio). Rezultatai pateikti 18 pav. Buvo stebimi temperatūros inversijos (18(b) pav.), super-refrakcijos (18(c),(d) pav.) ir atmosferos bangolaidžio (18(c),(d) pav.) sąlygos.

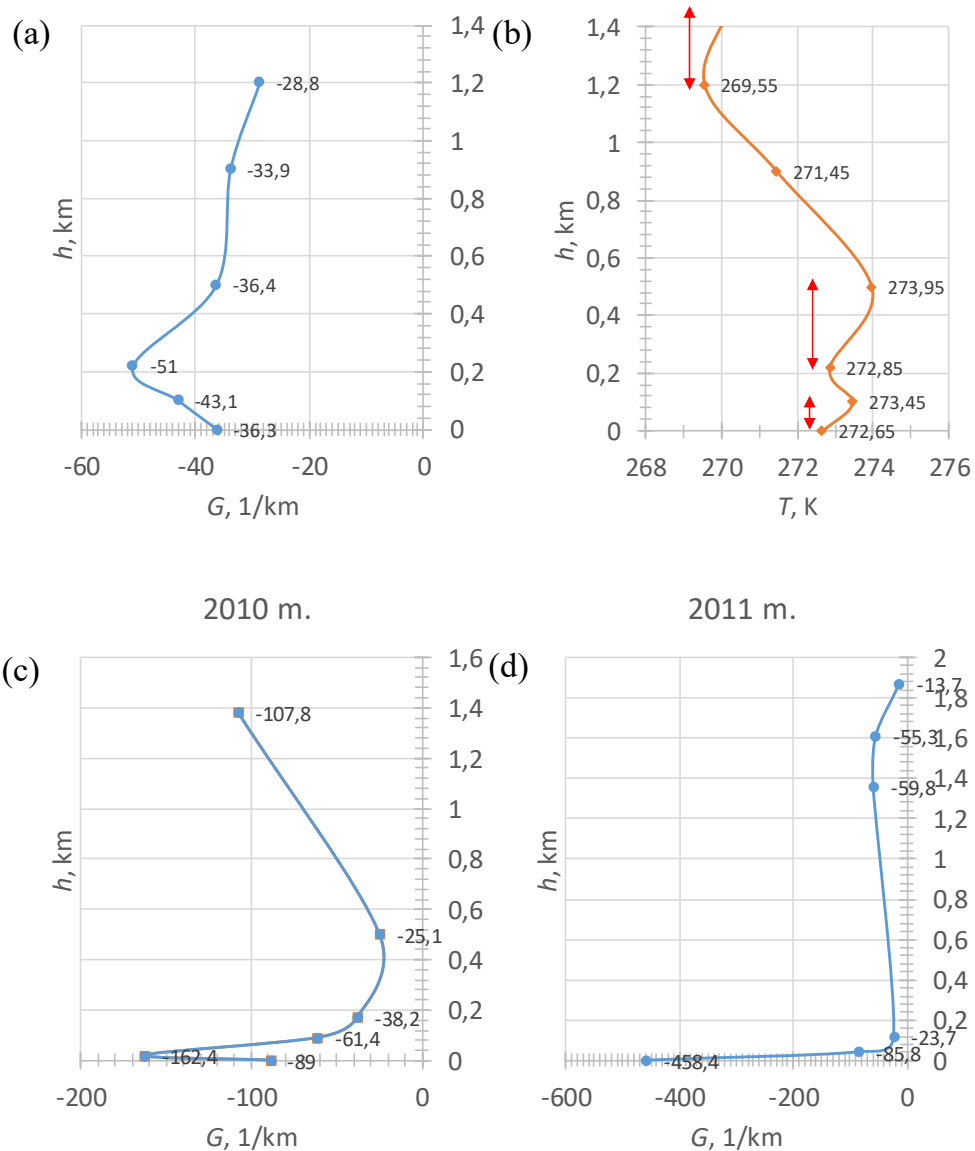
¹⁰ Vietovė, kurioje yra silpnas signalas.



Laikas nuo 00:00 iki 24:00



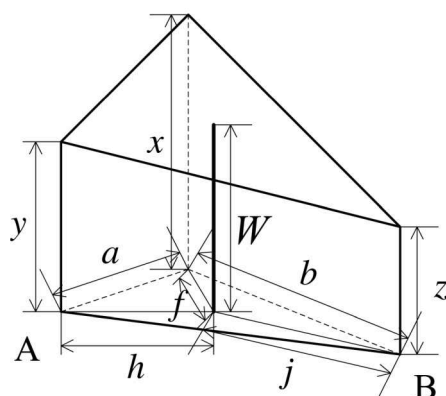
17 pav. (a) Atmosferos lūžio koeficiento N ir išmatuoto signalo stiprumo RSSI vienetais (dBm) palyginimas (3,5 GHz dažnis, matavimai buvo atlikti silpnos aprėpties zonoje). Vizualiai stebimi RSSI pokyčiai tuo pačiu metu, kai vyksta atmosferos lūžio koeficiento pokyčiai; (b) N ir RSSI tiesinė regresija, koreliacijos koeficientas yra lygus $r = -0,46$ (vidutinė neigiama koreliacija) (duomenys iš [PS1]).



18 pav. (a) Atmosferos lūžio koeficiento gradiento svyravimai (2009-04-21 matavimų duomenys). Stebima normali refrakcija. (b) Tuo pačiu metu stebimi temperatūros inversijos sluoksniai (pažymėti raudonomis rodyklėmis). Dėl inversijos sluoksnių, signalai sklinda už įprasto horizonto. (c)-(d) stebimi atmosferos lūžio koeficiento gradiento svyravimai (2010-04-21 ir 2011-04-21 matavimų duomenys). Abiem atvejais žemesniame troposferos sluoksnyje stebimos super-refrakcijos ($-79 > G_N > -157$ N-vnt./km) ir atmosferos bangolaidžio ($G_N < -157$ N-vnt./km) sąlygos (duomenys iš [IP4], [IP6]).

Kadangi ne visose dominančiose vietovėse galima atlikti reikalingų meteorologinių duomenų matavimus, buvo pasiūlytas modelis [IP3], skirtas nustatyti lūžio koeficiento vertę vietovėje, kurioje nėra galimybės atlikti matavimus. Lūžio koeficiento vertė šioje vietovėje žymima W . Modelis yra

paremtas žinomų verčių trijose aplinkinėse vietovėse naudojimu. Tarp šių taškų yra brėžiami du trikampiai: vienas prie žemės paviršiaus, kitas – tam tikrame aukštyje (19 pav.). Išmatavus trikampio viršūnėse esančių vietovių meteorologinius parametrus, galima pakankamu tikslumu nustatyti lūžio koeficiento vertę į trikampių teritoriją patenkančiame taške W .



19 pav. Modelio schema. Žinant meteorologinius parametrus trijose aplinkinėse vietovėse, galima nustatyti į tarp jų nubrėžtą trikampį patenkančio taško W lūžio koeficiento vertę [IP3].

Modelio taikymas susideda iš keleto žingsnių. Pirmiausia „Google Maps“ (maps.google.com) ar kitų žemėlapių pagalba nustatomos vietovių koordinatės ir pagal jas apskaičiuojamas atstumas tarp taškų A ir B. Antras žingsnis – surenkami meteorologiniai duomenys žinomose vietovėse. Atlikus šiuos du žingsnius, W vertė randama pagal šią formulę (žymėjimai pagal 19 pav.):

$$W = z + \frac{t - (t-d)f \frac{\sin(\pi-\zeta)}{a \sin \zeta - \vartheta}}{f \frac{\sin \vartheta}{\sin(\pi-\zeta)} + j}, \quad (21)$$

čia ζ, ϑ, t, d :

$$\zeta = \cos^{-1} \left(\frac{j^2 + f^2 - b^2}{2fj} \right), \quad (22)$$

$$\vartheta = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + f^2 - h^2}{2f} \right), \quad (23)$$

$$t = x - z, \tag{24}$$

$$d = y - z. \tag{25}$$

4.3. Skyriaus rezultatų apibendrinimas

Ilgamečių lietaus duomenų analizė atskleidė, kad Lietuvoje stipraus lietaus ir liūčių galima tikėtis nuo gegužės iki rugsėjo mėnesio, todėl pasiūlyta pagal klimato ypatumus patikslinta „vienos minutės“ lietaus intensyvumo skaičiavimo formulė (19). Apskaičiuota, kad Lietuvoje „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertė yra lygi 60,23 mm/h. Tai yra maždaug dvigubai daugiau nei ITU-R rekomenduojama vertė.

Panaudojant realius stipraus lietaus atvejo duomenis buvo pademonstruota „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertės svarba 0,1 THz ir 0,3 THz dažnių atvejais. Gautos didesnės nei ITU-R rekomenduojamos vertės. Lietaus maksimumo momentu „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertė buvo dvigubai didesnė nei 10 min. intervalais išmatuota vertė. Nustatyta, kad lietaus intensyvumo įvertinimui naudojant dar didesnius intervalus, duomenys yra iškraipomi, nes didžiausio lietaus intensyvumo vertė tampa ženkliai mažesnė ir pasislenka laike, o mažesnio lietaus intensyvumo vertės pakyla. Kai lietaus intensyvumas pradeda mažėti, poliarizacijos tipo ir laiko intervalo tarp matavimų svarba pradeda mažėti.

Kadangi atmosferos lūžio koeficiento išraiškose (12), (16) nėra priklausomybės nuo dažnio, ir laikoma, kad jos yra teisingos iki 100 GHz, žemesniuose dažniuose atliktų atmosferos lūžio rodiklio ir koeficiento skaičiavimo rezultatai gali būti naudojami modeliuojant sub-THz dažniuose veikiančias ryšių sistemas. Nustatyta, kad silpnos aprėpties atveju esminiai signalo pokyčiai atsiranda tuo pačiu metu, kai keičiasi lūžio rodiklis (neigiama vidutinio stiprumo koreliacija). Taip pat stebėti temperatūros inversijos ir super-refrakcijos sluoksniai, kurie įtakoja atmosfera sklindančio spindulio užlinkimą, bei sąlygos susidaryti atmosferos bangolaidžiui, kuriuo signalas gali nusklisti toliau nei tikėtasi, o už jo ribų esančių zonų signalas nepasiekia.

Be to, pasiūlytas modelis (21) - (25) atmosferos lūžio koeficiento vertėms apskaičiuoti vietovėse, kuriose nerenkami meteorologiniai duomenys, naudojant aplink esančių vietovių meteorologinius duomenis.

Ginamasis teiginys, apibendrinantis šiame skyriuje gautus rezultatus:

Modeliuojant 5G/B5G tinkluose naudojamų elektromagnetinių bangų silpninimą atmosferoje, būtina nustatyti momentines („vienos minutės“) lietaus intensyvumo ir atmosferos lūžio rodiklio vertes, nes suvidurkinti duomenys dėl ženklių nuokrypių neatspindi realių verčių.

5. Modeliavimas naudojant klasikinę sklaidos teoriją

5.1. Teoriniai duomenų perdavimo scenarijai

Kaip jau minėta, sklaida vandens lašais gali būti aprašyta klasikinės plokščių bangų sklaidos sferinėmis dalelėmis teorija. Tai yra kompromisinis modelis, nes neatsižvelgiama į lašo formos netobulumus, kai jo skersmuo viršija 1 mm. Šiame darbe detaliau nagrinėjamas Weibull'o pasiskirstymas dauguma atveju geriausiai aprašo lietaus lašų pasiskirstymą [100] ir yra viena iš patikimiausių THz silpninimo aproksimacijų. Atliktas detalus teorinis THz bangų silpninimo dėl lietaus tyrimas trumpų atstumų, siauro spindulio ir kvazioptinio perdavimo atveju¹¹. Remiantis 5G principais, tokie scenarijai bus labiausiai tikėtini siekiant užtikrinti dideles greitaveikas naudojant tiek milimetrinius, tiek sub-THz/THz dažnius. Siauri pluošteliai ir santykinai trumpi atstumai taip pat sumažintų THz bangų ir lietaus lašų sąveikos tūrį. Savo ruožtu tai gali reikšti didelius momentinės absorbcijos nuokrypius nuo gerai žinomų suvidurkintų silpninimo skaičiavimo modelių. Kiek žinoma, toks detalus teorinis tyrimas dar nebuvo atliktas.

Žingsnis po žingsnio bus nagrinėjami du teoriniai duomenų perdavimo atvejai:

1 atvejis. Pirmasis, kaip pagrindas, yra didelės antenos arba jų masyvai (MIMO), santykinai dideli (sub-THz/THz požiūriu) atstumai, kvazioptinis perdavimas (angl. *quasi-optical trasmission*) (bangos ilgis yra optinių komponentų dydžio eilės) ir tolygi pluošto forma tarp antenų. Tikimasi, kad esant tokiam scenarijui nuokrypiai nuo suvidurkintų nuostolių dėl didelio sąveikos tarp sub-THz bangų ir lietaus lašų tūrio modelių, naudojamų [6], [7], [15], [65], [112], [113], bus mažiausi. Esant $L = 100$ m atstumui ir $\lambda = 1$ mm bangos ilgiui, norint išlaikyti $\lambda/d_a \approx 0,1 \times d_a/L$ santykį ir išvengti didelės

¹¹ $L = 4$ m atstumas, $d_{\text{eff}} = 2$ cm efektyvus vidutinis spindulio skersmuo kaip [98] darbe.

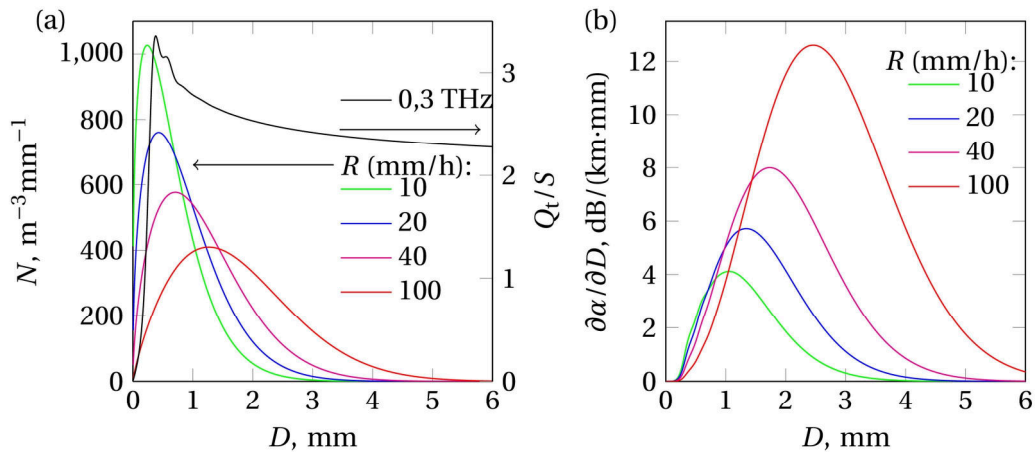
spindulių skėsties (angl. *divergence*), būtų reikalingas maždaug $d_a = 1$ m skersmens parabolinis reflektorius arba antenų masyvas.

2 atvejis. Kvazioptinis perdavimas, siauras spindulys ir trumpi atstumai. Dėl mažo sąveikos tūrio, vidutinis lašų skaičiui būtų ženkliai sumažintas. Šiuo atveju buvo pasirinkti $L = 4$ m atstumas ir $d_{\text{eff}} = 2$ cm efektyvus vidutinis spindulio skersmuo. Tokie dydžiai buvo pasirinkti siekiant palengvinti skaičiavimų rezultatų ir eksperimentinių duomenų, gautų nagrinėjant kontroliuojamą lietu laboratorijos sąlygomis [103], palyginimą.

5.2. Skaičiavimai naudojant Weibull'o pasiskirstymą

Buvo naudojamas (10) lašų pasiskirstymas. Jis grafiškai atvaizduotas 20(a) pav., esant keliems stipraus lietaus intensyvumams (10, 20, 40, 100 mm/h). Kompleksinio lūžio koeficiento ir vandens lašų silpninimo skerspjūvių (jie irgi yra atvaizduoti 20 pav.) skaičiavimai atlikti $t = 20^\circ\text{C}$ temperatūrai ir $f = 0,3$ THz dažniui. Skirtingo dydžio vandens lašų įnašas į lietaus silpninimo koeficientą (8) yra pavaizduotas 20(b) pav.

Kai kurie ypatumai yra pastebimi iš karto. Pirma, mažo skerspjūvio sritys ir žemi Q_t/S santykiai veda link nedidelės įtakos bendriems nuostoliams, lašams, kurių $D < 0,2$ mm net esant mažiausiam iš nagrinėjamų lietaus intensyvumui $R = 10$ mm/h, ir aukščiausiai smulkių lašų koncentracijai. Esant didesniems lietaus intensyvumams, didesni lašai, $D > 0,2$ mm, dominuoja tiek koncentracijoje, tiek įtakodami bendrus nuostolius. 20(b) pav. matomas maksimumas yra paslinktas į didesnių D verčių pusę nei 20(a) pav. Taip yra dėl gana pastovaus Q_t ir skerspjūvio ploto S santykio Q_t/S esant didesnėms D vertėms, dėl ko atsiranda didesnis didesnių lašų įnašas.



20 pav. (a) Lašų dydžio pasiskirstymai kelioms lietaus intensyvo R vertėms; silpninimo skerspjūvio Q_t ir lašo skerspjūvio ploto $S = \pi \cdot D^2/4$ santykio priklausomybė nuo lašo skersmens, kai dažnis yra $f = 0,3$ THz; (b) indėlio į suvidurkintą silpninimo koeficientą priklausomybė nuo lašo skersmens $f = 0,3$ THz dažniui ir įvairioms lietaus intensyvumo R vertėms (ilustracija adaptuota iš [IP2]).

Kai lietaus intensyvumas yra $R \geq 40$ mm/h, numatomas didelis $D > 3$ mm lašų indėlis. Šis faktas brėžia tam tikrą tokių analitinių modelių taikymo ribą, nes buvo pranešta [98] apie žymiai mažesnes nei Weibull'o pasiskirstymu $N(D)$ prognozuotas eksperimentines vertes ties $D \approx 3$ mm, esant lietaus intensyvumams $R = 43,25$ mm/h ir $R = 46,40$ mm/h. Ši problema gali būti apeita laboratorijoje kontroliuojamo lietaus eksperimentuose, kuriuose gali būti pasiekti tiek siauras pasiskirstymas, kai vidutinis lašų skersmuo yra $\bar{D} = 1,9$ mm, tiek didesnės nei 400 mm/h lietaus intensyvumo vertės [103], tačiau šiame darbe dėmesys buvo sutelktas į natūraliai pasitaikantį pasiskirstymą.

Nagrinėjat bazinį 1 atvejį, kuriame daroma bangos sąveikos su nepriklausomai atsirandančiais lašais dideliame tūryje, $V \approx 100$ m³, prielaida, galima iškart padaryti kelias įžvalgas. Net ir siauriems lašų skersmens intervalams, $\Delta D = 0,01$ mm, vidutinis lašų skaičius intervaluose pasiektų dešimtis ir šimtus lašų (daugumai dominančių lašų dydžių). Esant tokiai situacijai, Poisson'o pasiskirstymas (kuris yra tinkamas nepriklausomų lašų

skaičiui nurodytame dydžių intervale) gali būti aproksimuojamas normaliu pasiskirstymu pagal tikimybės tankio funkciją:

$$f(n_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n_i-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (26)$$

čia n_i yra su banga sąveikaujančių lašų skaičius, kurių dydis yra tarp $D_i - 0,5\Delta D$ ir $D_i + 0,5\Delta D$, D_i yra vidutinis lašo skersmuo i -joje srityje, V yra bangos ir lašų sąveikos tūris, o lašų vidurkis srityje ir tūryje lygus $\mu = \sigma^2 = N(D_i)V\Delta D$.

Nuostoliai α_i , kuriuos sukelia lašai i -ajame intervale, gali būti įvertinti naudojant (8) formulę, integravimą mažais ΔD pakeičiant daugyba iš ΔD :

$$\alpha_i \approx 4,343n_i Q_t(D_i, \lambda, m)/V, \quad (27)$$

ir tokiu būdu α_i galioja normalusis skirstinys su vidurkiu (dB/km vienetai):

$$\bar{\alpha}_i = 4,343N(D_i)Q_t(D_i, \lambda, m)\Delta D, \quad (28)$$

ir dispersija:

$$\sigma_i^2 = (4,343Q_t(D_i, \lambda, m))^2 N(D_i)\Delta D/V = \mu_i^2/N(D_i)V\Delta D. \quad (29)$$

Nepriklausomų lašų modelyje, silpninimo koeficientas α_r platesniems intervalams tarp i_1 ir i_2 gali būti išreikštas kaip:

$$\alpha_r = \sum_{i=i_1}^{i_2} \alpha_i, \quad \bar{\alpha}_r = \sum_{i=i_1}^{i_2} \bar{\alpha}_i, \quad \sigma_r^2 = \sum_{i=i_1}^{i_2} \sigma_i^2. \quad (30)$$

Šiame darbe tokie skaičiavimai buvo atlikti keliems lietaus intensyvumams, R . Skaičiavimo rezultatai yra pateikti 10 lentelėje. Triguba σ_r vertė, $3\sigma_r$, padeda lengviau įvertinti ribą, kurioje telpa beveik visos (jei visiškai tiksliai – 99,7%) α_r vertės. Taip pat buvo parinkti trys lašų dydžio intervalai (grubiai – maži, vidutiniai ir dideli lašai) kiekvienai R vertei, kad būtų gautos apytiksliai lygios μ_r vertės. $V = 100 \text{ m}^3$ tūryje, $3\sigma_r$ vertė 1% viršija vidutinę sugerties koeficiento vertę visam lašų dydžio intervalui tarp $D_1 = 0$ ir $D_2 = 6 \text{ mm}$ abiem nagrinėjamais atvejais. Didžiausių lašų įnašas (kai

skersmenys yra atitinkamai $D > 1,57$ mm ir $D > 1,9$ mm) į nuokrypį abiem atvejais yra dominuojantis.

10 lentelė. Silpninimo koeficientai ir tikėtini nuokrypiai $f = 0,3$ THz dažniui, $V = 100$ m³ tūryje.

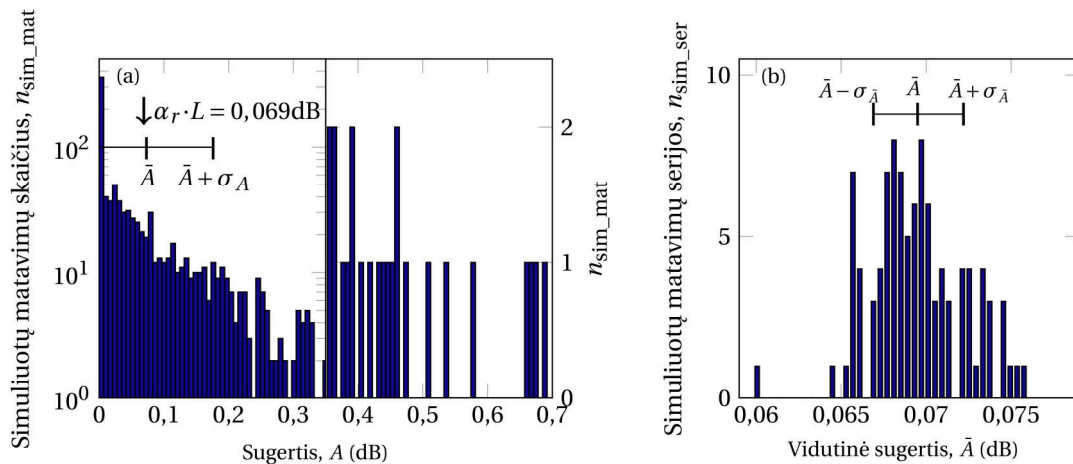
R , mm/h	D_1 , mm	D_2 , mm	α_r , dB/km	$3\sigma_r$, dB/km
10	0	1,00	2,15	0,032
	1,01	1,56	2,12	0,054
	1,57	6,00	2,13	0,087
	0	6,00	6,39	0,108
20	0	1,24	3,47	0,050
	1,25	1,89	3,48	0,083
	1,90	6,00	3,49	0,132
	0	6,00	10,44	0,163

Šis rezultatas parodo tiek galimybes, tiek papildomus iššūkius. Viena vertus, vidutinis skersmuo $\bar{D} = 1,9$ mm ir siauras dydžių pasiskirstymas jau buvo gautas laboratorijoje valdomo lietaus eksperimentuose [103], todėl juose naudota eksperimentinė įranga ir matavimų duomenys galėtų būti panaudota statistiškai vertinant didelių lašų sukeltą „šratinį triukšmą“ (angl. *shot-noise*), papildant vidutinės sugerties įvertinimą. Tačiau eksperimentiškai stebėti žemesni nei Weibull'o pasiskirstymu numatyti didžiausių lašų [98] skaičiai realaus lietaus atveju reiškia, kad teoriniame modelyje triukšmas tam tikra prasme gali būti pervertintas, ir laboratorijoje kontroliuojamo lietaus eksperimento rezultatų ir teorinių skaičiavimų perskaičiavimas ne visais atvejais yra paprastas. Vis dėlto, tiesioginė $\sigma_i \propto V^{-1/2}$ priklausomybė formulėje (29) reiškia, kad galima tikėtis, jog $3\sigma_r$ nuokrypių išaugs į dešimtis procentų nuo vidutinės vertės, kai pasiekiamas $V \approx 1$ m³ signalo-lietaus sąveikos tūris. Šių laikų bevielams tinklams toks tūris yra itin mažas. Pavyzdžiui, atstumas tarp vartotojo įrangos ir bazinės stoties būtų apribotas iki maždaug 100 metrų (atitinka „THz sieną“ [14]), net esant 1 dm² vidutiniam efektyviam skerspjuviui spindulio iš kompaktiškos itin kryptingos antenos, dėl ko bazinių stočių tankumas turėtų būti dešimtys ar šimtai bazinių stočių kvadratiniam kilometre.

Kita vertus, tokie skaičiai yra būtent tos pačios eilės kaip numatoma itin tankiems lauko 5G tinklams [114].

Papildomi iššūkiai kyla nagrinėjant 2 atvejį ir lyginant jį su eksperimentiniais duomenimis iš [103]. Mažas tūris ir 20(a) pav. duomenys reiškia, kad vidutinis su banga sąveikaujančių lašų skaičius gali būti gerokai mažesnis nei 1 kiekvienam i . Dėl to Poisson'o statistika buvo naudojama vietoje normaliojo skirstinio. Be to, turi būti atsižvelgta ir į daugkartinių matavimų ([103] jų atlikta 1000) vidurkinimo ir eksperimente vienodai pasiskirsčiusių lašų dydžių įtaką.

Tokių imituotų matavimų, atvaizduojančių 1000 skaitmeniškai sugeneruotų lašų dydžių pasiskirstymą komunikacijų kanale, rezultatai yra pavaizduoti 21 pav.



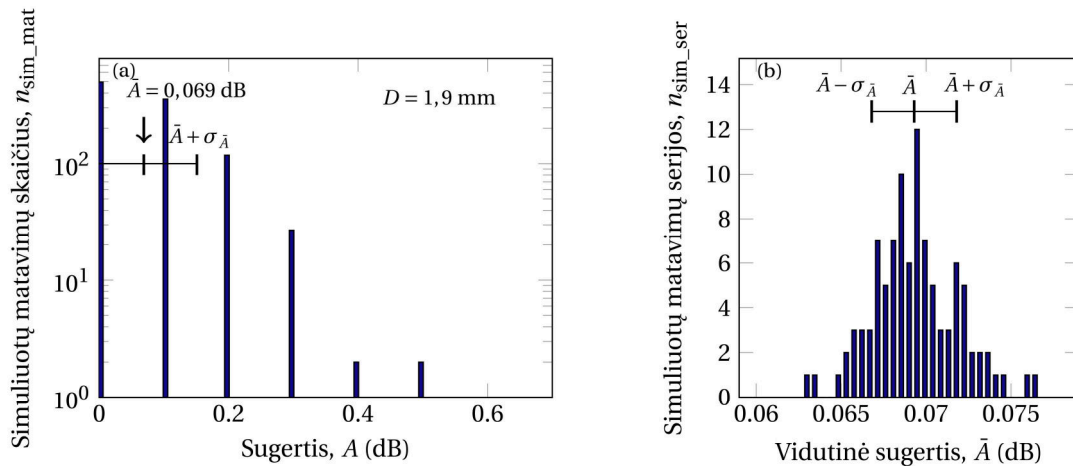
21 pav. (a) 1000 sumodeliuotų sugerties A verčių, kai lietaus intensyvumas $R = 40$ mm/h, o lašų dydžiai yra pasiskirstę pagal Weibull'o pasiskirstymą. Grafikas yra perskirtas per vidurį, siekiant geriau pademonstruoti žemesnius $n_{\text{sim_mat}}$ skaičius su aukštesne sugertimi. Stulpelio plotis atitinka 0,007 dB. (b) Suvidurkintų A verčių pasiskirstymas, gautas 100 sumodeliuotų sugerties duomenų rinkinių eilėje, suvidurkinant 1000 sugerties verčių kiekviename rinkinyje. Taip pat kaip (a), centrinė vertikali linija nurodo gautą vidurkį ir standartinę nuokrypį nuo vidurkio ($\pm\sigma_{\bar{A}}$) (ilustracija adaptuota iš [IP2]).

Kiekvienam imituotam matavimui ir kiekvienam i -ajam lašų dydžio intervalui, remiantis Poisson'o skirstiniu, buvo sugeneruotas atsitiktinis lašų

skaičius. Po to visų lašų įnašas buvo suintegruotas ir gauta silpninimo A vertė kiekvienam konkrečiam lašų dydžio pasiskirstymui. Tokių imituotų pavienių „matavimų“ skaičių $n_{\text{sim_mat}}$ 0,007 dB sugerties intervalais atvaizduoja 21 pav. histograma. Tame pačiame 21 pav. rodykle yra pažymėta vidutinė tikėtina sugertis $\alpha_r \cdot L = 0,069$ dB, čia ilgis $L = 4$ m. Akivaizdu, kad keletas tokių skaitmeniškai sugeneruotų lašų rinkinių sukeltų apytiksliai viena eile didesnę sugertį nei vidutinė vertė.

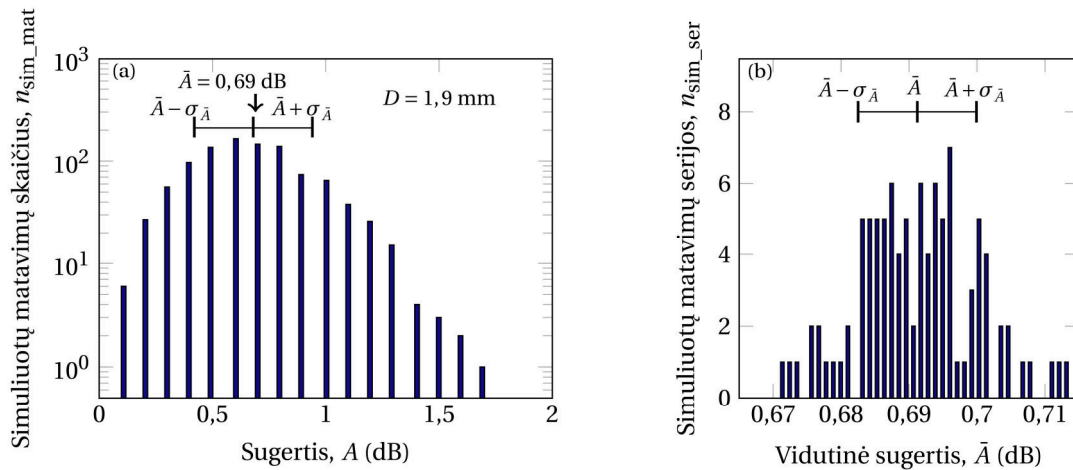
Vidutinė sugerties vertė \bar{A} ir jos standartinis nuokrypis σ_A taip pat buvo apskaičiuoti ir pavaizduoti linijomis 21(a) pav. Pastebimas nežymus skirtumas tarp $\alpha_r \cdot L$ ir \bar{A} , kas reiškia, kad 1000 lašų rinkinių (vidurkinami duomenų taškai eksperimente) vis tiek nepakanka, kad būtų gauta tiksli vidutinės sugerties vertė. Norint patikrinti šią prielaidą, imituotas eksperimentas buvo pakartotas 100 kartų (kaskart suvidurkinant 1000 matavimų), \bar{A} pasiskirstymas yra pavaizduotas 21(b) pav. Tai patvirtina, kad nuokrypiai nuo realios suvidurkintos vertės yra galimi ir esant tokiam dideliame suvidurkintų duomenų kiekiui.

Tokių pačių skaitmeniškų eksperimentų serija buvo pakartota tam pačiam 0,069 dB suvidurkintam nuostoliui, bet esant vienam leistinam lašų skersmeniui $D = 1,9$ mm. Tai buvo daroma siekiant įvertinti galimą homogeniškesnių lašų dydžių įtaką. Šio modeliavimo rezultatai yra atvaizduoti 22 pav., kurio (a) dalyje matoma, kad šiuo atveju histograma yra skilusi į kelis stulpelius, atitinkančius 0-6 lašų atvejus. Pavienio eksperimento atveju suskaičiuotas standartinis nuokrypis yra šiek tiek mažesnis, palyginus su 21(a) pav. Kita vertus, atlikus 100 eksperimentų seriją gauti vidutinė vertė ir jos standartinis nuokrypis, pavaizduotas 22(b) pav., yra labai artimi gautiems 21(a) pav. Tai patvirtina, kad itin didelės (t.y. žymiai daugiau nei 1000 matavimų) eksperimentų serijos, nepaisant dydžio apribojimų, greičiausiai duotų labai panašius statistinius rezultatus.



22 pav. (a) 1000 sumodeliuotų sugerties verčių $f = 0,3$ THz dažniui su $0,069$ dB vidutiniu ir Poisson'o tikimybės pasiskirstymu lašams, kurių skersmuo yra $1,9$ mm. (b) Vidutinių A verčių, gautų sumodeliavus 100 sugerties duomenų rinkinių po 1000 verčių. Vertikalios linijos nurodo vidutinius ir standartinius nuokrypius (tuo pačiu būdu kaip 21 pav.) (ilustracija adaptuota iš [IP2]).

Tas pats $0,069$ dB suvidurkintas nuostolis buvo pasirinktas kaip bazinis, lyginant Weibull'o pasiskirstymo funkcijos aproksimacijas realaus lietaus ir vieno lašo dydžio laboratorijoje kontroliuojamo lietaus atvejais. Vienodas lietaus intensyvumas būtų blogas variantas, kadangi sąveika tarp mažų lašų laboratorinių sąlygų atveju ir skirtingi dydžių pasiskirstymai lyginant su tikru lietumi neišvengiamai įtakoja vidutinės sugerties skirtumus tiems patiems lietaus intensyvumams. Be to, dauguma šioje literatūroje pateiktų duomenų taškų yra ekstremalaus lietaus situacijai, kai R yra lygus nuo 50 iki 400 mm/h, dėl ko atsiranda daugiau nei eile didesnė sugertis intervalo viduryje.



23 pav. (a) 1000 sumodeliuotų sugerties verčių su vidutiniu 0,69 dB ir Poisson'o pasiskirstymu lašams, kurių skersmuo yra 1,9 mm $f = 0,3$ Thz dažnyje. (b) Suvidurkintų A verčių pasiskirstymas, gautų sumodeliavus 100 sugerties duomenų rinkinių, suvidurkinant vertes kiekviename rinkinyje. Vertikalios linijos žymi vidutinį ir standartinį nuokrypius tuo pačiu būdu kaip 21-22 pav. (ilustracija adaptuota iš [IP2]).

Vėliau buvo atlikta papildoma eksperimentų eilė 0,69 dB suvidurkintam nuostoliui, atitinkančiam ekstremalaus lietaus atvejį. Modeliavimo rezultatai yra atvaizduoti 23 pav. Dispersija yra sumažėjusi apie 30 kartų. To ir buvo galima tikėtis, nes sąveikaujančių lašų skaičius padidėjo. Gautas panašus rezultatas kaip laboratorijoje kontroliuojamo lietaus eksperimente.

Taigi galima daryti išvadą, kad laboratorinėmis sąlygomis atlikti eksperimentai galėtų būti naudingas įrankis vertinant (kai kuriais atvejais galbūt net pervertinant, tačiau atsižvelgiant į anksčiau aprašytus lietaus ypatumus, pervertinimas gali būti naudingas) lietaus pavidalo kritulių sukeltų nuostolių viršutinę ribą, nepaisant lašų dydžio pasiskirstymo skirtumų.

5.3. Skyriaus rezultatų apibendrinimas

Šioje dalyje buvo įvertinti sugerties nuokrypiai THz signalui sklindant lietaus sąlygomis. Išnagrinėti du scenarijai, atsižvelgta į labiausiai tikėtinus B5G technologijų projektavimo principus. Skaičiavimai atlikti remiantis literatūroje aprašytais faktinio lietaus ir laboratorijoje kontroliuojamo lietaus lašų dydžio pasiskirstymais. Modeliavimo rezultatai parodė, kad kai THz bangos ir lietaus sąveikos tūris sumažėja iki apytiksliai 1 m^3 , nuokrypiai gali būti palyginami su vidutinėmis sugerties vertėmis. Siauro, kelių centimetrų skersmens spindulio ir keleto metrų atstumo atveju (situacija, atitinkanti laboratorijoje atliktą eksperimentą [103]), nuokrypiai stipraus lietaus sąlygomis galėtų viršyti vidutinę vertę eile. Ekstremalaus lietaus atveju modeliavimo rezultatai atitiko eksperimento rezultatus. Tai patvirtina tokių eksperimentų taikymo galimybę. Kadangi dauguma esamos pramonėje naudojamos įrangos nėra suprojektuota atlikti kalibruotus 5G/B5G belaidžiu tinklu matavimus bangai sklindant oru, tokie eksperimentai gali būti naudojami siekiant prognozuoti tikėtiną duomenų perdavimo našumą.

Ginamasis teiginys, apibendrinantis šiame skyriuje gautus rezultatus:

Dėl 5G/B5G tinklams numatomo kvazioptinio perdavimo ir santykinai mažų atstumų dabartinių bevielio ryšio sistemų atžvilgiu, galimi silpninimo nuokrypiai nuo verčių, apskaičiuojamų pagal šiandien naudojamus standartizuotus modelius.

6. Spinduliuotės neatspindinčių bei spinduliuotės fazę reguliuojančių kompaktiškų optinių elementų THz dažnių ruožui modeliavimas

Šioje dalyje atliekamas spinduliuotės neatspindinčių bei spinduliuotės fazę reguliuojančių kompaktiškų optinių elementų THz dažnių ruožui modeliavimas. Pagamintas 0,6 THz dažniui pritaikytas optinis komponentas – atspindžius mažinančios ir fokusuojančios zoninės plokštelės prototipas, kurio veikimas buvo pademonstruotas.

6.1. Struktūros modeliavimas

Fokusavimas zoninėmis plokštelėmis (ZP, angl. *zone plates*), sukomponuotomis iš AR struktūrų, pagamintų lazerinės abliacijos būdu, turi potencialo kompaktiškumo požiūriu. Be to, neišvengiami formos netobulumai, dėl fizinių procesų atsirandantys lazerinio apdirbimo metu, gali būti kompensuoti padidinant gylį, o pasiektas pralaidumas siekia >90% 0,5 – 0,6 THz dažniams. Šie rezultatai pasiekti naudojant silicio plokštelę, kurios abu paviršiai buvo struktūrizuoti. Toks rezultatas atveria kelią aukšto efektyvumo su mažais nuostoliais plokštelių gamybai. Galimo AR struktūrų padėties ant abiejų paviršių nesutapimo įtaka buvo įvertinta skaitmeninio modeliavimo metodais. Modeliavimo rezultatai nenumatė jokių reikšmingų bangos fronto iškraipymų. Reikia pabrėžti, kad naujai sumodeliuotos dvipusės AR zoninės plokštelės, skirtos 0,6 THz dažniui, fokusavimo dydis yra artimas difrakcijos ribai.

Siekiant šio rezultato teko padaryti keletą kompromisų. Jie buvo išnagrinėti skaitmeninio modeliavimo būdu, atliekant eilę simuliacijų. Pirmas kompromisas yra susijęs su santykinai dideliais bangos ilgiais, lyginant su padėklo storium. Paprastai puslaidininkinio padėklo storis būna ~500 μm, artimas 0,6 THz dažnio spinduliuotei vakuume, todėl struktūrinio sluoksnio gylis turi būti kruopščiai optimizuotas AR naudojimui ant abiejų tokių santykinai plonų plokštelių pusių. Antras kompromisas yra susijęs su puslaidininkių lazerinio

apdirbimo specifika: sklaida nuo paviršiaus struktūrų, ištirpusio paviršiaus tekėjimas, abliuoto paviršiaus pakartotinis nusėdimas. Dėl šių priežasčių gali susiformuoti saviorganizuoti mikro- ir nano-struktūriniai paviršiai [115] ir padidėti THz dažnių sugerties nuostoliai, net jei lazeriu apdirbto sluoksnio šiurkštumas būtų mažesnis nei bangos ilgis [116]. Dėl šios priežasties struktūros su mažiau abliuotomis šoninėmis sienelėmis tūrio vienetu ir didesnės AR struktūros turėtų tinkamesnes savybes. Lazerinės spinduliuotės fokusavimas yra kita problema, todėl struktūros su nuožulnesnėmis šoninėmis sienelėmis lazerinio apdorojimo režimui suteikia daugiau lankstumo nei struktūros su statesnėmis šoninėmis sienelėmis. Dėl šių trijų priežasčių buvo įvertintos daug didesnės (50-150 μm) struktūros, lyginant su ankstesniais darbais AR paviršių srityje ir panašiuose dažniuose (apie 30 μm literatūroje [75]). Bangos fronto iškraipymai ir interferencija nuo kaimyninių AR struktūros elementų taip pat turi būti įvertinti, jei pasirenkami per dideli periodai.

Ypatingas dėmesys buvo kreipiamas bangos fronto valdymui, naudojant fazės poslinkį AR struktūrose. Neseniai buvo panaudotas sutrumpintas THz Beselio spindulys, norint vaizdinimo sistemoje, naudojamoje tiriamo objekto THz tomografijai ir trijų dimensijų formos skaičiavimui su skaitmeniniu apdorojimu, pasiekti linijinį fokusavimą, viršijantį 120 mm ilgį [117]. Šioje sistemoje buvo naudojamas THz lęšis su kūginiu paviršiumi (angl. *axicon lens*). Tačiau pastaraisiais metais buvo išnagrinėtos ir kelios kitos bangos fronto valdymo galimybės, kaip THz plazmoninis Beselio spindulio formuotuvai [118] arba „nutekančios bangos antenos“ (LWA, angl. *leaky wave antennas*) [119]. Taip pat buvo aktyviai išnagrinėtos paprastos komponentų gamybos galimybės, pavyzdžiui, trimatis (3D) spausdinimas [120]. Lyginant su anksčiau paminėta opcija, lazeriu apdorotos struktūros plonoje puslaidininkinėje plokštelėje turėtų pranašumą dėl kompaktiško dydžio, žemos prototipo kainos, gamybos lankstumo ir mažų kiekių gamybos galimybės. Toks lankstumas yra papildoma priežastis AR struktūrų gamyboje teikti pirmenybę lazeriniam apdirbimui, o ne DRIE ir mechaninio pjaustymo metodams, naudotiems vienodam

struktūrizavimui atitinkamai [73], [74] ir [76] darbuose. Dėl šios priežasties buvo išnagrinėti keli AR sluoksnių dizainai ir gyliai tiek skaitmeniniais metodais, tiek eksperimentiškai, kol buvo nustatyta, ar 2π fazės poslinkiai gali būti pasiekti keičiant AR savybes.

Galiausiai buvo aprašytas ir įvertintas dvipusės zoninės plokštelės, sudarytos iš spinduliuotės neatspindėjimo ir fazės poslinkio funkcijas atliekančių struktūrizuotų sluoksnių, fokusavimo veikimas. Nustatyta, kad THz spinduliuotės fokusavimas yra artimas difrakcijos ribai, patvirtinant nagrinėtų struktūrų fazės poslinkių vienodumą. Fokusavimui reikalingos struktūros buvo pagamintos 500 μm storio silicio (Si) plokštelėje, kas suteikia iš esmės plonesnį fokusavimo sprendimą nei neseniai pademonstruoti 6,19 mm storio Si lęšiai su AR struktūrizuotais paviršiais [75].

6.1.1. Ketvirčio bangos ilgio struktūrizuoti sluoksniai

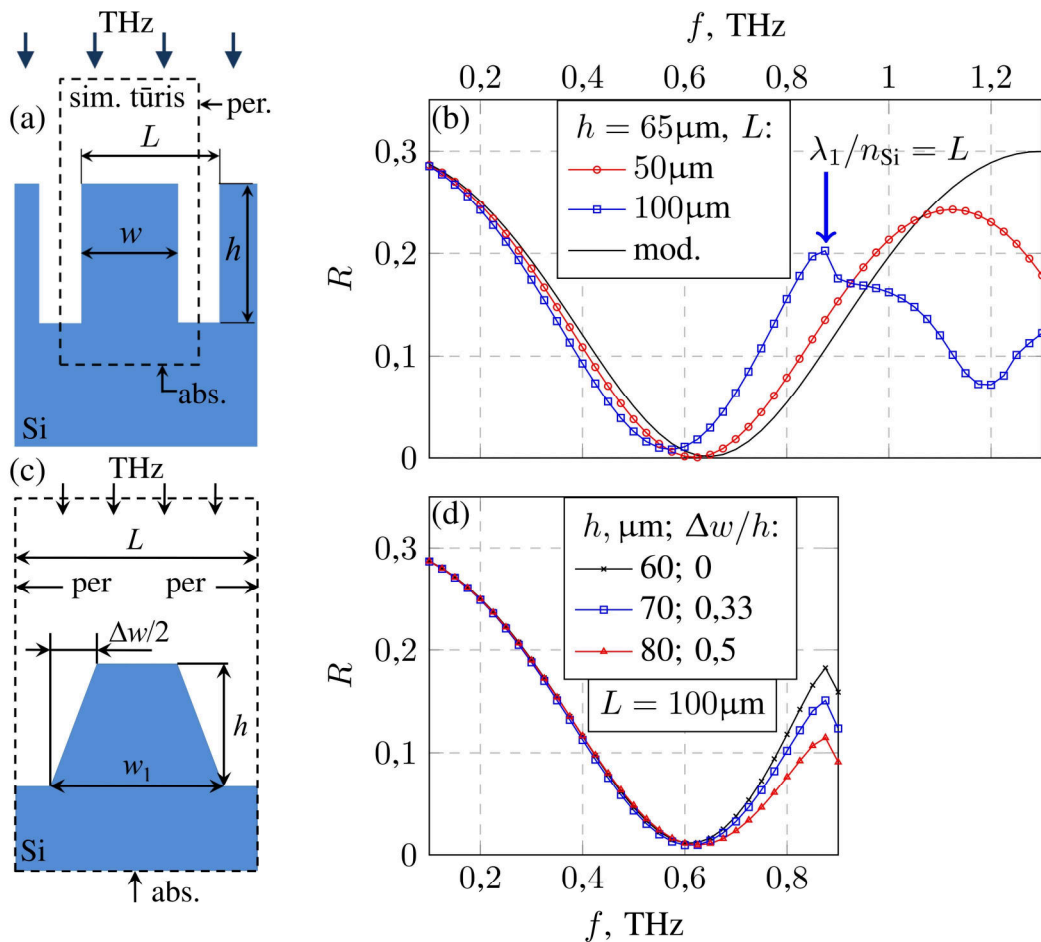
A. Modeliavimo rezultatai

Šiame tyrime pirmiausia buvo išnagrinėti ir palyginti du AR sluoksnių tipai. Pirmasis buvo pagamintas su vertikaliomis šoninėmis sienelėmis (24(a) pav.) – tokia struktūra gali būti pagaminta anizotropinio arba DRIE ėsdinimo būdais. Antrasis buvo pagamintas su nuožulniomis šoninėmis sienelėmis (24(c) pav.) – tokia struktūra yra optimizuota lazeriniam mikro-apdirbimui.

Šios dvi struktūros toliau tekste bus vadinamos atitinkamai „A tipo“ ir „B tipo“. Pradinis šių struktūrų storis buvo apytiksliai lygus 0,6 THz spinduliuotės ketvirčiui bangos ilgio, efektyvus lūžio rodiklis – tarp oro ir silicio. Modeliavimas buvo atliktas naudojant nemokamai prieinamą MIT Meep [108] programinį paketą. Pradinei dvimatei pasikartojančių elementų eilei buvo modeliuojamas bangos sklidimas vienu segmentu ir pritaikytos Bloch'o periodinės kraštinės sąlygos segmento šoninėms sienelėms. Dauguma pristatomų rezultatų buvo gauti $d = 2,5 \mu\text{m}$ žingsniu visomis kryptimis (50 μm blokas, rezoliucijos vertė 20) su sub-pikselių išlyginimu [121], siekiant kelių

simuliacijų atveju gauti kuo tikslesnius rezultatus. Modeliuojant THz dažniams buvo daroma prielaida, kad naudojamas didelės varžos silicis, kurio santykinė dielektrinė konstanta yra $\epsilon_{Si} = 11,7$ [122]. Siekiant viena simuliacija gauti visą atspindžio spektrą buvo modeliuojamas impulsinės THz bangos (angl. *pulsed wave*) sklidimas.

Modeliavimo rezultatai „A tipo“ AR dangoms yra pateikti 24(b) pav. Modeliavimas buvo atliktas naudojant pastovų užpildymo faktorių (likusio silicio tūrio ir viso sluoksnio tūrio santykis), $FF = 0,64$, ir kintantį 24 (a) pav. pavaizduotą masyvo periodą, L . Kai kurie nuo dažnio ir dydžio priklausantys dėsningumai yra matomi iš karto. Kai masyvo periodas yra $L = 50 \mu\text{m}$, atspindžio spektras yra artimas paprastam Fabry-Pérot interferencijos ploname ketvirčio bangos ilgio, $\lambda/4$, storio sluoksnyje su tarpiniu lūžio rodikliu (angl. *interim refractive index*) $f = 0,6$ THz dažniui.



24 pav. AR struktūros optimizavimas lazeriniam mikro-apdirbimui. (a) AR struktūros su vertikaliomis šoninėmis sienelėmis eskizas. Punktyrinė linija rodo vieno struktūros periodinio elemento tūrį, kuriame buvo atlikta FDTD simuliacija (žymimas „sim. tūris“). Šio tūrio šoninėms sienelėms buvo pritaikytos periodinės kraštinės sąlygos (žymima „per.“). Sugerties ribos nurodytos tūrio viršutiniame ir apatiniame paviršiuose (žymima „abs.“). Siekiant išryškinti AR dangos įtaką ir neįtraukti kitų atspindžių, buvo pasirinktas pusiau begalinis (angl. *semi-infinite*) padėklas; (b) apskaičiuotas atspindžio spektras trims dangoms, kurių gylis yra $h = 65 \mu\text{m}$, užpildymo faktorius yra $FF = 0,64$ ir pagrindo santykis su periodu $\omega/L = 0,8$, bet kinta periodas L . Taip pat palyginimui pateiktas analitinis sprendinys, grindžiamas supaprastinto lygiagrečio grandinės modeliu efektinės dielektrinės konstantos įvertinimui [72] (žymima juoda linija); (c) AR struktūros su nuožulniomis šoninėmis sienelėmis eskizas ir parametrai, naudojami tolimesnėse simuliacijose. Punktyrinė linija žymi struktūros su vertikaliomis šoninėmis sienelėmis kontūrą; (d) modeliavimo rezultatai, kai atspindžio minimumo padėtis yra fiksuota, o struktūros aukštis ir šoninių sienelių nuolydis kinta. Siekiant išlaikyti pastovų vidutinį užpildo faktorių, $FF = 0,64 \pm 0,01$, aprašant nuožulnias šonines plokšteles buvo didinamas piramidės pagrindo plotis. Siekiant išryškinti vieno AR struktūros elemento savybes, modeliavimas buvo atliktas pusiau begaliniam padėklui (adaptuota iliustracija iš [IP1]).

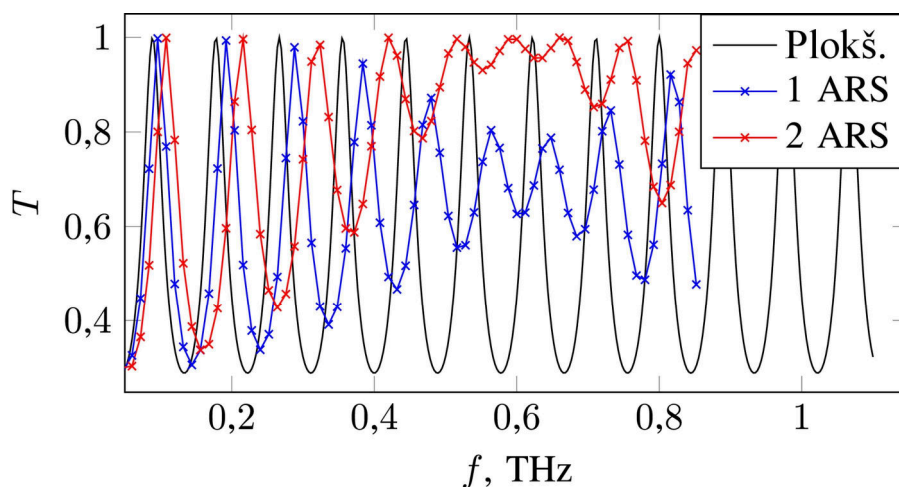
Išvedant santykinę dielektrinę konstantą analitiniams skaičiavimams buvo naudojamas trijų kondensatorių ekvivalentiškos grandinės modelis [72]

(palyginimui rezultatas pažymėtas juoda linija). Esminis $\lambda/2$ atspindžio maksimumo sumažėjimas ir mažesnis nei tikėtasi $f = 1,2$ THz dažnis atskleidė didelį nuokrypį nuo paprasto modelio didesniame dažnyje. Dažnio sumažėjimas buvo stebimas ir netoli $f = 0,6$ THz, kai masyvo periodas buvo padidintas iki $L = 100 \mu\text{m}$. Tačiau kai rezonansinis dažnis padidėja ir THz spinduliuotės dažnis sumažinamas žemiau $\lambda_1 = L \cdot n_{\text{Si}}$ ribos, atsiranda palankios sąlygos pirmosios eilės interferencijai dėl antrinių bangų, sklaidomų nuo kiekvieno masyvo elemento. To pasekoje, atspindžio spektras toliau yra iškraipytas palyginus su Fabry-Pérot interferencijos efektinio lūžio rodiklio sluoksnyje modeliu. Kai $L = 150 \mu\text{m}$, riba pasiekama esant žemesniam dažniui nei $f = 0,6$ THz. Todėl toliau plačiau buvo tiriamos struktūros, kurių masyvo periodas yra $L = 100 \mu\text{m}$. Toks periodas yra pakankamai didelis, kad abliacijos būdu būtų gautos pastovios AR struktūrų savybės, tačiau taip pat yra per mažas, kad būtų išvengta papildomos sklaidos nuo individualių masyvo elementų ir būtų užtikrintas tik nedidelis nukrypimas nuo efektyvios terpės modelio (angl. *effective medium model*). Taip pat reikia pažymėti, kad šis nukrypimas yra naudingas, nes tai lemia sumažintą pirmojo atspindžio minimumo dažnį, lyginant su smulkesnėmis struktūromis (24 pav.).

Gamyboje naudojant lazerinį mikro-apdirbimą reikia įskaityti ir daugiau papildomų svarbių optimizavimo faktorių. Dėl spindulio fokusavimo tobulai vertikalios sienelės yra vargu ar įmanomos. Dėl to buvo atliktos kelios serijos papildomų modeliavimo darbų, nekeičiant užpildymo faktoriaus, $FF = 0,64 \pm 0,01$, bet pakeičiant struktūros elementų šoninių sienelių nuolydžius (24(c) pav.). Gaunamos piramidės formos struktūros. Nagrinėjant šiuo atveju gautus rezultatus galima pastebėti kelis bruožus. Esant fiksuotam gyliui h ir didėjant senelių nuolydžiui, atspindžio minimumas nežymiai pasislenka į aukštesnių dažnių pusę. Šis poslinkis turi būti kompensuojamas didinant gylį h (kaip parodyta 24(d) pav.). Tokių dažnio pokyčių buvo tikimasi, nes struktūros elementų šoninių sienelių nuolydis sumažina skirtumus tarp efektyvaus lūžio rodiklio tiek struktūros apačioje, tiek šalia piramidės viršūnės.

Piramidės skerspjūvio plotas yra proporcingas aukščio kvadratui, todėl užpildyta silicio (Si) kiekio dalis greitai sumažėja dėl nuolydžio viršutinėje piramidės struktūros dalyje. Tai taip pat sumažina efektinį lūžio rodiklį šalia struktūrizuoto sluoksnio viršaus. Kai tik Si piramidės pagrindo plotis ω_1 pasiekia struktūros masyvo periodą L , aukščiau esančios dalies efektinis lūžio rodiklis pasiekia tūrinio Si efektinį lūžio rodiklį, taip sumažindamas šios srities indėlį į pasiskirsčiusius atspindžius. Šis efektas yra gerai matomas 24(d) pav., nes papildomas 10 μm gylis buvo reikalingas, kad sutaptų atspindžio spektras žemuose dažniuose pereinant nuo $\Delta\omega/h = 0,33$ iki $\Delta\omega/h = 0,5$ santykio, ir 5 μm gylis pereinant nuo $\Delta\omega/h = 0,2$ iki $\Delta\omega/h = 0,33$ santykio. Nepaisant to, jokių reikšmingų spektro iškraipymų dėl šoninių sienelių nuolydžių nebuvo tikimasi.

Siekiant atskleisti vieno AR struktūros elemento ypatybes, iki šiol visuose jau pateiktuose modeliuose buvo tariama, kad naudojamas pusiau begalinis padėklas. Situacija gali būti sudėtingesnė svarstant baigtinio storio padėklo atvejį ir antro struktūrizuoto sluoksnio galimybę. 25 pav. yra pavaizduotas sumodeliuotas Si plokštelės su abliuotomis AR struktūromis ant vienos ar dviejų jos pusių pralaidumo spektras. Taip pat palyginimui yra pavaizduotas analitiškai apskaičiuotas spektras 500 μm storio plokštei. Siekiant palengvinti palyginimą su 24(d) pav., buvo naudoti tie patys parametrai: $\Delta\omega/h = 0,33$ santykis, $h = 70 \mu\text{m}$ abliacijos gylis ir užpildymo faktorius $FF = 0,64 \pm 0,01$.



25 pav. Modeliavimo rezultatai. Si plokštelių pralaidumo spektrai: 500 μm storio Si plokštelei su abiem plokščiais paviršiais (žymima „Plokšč.“); su vienu AR struktūrizuotu $h = 70 \mu\text{m}$ gylio paviršiumi (žymima „1 ARS“); su dviem AR struktūrizuotais $h = 70 \mu\text{m}$ gylio paviršiais (žymima „2 ARS“) (ilustracija adaptuota iš [IP1]).

Čia išryškėja keli svarbūs ypatumai. Esant žemiems dažniams, žemiau 0,2 THz, sąlyginai plonos AR struktūros iš esmės neturi įtakos didžiausioms ir mažiausioms pralaidumo vertėms, tik minimumo ir maksimumo dažniai yra paslinkti aukštyne dėl šiek tiek mažesnio efektyvaus lūžio rodiklio plokštelės AR struktūrizuotose dalyse. Kaip tikėtasi, periodinis intensyvumo kitimas dėl Fabry-Pérot interferencijos tampa daug mažiau išreikštas, kai artėjama prie 0,6 THz dažnio, kuriame tikimasi geriausio AR struktūros veikimo. Plokštelės su dviem AR struktūrizuotais paviršiais pralaidumas artėja link 100% šalia šio dažnio, kai apytiksliai 30% atspindys nuo plokščio paviršiaus riboja vidutinį pralaidumą plokštelės su vienu struktūrizuotu paviršiumi atveju. Galima pastebėti, kad esminiai pralaidumo svyravimai lieka dėl sąveikos tarp plokščio paviršiaus didelio amplitudinio atspindžio koeficiento ir vis dar svarbaus struktūrizuoto paviršiaus atspindžio koeficiento.

B. Lazerinis mikro-apdirbimas

AR struktūrų gamybai buvo naudojamas pagrindinės harmonikos (1064 nm) pikosekundinio didelio kartojimo dažnio lazeris („Atlantic 60“ iš „Ekspla“, kurio parametrai yra: 13 ps, 1 MHz, 60 μJ). Mikro-piramidžių masyvų gamybai buvo naudojamos dvi spindulių perdavimo sistemos. Trijų pagrindinių nagrinėtų struktūrų tipų parametrai yra pateikti 11 lentelėje. Struktūrų pavadinimai yra sudaryti iš struktūros tipo (visais atvejais tai buvo „B tipo“ struktūra), eilės numerio ir raidės, reiškiančios, kad struktūra buvo išnagrinėta arba eksperimentiškai („E“), arba skaitmeninio modeliavimo būdu („A“).

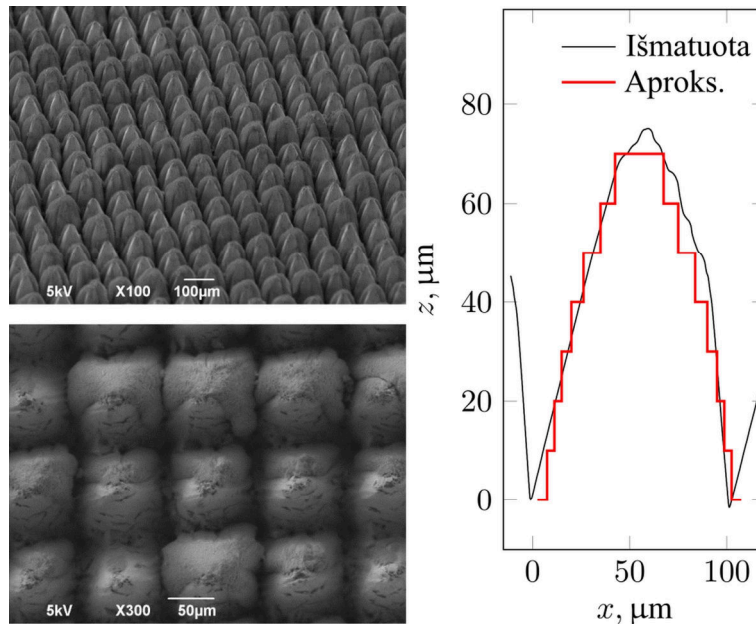
11 lentelė. Abluotų AR struktūrų tipai ir jų teoriniai aproksimavimo parametrai [IP1].

Abluotos struktūros tipas	Profilis	Dvipusė	Modeliuotos struktūros tipas	Aproksimavimo parametrai
B _{1E}	26 pav.	Ne	B _{1A}	$h = 70 \mu\text{m}$
B _{2E}	28 pav.	Taip	B _{2A}	$h = 100 \mu\text{m}$, $\omega_1 = 75 \mu\text{m}$, $\Delta\omega/h = 0,25 \mu\text{m}$
B _{3E}	28 pav.	Taip	B _{3A}	$h = 195 \mu\text{m}$, $\omega_1 = 100 \mu\text{m}$, $\Delta\omega/h = 0,33 \mu\text{m}$

Gaminant B_{1E} struktūrą, lazerio spinduliu buvo skanuojamas visas bandinys viena kryptimi, naudojant poligoninį skenerį (LSE170 iš „Next Scan Technology“), ir statmena jai kryptimi, naudojant vienos ašies precizinį pozicionavimo staliuką (angl. *single axis of linear translation stages*) (Aerotech). Poligoniniame skeneryje buvo įrengta telecentrinė veidrodinė optika, skirta lazerio spindulio fokusavimui. Sufokusavus, lazerio taško skersmuo buvo 59,2 μm. Linijinio pozicionavimo modulio ir poligoninio skenerio judėjimo greitis buvo pritaikytas 50% lazerio taško sutapimui. Vieno skenavimo metu buvo nuimama vidutiniškai apie 86 nm storio silicio sluoksnio, naudojant 2,5 J/cm² lazerio spinduliuotės energijos šaltinį. Gaminant B_{2E} ir B_{3E} struktūras, lazerio spindulys buvo skenuojamas naudojant galvanometrinių skenerių ir 100 mm židinio nuotolio skenerio lęšį struktūros įduboms gauti. Sufokusavus, lazerio taško skersmuo buvo 38 μm. Įdubos buvo suformuotos

keliais lazeriniais skenavimais su 80% impulsų persiklojimu (tiek skenavimo, tiek statmena kryptimis) ir 5 J/cm^2 lazerio spinduliuotės energijos įtėkiu. Mikro-piramidžių struktūros gamybai buvo pagamintas statmenų griovelių tinklelis. Griovelių gylis buvo kontroliuojamas pasirenkant tinkamą skenavimų skaičių (B_{2E} ir B_{3E} struktūrų tinkleliui pagaminti reikėtų atitinkamai 50 ir 100 skenavimų). Tarp skenavimų kryptis būdavo pasukama 90 laipsnių.

26 pav. yra pateiktas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM, angl. *scanning electron microscope*) padarytas B_{1E} struktūros atvaizdas. Šiame pradiniam gamybos etape buvo pagaminta tik viena struktūrizuota plokštelė. Paveikslėlyje matomas visas lazerinio mikro-apdirbimo būdu pagamintas piramidžių paviršius. Tačiau matomos ir šiek tiek kintančios piramidžių formos. Profilio duomenys, gauti „Veeco Dektak 150+“ adatiniu profilometru (angl. *stylus profiler*), patvirtina, kad buvo pasiekta mažiausiai $70 \mu\text{m}$ abliacijos gylio, tačiau abliuotų piramidžių forma ir profilometro adata apribojo teisingų matavimų galimybę „slėniuose“ tarp piramidžių. Tokių apribojimų įrodymai yra žemesnio struktūrizuoto sluoksnio duomenyse, kuriuose gautos akivaizdžiai tiesios linijos, nors adata slinko šonine sienele. Aproximuotas B_{1A} profilis buvo apskaičiuotas viena modeliavimo serija ir palygintas su eksperimentiniais duomenimis. B_{1A} profilis pavaizduotas 26 pav. raudona linija.

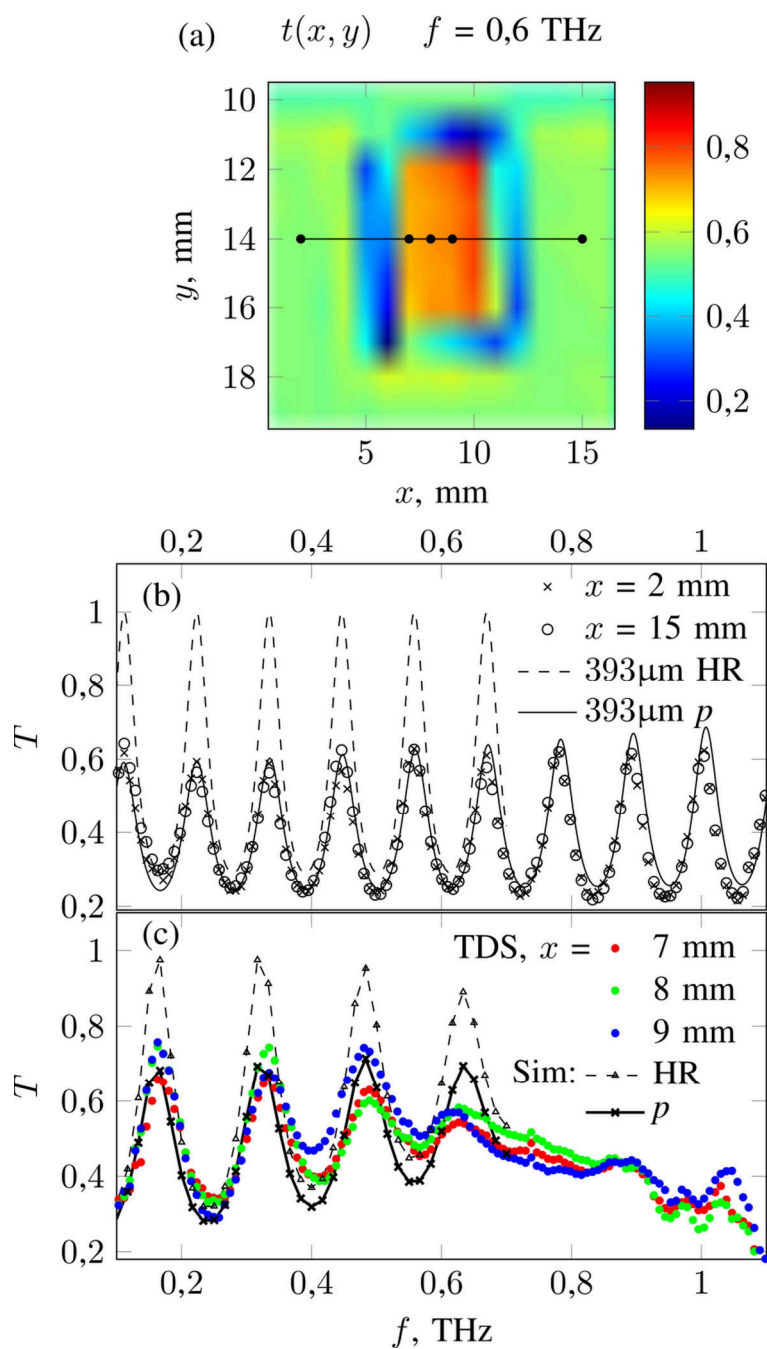


26 pav. Kairėje – skenuojančio elektronų mikroskopo (SEM) vaizdai, dešinėje – tipiškas pagaminto B_{1E} struktūrizuoto paviršiaus profilis (pažymėtas juoda linija) ir aproksimuoto struktūrizuoto paviršiaus B_{1A} profilis (pažymėtas raudona laiptuota linija), kuris naudojamas eksperimento ir modeliavimo rezultatų palyginimui (ilustracija iš [IP1]).

C. THz-TDS matavimai

Pagamintos B_{1E} testinės struktūros pralaidumo priklausomybė nuo dažnio buvo tiriama naudojant „Ekspla-Teravil“ laikinės skyros spektroskopijos (THz-TDS) ir THz vaizdinimo sistemą. Buvo atliktas dvimatis (2D) skenavimas, siekiant patikrinti, ar šiek tiek kintanti piramidžių forma įtakoja pralaidumo pakitimus. Šio 2D skenavimo rezultatai yra pateikti 27 pav(a), kur vaizduojamas amplitudinis pralaidumo koeficiento (angl. *amplitude transmittance coefficient*), t , pasiskirstymas esant 0,6 THz dažniui. Vaizdinimas buvo atliktas su 1 mm skyra, per 128 skenavimų, siekiant sumažinti fliktuacijų įtaką, suvidurkintų kiekvienam 10×10 mm² ploto taškui.

Skerspjūvyje buvo parinkti penki taškai, pažymėti juoda linija, kurie buvo nagrinėjami detaliau. Du tolimiausi taškai parinkti kaip atskaitos taškai, nes abu yra ant plokščio paviršiaus. Kiti trys taškai yra struktūrizuotoje plokštelės dalyje, arti centro.



27 pav. (a) Bandinio B_{IE} pralaidumo koeficiento t amplitudės žemėlapis $f = 0,6$ THz dažnyje. Struktūrizuota bandinio dalis yra vaizdo centre. Taip pat yra matomi likę plokšti bandinio plotai, išsidėstę aplink struktūrizuotą dalį arčiau bandinio kraštų. Juoda linija ir penki joje išsidėstę taškai nurodo vietas, kurioms yra pateiktas pralaidumo koeficientų $T = t^2$ spektras - (b) ir (c). (b) Analitiškai apskaičiuotas Fabry-Pérot interferencijos spektras, kai naudojamas 393 μm storio HR Si (pažymėtas punktyrine linija) ir paprastas Si (pažymėtas ištisine linija). (c) Skaitmeninio modeliavimo būdu gautas struktūrizuoto bandinio pralaidumo spektras pavaizduotas kartu su trimis spektrais, gautais THz-TDS metodu. Abiem atvejais likusios padėklo dalies storis yra 250 μm (ilustracija iš [IP1]).

Pralaidumo spektras dviem atskaitos taškams yra pateiktas 27(b) pav. (tik duomenų žymekliai). Be to, palyginimui yra pateiktas teoriškai apskaičiuotas pralaidumo spektras 393 μm storio siliciui, kurio lūžio rodiklis yra $n_{\text{Si}} = 3,42$. Abiem atvejais apskaičiuotos maksimumų ir minimumų pozicijos dažnių skalėje gerai dera su eksperimentiškai gautomis vertėmis. Didelės varžos (HR, angl. *highly resistive*) silicio atveju nebuvo laisvųjų krūvininkų nuostolių prielaidos, tuo tarpu p -tipo plokštelei buvo parinkti Drude modelio nuostoliai dėl $p = 9 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ skylių koncentracijos su $\mu = 500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ judriu, kad būtų pasiektas idealus sutapimas su eksperimentinių duomenų taškais ir medžiagos parametrų įvertinimas vėlesnėms struktūrizuoto sluoksnio FDTD simuliacijoms. Šie skaičiai atitinka apytiksliai 26% vienkartinį kelio nuostolį ties 0,6 THz papildomai prie apytiksliai 30% atspindžio nuo kiekvieno paviršiaus, ir tokiu būdu veda link staigaus bangų skilimo po kelių atspindžių ir link žemų pralaidumo verčių net pralaidumo maksimume.

Zonoje su vienu struktūrizuotu sluoksniu, 0,6 THz dažnių aplinkoje buvo gautas 40 – 60% pralaidumas, 27(c) pav. Eksperimentinio spektro žemesniųjų dažnių dalyje, kur struktūrizuotas sluoksnis yra per plonas, kad efektyviai slopintų atspindžius, yra aiškiai išreikštas intensyvumo kitimas dėl Fabry-Pérot interferencijos. Jis yra mažiau išreikštas šalia 0,6 THz, kur struktūrizuotas sluoksnis tampa pakankamai storas AR funkcijai atlikti. Dažnių ruožo viršutinėje riboje (prie 0,9 THz) spinduliuotės bangos ilgis Si padėkle jau artėja prie struktūros periodo (100 μm). Tokiu atveju, padidėjęs „bangos pagavimo“ efektyvumas padėkle gali būti tikėtinas dėl 1-os eilės interferencijos maksimumo. Tai taip pat reiškia, kad THz-TDS rezultatų interpretavimas tampa nebe toks trivialus.

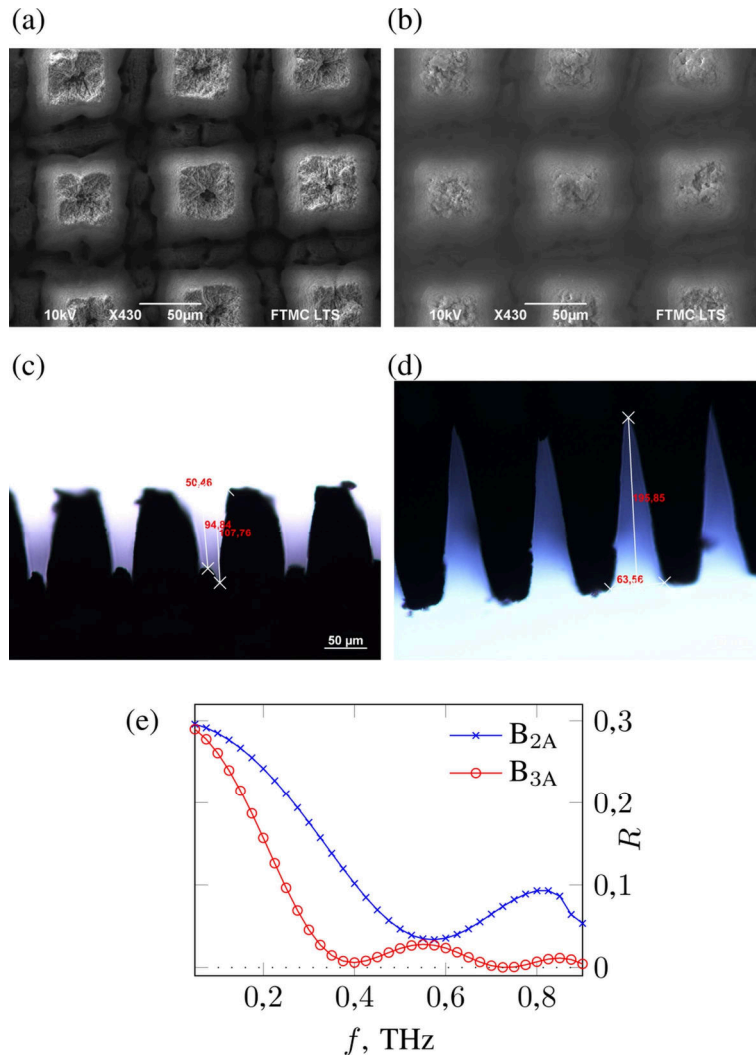
Taip pat buvo atlikta papildoma skaitmeninių modeliavimų serija abiem - HR Si ir nuostolingo p -tipo Si – atvejams, esant tai pačiai krūvininkų koncentracijai ir judriui, kaip ir plokščių paviršių atveju. Simuliacijose buvo naudojamas pakoreguotas B_{1A} profilis, kuris yra pavaizduotas 26 pav. ir buvo gautas aproksimuojant duomenis iš profilometro (7 kuboidai, kurių kiekvienos

aukštis yra 10 μm). Dar labiau papildant šoninių sienelių profilį, šie teoriniai rezultatai yra reikalingi įskaitant antrą plokštelės paviršių, nes anksčiau pateikti rezultatai buvo gauti darant prielaidą, kad pusiau begalinis padėklas turi tik vieną paviršių, sudarytą siekiant pabrėžti struktūrizuoto sluoksnio savybes. Buvo atlikta keletas simuliacijų kelioms likusioms nestruktūrizuotoms padėklo storio vertėms, ir likusio 250 μm storio duomenys taip pat yra pateikti 27(c) pav.

Nagrinėjant 27(c) pav. matomi keli svarbūs ypatumai. Visų pirma, matomas gana geras dažnio sutapimas ties išmatuota ir apskaičiuota interferencijos maksimumo vertėmis. Šis faktas rodo, kad likęs bendras padėklo ir struktūrizuoto sluoksnio storis yra artimas 320 μm , kas yra gerokai žemiau apskaičiuotos 393 μm vertės. Tai reiškia, kad piramidžių viršus taip pat buvo abliuotas, ne tik jų sienelės, ir tai gali būti priežastis, kodėl 26 pav. pateiktose SEM nuotraukose yra matomos gana aštrios jų viršūnės. Taip pat pastebimas gana geras sutapimas tarp eksperimentinių ir apskaičiuotų pralaidumo verčių žemesniuose dažniuose, kas reiškia, kad vidutiniai nuostoliai vis dar atitinka Drude modeliu gautus duomenis, net ir po apdirbimo lazeriniu būdu. Tačiau simuliacijų rezultatai taip pat numato, kad naudojama piramidžių forma nėra pakankamai gera aproksimacija dideliame Fabry-Pérot osciliacijų slopinimui ties 0,6 THz. Tokios osciliacijos buvo mažiau išreikštos eksperimentinių duomenų atveju. Taip yra dėl keleto priežasčių: gylio pervertinimas atliekant matavimus profilometru, piramidžių formos kitimas ir t.t. Visi šie rezultatai reiškia, kad siekiant pagerinti AR sluoksnio veikimą yra galimi du keliai – arba tikslesnis gamybos būdas, arba „atlaidesnis“ AR dangos dizainas.

6.1.2. Padidinto gylio struktūros

Siekiant apeiti plonų maždaug $\lambda/4$ storio AR struktūrų veikimo apribojimus, buvo pagaminti du papildomi bandiniai su AR struktūromis iš abiejų didelio atsparumo zoninio lydymo (FZ, angl. *float-zone*) silicio plokštelių pusių. Jų SEM ir optinės nuotraukos yra pavaizduotos 28 pav.



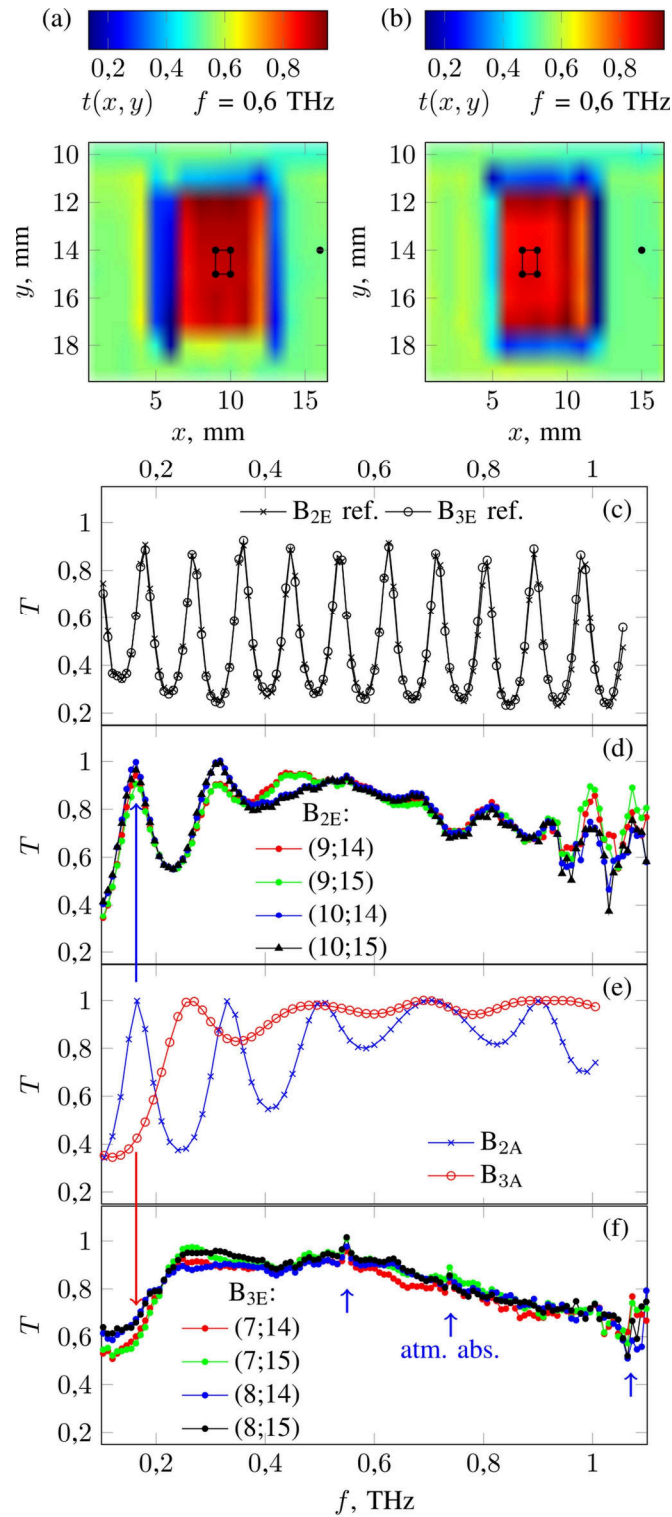
28 pav. (a,b) Struktūrizuotų paviršių SEM nuotraukos ir (c, d) optiniu mikroskopu gautos skerspjūvių nuotraukos atitinkamai B_{2E} ir B_{3E} bandiniams. (e) Sumodeliuotas atspindžio spektrai struktūroms B_{2A} ir B_{3A}. Siekiant išryškinti vieno AR struktūros elemento savybes, simuliacijos buvo atliktos vienam struktūriniam elementui, pusiau begaliniam padėklui (ilustracija iš [IP1]).

Bandinys B_{2E} yra naujas lyginant su B_{1E}. Jie skiriasi keliais esminiais pakeitimais. Pirma, gamybos būdas buvo atnaujintas siekiant pagaminti platesnį tarpą tarp piramidžių ir dalinai kompensuoti įtaką dėl jų „išsiplėtusių“ vidurinių dalių, kurios buvo stebimos B_{1E} bandinio atveju. Abliacijos gylis buvo padidintas iki $h \approx 100 \mu\text{m}$, siekiant kompensuoti mažą efektinį lūžio rodiklį šalia santykinai aštrių viršūnių. Palyginimo tikslais buvo pagaminta B_{3E} testinė struktūra su dar laipsniškesniu efektinio lūžio rodiklio perėjimu, kai $h \approx 195 \mu\text{m}$, ir bendru su kitais bandiniais periodu $L \approx 100 \mu\text{m}$. Toks struktūrizuotas

sluoksnis yra beveik tris kartus storesnis nei ketvirtis bangos ilgio, $\lambda/4$, todėl plačiaujustis našumas gali būti tikėtinas toks, kaip trijų sluoksnių atveju [73], kai bandinys buvo pagamintas DRIE metodu ir skirtas aukštesniems dažniams. Tačiau šis dizainas turėtų privalumų dėl suderinamumo su lazeriniu mikroapdirbimu, išlenktais paviršiais ir lengvesniu integravimu į pastoviai kintančio gylio struktūras, kurios nėra lengvai pagaminamos DRIE ar mechaninio pjaustymo metodais.

28(e) pav. pateiktas apskaičiuotas tokių struktūrizuotų paviršių atspindžio spektras. Buvo modeliuojamas tik vienas struktūrizuotas priekinis paviršius ir pusiau begalinis padėklas. Taip buvo siekiama išryškinti vieno AR struktūrizuoto paviršiaus savybes (dviejų AR paviršių ir baigtinių padėklų skaitmeninio modeliavimo rezultatai bus pateikti toliau). Kaip ir buvo tikėtasi, pasirinkus korekcijas po B_{1E} charakterizavimo, B_{2E} buvo pasiektas atspindžio minimumas ties 0,6 THz. Taip pat atitinka lūkesčius B_{2E} atveju apskaičiuotas daug platesnis mažo atspindžio spektrinis intervalas. To priežastis yra gilesnė struktūra ir tolygus lūžio rodiklio perėjimas.

29(a) ir 29(b) pav. yra pateikti THz vaizdinimo rezultatai, gauti abiemis bandiniams naudojant THz-TDS sistemą. 29(c) yra pateiktas dviejų taškų, esančių ant plokščios plokštelės, pralaidumo spektras (pažymėti juodais taškais šalia THz vaizdų dešiniojo krašto). Matomas beveik idealus sutapimas su 25 pav. pateiktu apskaičiuotu 500 μm storio HR Si plokštelės spektru. Tai patvirtina plokštelės kokybę ir tinkamą storį.



29 pav. Pralaidumo koeficiento amplitudės t pasiskirstymas bandiniams B_{2E} (a) ir B_{3E} (b). Dešinėje (a, b) pusėje matomi juodi taškai nurodo neapdirbtos plokštelės atskaitos sritis, kurių pralaidumo spektras yra pavaizduotas (c). Stačiakampiai (a, b) centre ir taškai jų kampuose nurodo AR struktūros vietą, o jų pralaidumo spektrai yra pateikti atitinkamai (d, f). (e) Abejose pusėse struktūrizuotų B_{2A} ir B_{3A} dizaino plokštelių (parametrai yra nurodyti 11 lentelėje) sumodeliuoti pralaidumo spektrai. (f) Mėlynomis vertikaliomis rodyklėmis yra pažymėtos matavimų klaidos, atsiradusios dėl atmosferos sugerties linijų (ilustracija iš [IP1]).

29(d) pav. yra pavaizduotas pralaidumo spektras, gautas B_{2E} bandinyje keturiuose taškuose šalia struktūrizuoto ploto vidurio. Galima pastebėti išnyksta periodinio intensyvumo kitimas dėl Fabry-Perot interferencijos, ir stabilų pralaidumą ($T \approx 0,9$ apie 0,5 – 0,6 THz), – tai patvirtina AR sluoksnio efektyvumą. Ši išvada atitinka aproksimuotos struktūros B_{2A} modeliavimo rezultatus (29(e) pav.), tačiau eksperimentiniuose duomenyse aukštesniems dažniams intensyvumo kitimas buvo mažiau išreikštas. Žemuose dažniuose stebimas beveik idealus pirmojo interferencijos maksimumo sutapimas (pažymėtas mėlyna rodykle) ir matomas pralaidumo maksimumas. Tai reiškia, kad vidutinis nuimtos medžiagos kiekis buvo teisingai įvertintas modeliuojant, o nedideli vietiniai efektinio storio pokyčiai neįneša esminių skirtumų tarp fazės poslinkio. Didesniuose dažniuose atsiranda didesni fazės poslinkio pokyčiai, todėl interferencijos minimumas ir maksimumas tampa ne tokie išreikšti. Skirtingi trečiojo (nežymiai matomo) maksimumo dažniai skirtingose bandinio vietose rodo tokių pokyčių buvimą. Tačiau jie nėra iš esmės pakankami, kad užkirstų kelią dvinarės zoninės plokštelės (BZP, angl. *binary zone plate*) efektyviam veikimui (tai bus pademonstruota toliau).

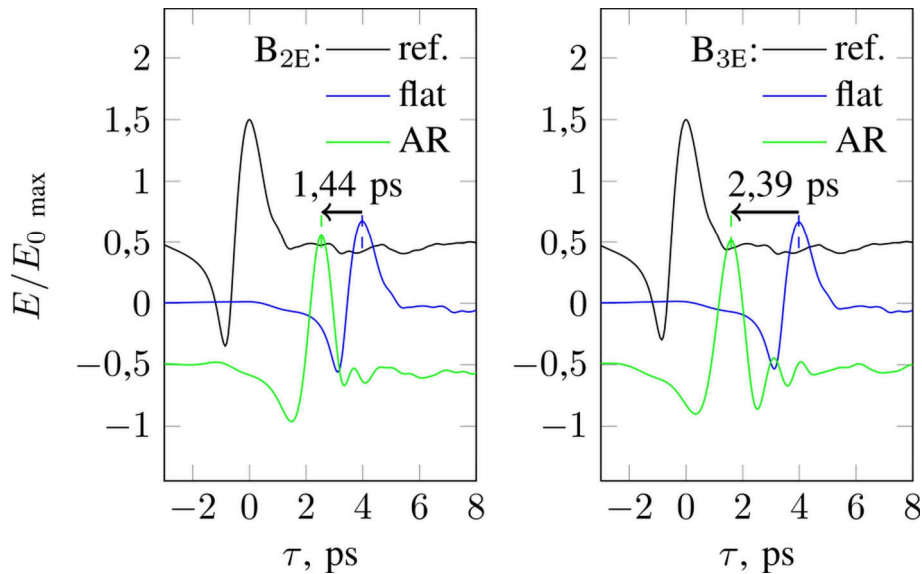
Kaip tikėtasi, B_{3A} bandinio atveju buvo apskaičiuotas dar platesnis didelio pralaidumo intervalas labai storoms struktūrizuotoms sritims ir plonai likusiai vidurinei vientisai plokštelės daliai. Šie rezultatai yra patvirtinti 29(f) pav., kur buvo gautas sąlyginai vienodas pralaidumo koeficientas ($T \approx 0,9$ srityje tarp 0,25 THz ir 0,65 THz). Gana staigus pralaidumo padidėjimas ties 0,2 THz simbolizuoja perėjimą nuo interferencijos minimumo ties maždaug 0,12 THz iki interferencijos maksimumo ties maždaug 0,25 THz. Kitas interferencijos minimumas ties 0,35 THz yra matomas modeliavimo duomenyse, bet dėl piramidžių formos vietinio kitimo eksperimentiniuose duomenyse išsilygina. Toks plačiajuostis AR struktūrų veikimas suteikia papildomų galimybių lanksčiai valdyti fazės poslinkį, nes laipsniškas efektinio lūžio rodiklio perėjimas užtikrina santykinai aukštą pralaidumą net tuo atveju,

jei interferencijos minimumas pasislenka dėl AR struktūros storio pokyčių ar centrinės vientisos padėklo dalies.

6.1.3. Fazės poslinkis AR struktūrose

A. THz-TDS impulsų vėlavimo matavimai

30 pav. yra pateiktos normuoto į maksimalią vertę elektrinio lauko stiprio (angl. *normalized electric field*) priklausomybės nuo laiko perduodant THz impulsus per bandinius B_{2E} ir B_{3E}. Kaip tikėtasi, impulsų vėlavimai yra mažesni abejose AR struktūrizuotų bandinių zonose dėl Si pašalinimo ir efektinio lūžio rodiklio sumažinimo. B_{2E} ir B_{3E} bandiniuose buvo stebėti atitinkamai 1,44 ps ir 2,39 ps vėlavimo sumažėjimai. Skirtumas tarp šių dviejų verčių yra 0,95 ps, kas atitinka 57% 0,6 THz spinduliuotės periodo ir pusę 0,53 THz periodo. Toks rezultatas atveria galimybę tokių sluoksnių ateities taikymams, pavyzdžiui, gaminant aukšto efektyvumo zonines plokšteles THz dažniams, užtikrinant tiek reikalingą fazės poslinkį tarp zonų, tiek didelį pralaidumą (pademonstruota 29 pav.).



30 pav. Elektrinio lauko priklausomybės nuo laiko perduodant tris THz impulsus: bazinį (pažymėta „ref.“), perduotą per neapdirbtą plokštelės paviršių (pažymėta „flat“) ir perduotą per struktūrizuotą bandinio paviršių (pažymėta „AR“). Kairėje duomenys yra pateikti bandinio B_{2E} taškams (9;14) ir (16;14), dešinėje - bandinio B_{3E} taškams (8;14) ir (15;14). Visos elektrinio lauko vertės yra normuotos į bazinio impulso elektrinio lauko maksimumą. Siekiant išvengti persiklojimo, kreivės yra paslinktos per 0,5 vertikalia kryptimi. Impulsų vėlavimo skirtumai tarp plokščios ir struktūrizuotos bandinio zonų yra nurodyti rodyklėmis (ilustracija iš [IP1]).

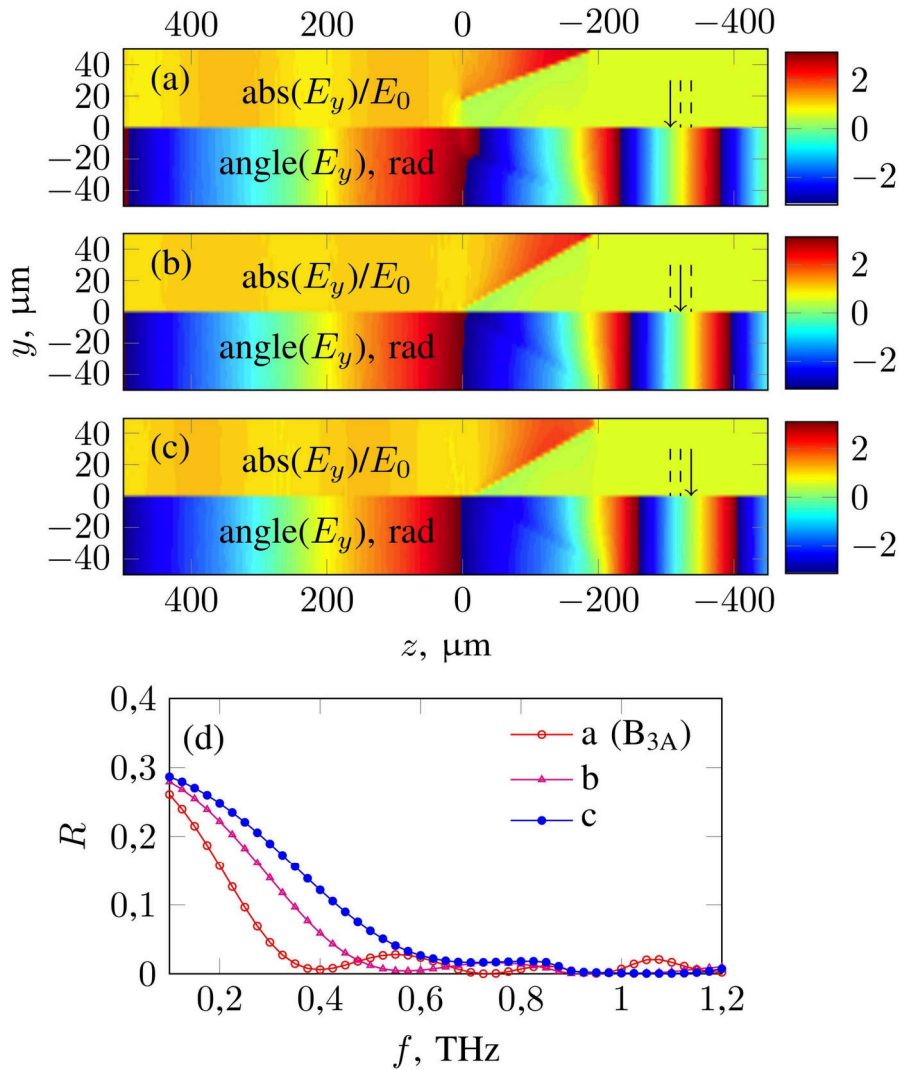
B. Tolimesnės fazės valdymo galimybės

Tolesnis likusios nestruktūrizuotos vidurinės padėklo dalies ploninimas yra vienas iš akivaizdžiausių kelių toliau mažinti impulsų vėlavimą ir pasiekti pilnai 2π fazės poslinkius, palyginus su plonesne B_{2E} danga. Teoriškai visiškai $110 \mu\text{m}$ storio Si pakeitimas oru turėtų sugeneruoti apytiksliai $0,53\lambda$ fazės poslinkį esant $0,6 \text{ THz}$, papildant anksčiau aptartą $0,53\lambda$ fazės poslinkį tarp B_{2E} ir B_{3E} . To pakaktų efektyviam bangos fronto valdymui duotame dažnyje. Tačiau labai nukentėtų AR struktūras laikančios Si plėvelės mechaninis stabilumas. Dėl šios priežasties buvo pasitelktos papildomas FDTD modeliavimas, siekiant rasti kelius, kuriais būtų galima pasiekti reikiamą fazės poslinkį.

FDTD simuliacijų rezultatai yra pateikti 31 pav. Yra trys elektrinio lauko „momentinės nuotraukos“ trims skirtingoms struktūroms. Pirmoji yra anksčiau jau aptarta B_{3A} (31(a) pav.), kuri yra artima eksperimentinei B_{3E} struktūrai. 31(b) pav. buvo nagrinėta to paties aukščio, bet nuožulnesnių šoninių sienelių

struktūra ($\Delta\omega/h = 0,5$ vietoje $\Delta\omega/h = 0,33$). 31(c) pav. buvo nagrinėta $\Delta\omega/h = 0,5$ struktūra su susiaurintu pagrindu, $\omega_1 = 90\mu\text{m}$.

31 pav. (a)–(c) galima pastebėti kelias svarbias savybes. Pirma, beveik vienodas amplitudės pasiskirstymas ir tik nežymūs bangos fronto iškraipymai ties $z < -200 \mu\text{m}$, kas patvirtina, kad, nepaisant santykinai didelio piramidžių dydžio, beveik nėra sklaidos. Antra, tikėtini fazės poslinkio skirtumai gali būti apskaičiuoti iš elektrinio lauko maksimumo pozicijos (pažymėta rodyklėmis) „momentinėse nuotraukose“. $15 \mu\text{m}$ skirtumas Si tarp (a) ir (b) atitinka maždaug $0,21\lambda$ tarp bangos frontų ore po perėjimo per du struktūrizuotus paviršius. Piramidės pagrindo siaurinimas $15 \mu\text{m}$ suteiktų tolesnį maždaug $0,22\lambda$ poslinkį tarp (b) ir (c), taip pašalinant likusį skirtumą iki 1λ . 31(d) pav. yra pateikta keletas apskaičiuotų atspindžio spektrų. Akivaizdu, kad $\Delta\omega/h = 0,5$, esant fiksuotam pagrindo pločiui, turėtų pademonstruoti mažesnę atspindėjimą ties $0,6 \text{ THz}$, lyginant su B_{3A} . Net esant $\omega = 85 \mu\text{m}$ pločiui, nesitikima jokio reikšmingo atspindžio padidėjimo. Todėl toks plotis būtų pakankamai mažas, kad būtų pasiektas pilnas bangos poslinkis.

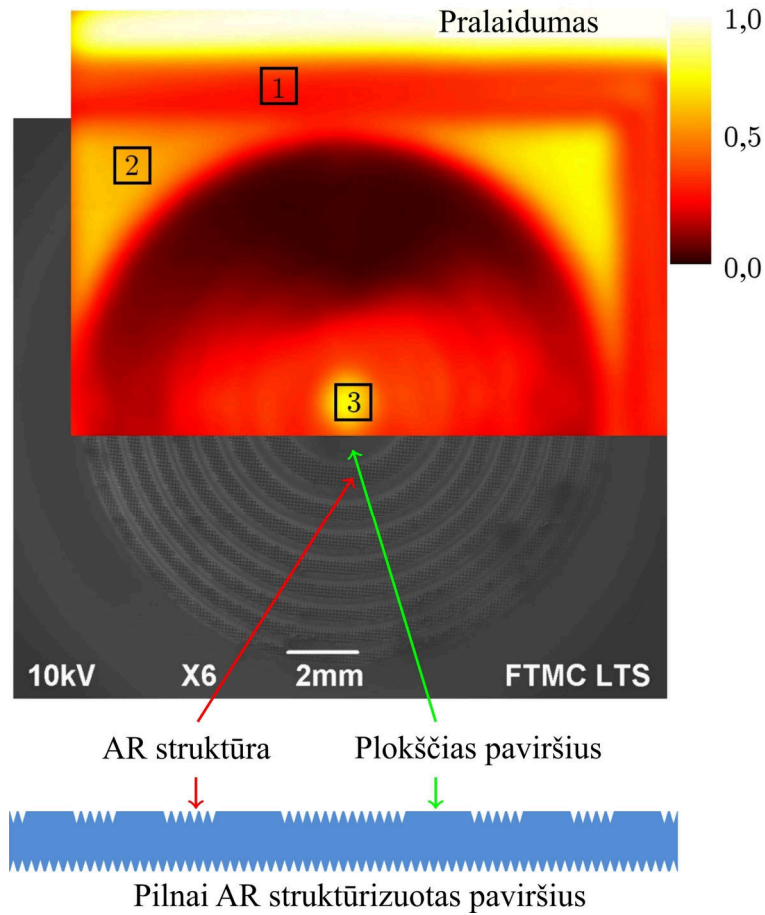


31 pav. (a-c) Sumodeliuotas elektrinio lauko komponentės E_y pasiskirstymas trims AR struktūroms ant pusiau begalinio padėklo ir (d) struktūrų atspindžio spektras. Visais atvejais virš plokštelės ($z > 0$) būdavo sužadinama monochromatinė tos pačios fazės 0,6 THz plokščioji banga. Koordinatė $z = 0$ atitinka priekinį plokštelės paviršių prieš lazerinį apdirbimą. (a) pateikti rezultatai, gauti anksčiau aprašyti B_{3A} struktūrai. Po to buvo atliktos simuliacijos (b) esant tam pačiam gyliui $h = 195 \mu\text{m}$ ir pagrindo pločiui $\omega_1 = 100 \mu\text{m}$, bet padidinus šoninių sienelių nuožulnumą ($\Delta\omega/h = 0,5$). (c) Rezultatai buvo gauti modeliuojant mažesnę pagrindo plotį, $\omega_1 = 90 \mu\text{m}$, bet išlaikant šoninių sienelių nuožulnumą, $\Delta\omega/h = 0,5$, dėl ko piramidžių viršus buvo sumažintas $15 \mu\text{m}$. Dėl sprendinių periodiškumo buvo modeliuojamas vienas AR struktūros periodas. Simuliacijose gautos kompleksinės lauko vertės turi tiek amplitudės¹², tiek fazės informaciją. Amplitudės duomenys yra pateikti (a-c) aukštesnėse dalyse (kai $y > 0$), o fazės duomenys – žemesnėse dalyse (kai $y < 0$). (a-c) rodyklės ir punktyrinės linijos žymi elektrinio lauke realiosios dalies maksimumo padėtį padėkluose (ilustracija iš [IP1]).

¹² Amplitudės pokyčiai ties 0,6 THz nėra matomi, nes nagrinėjamos dangos užtikrina labai mažą atspindžio koeficientą toje srityje (kaip matoma 31(d) pav.). Todėl praėjusių į padėklą bangų amplitudės yra labai panašios, skiriasi tik fazės.

6.1.4. Fokusavimo savybės dėl AR struktūrų fazės poslinkio

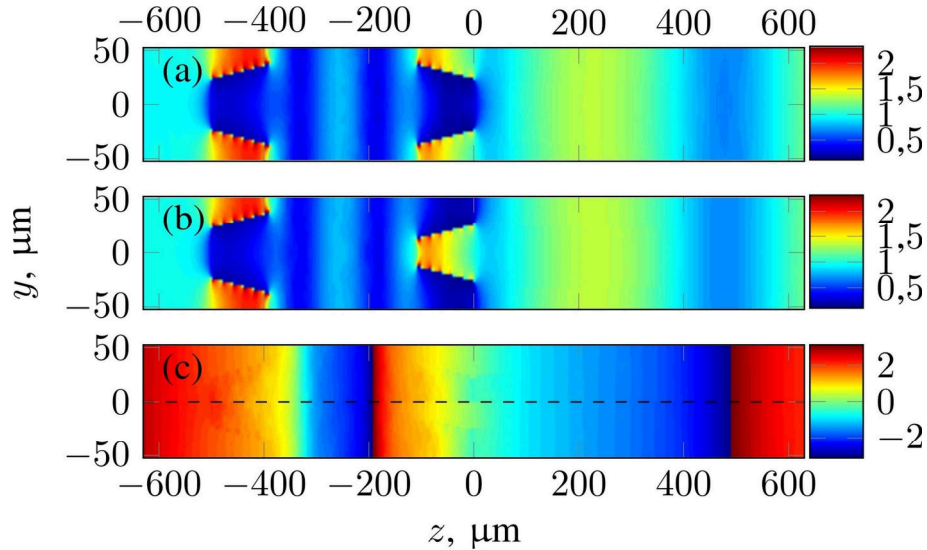
Siekiant patikrinti, ar AR struktūrų fazės poslinkio savybės yra pakankamos fokusavimo taikymams, buvo pagamintas dvinarės zoninės plokštelės prototipas, skirtas 0,6 THz dažniui (židinio nuotolis $F = 5$ mm). Ant 500 μm storio HR Si plokštelės buvo suformuoti kintančio paviršiaus (arba plokščio, arba struktūrizuoto) žiedai (32 pav.). Nagrinėjant šį darinį pirmiausia buvo apskaičiuotas zonos radiusas klasikinei Fresnel'io dvinarei zoninei plokštei ir kolimuotam 0,6 THz dažnio krentančiam spinduliui. Po to AR struktūros buvo abliuotos zonų su nelyginiais numeriais paviršiuose, o tuo tarpu zonų su lyginiais numeriais paviršiai buvo palikti lygūs. Taip buvo suformuota zoninė plokštelė (ZP, angl. *zone plate*). Struktūros pagrindui buvo pasirinktas B_{2E} dizainas. Nuimto Si kiekis buvo padidintas maždaug 10%. Tokiu būdu buvo siekiama π fazės poslinkio ties 0,6 THz, palyginus su plokščiu paviršiumi. Kita plokštelės pusė buvo tolygiai struktūrizuota, siekiant sumažinti atspindžių įtaką. Siekiant patikrinti pralaidumą po lazerinio mikro-apdirbimo, THz pralaidumo vaizdas taip pat buvo įrašytas kaip bandinį naudojant ZP. Gautas vaizdas pateiktas 32 pav. Jame yra pažymėtos trys sritys – Si plokštelė su dviem plokščiais paviršiais (1), su vienu plokščiu ir vienu AR struktūrizuotu paviršiumi (2), su dviem AR struktūrizuotais paviršiais ZP centre (3). Gautos vertės iš esmės atitinka pateiktas 29 pav. atitinkamam bandiniui B_{2E} . THz vaizde tik centrinė sritis yra aiški dėl didžiausio dydžio; išorinėse srityse akivaizdus pralaidumas yra sumažintas dėl vykstančios efektyvios THz spinduliuotės sklaidos siauromis kintančiomis zonomis, interferencijos ir mažo išsklaidytos THz spinduliuotės surinkimo efektyvumo.



32 pav. Viršuje pateikti SEM ir THz pralaidumo, esant $f = 0,6$ THz, vaizdai. Apačioje – zoninės pokštelės (ZP) prototipo eskizas (ne pagal mastelį). Kintančios zonos su arba plokščiais, arba struktūrizuotais paviršiais matomi SEM nuotraukoje. ZP buvo patalpinta nuolatinės veikos (*cw*) THz vaizdinimo sistemos su piroelektriniu jautikliu židinio nuotolyje, ir tokiu būdu buvo gautas pralaidumo žemėlapis. THz nuotraukoje yra pažymėtos trys sritys: plokščias Si su apytiksliai 30% pralaidumu (1), Si su vienu AR struktūrizuotu paviršiumi ir apytiksliai 60% pralaidumu (2) ir ZP centrinė dalis su maksimaliu 76% pralaidumu (ilustracija iš [IP1]).

31 pav. pateikti modeliavimo duomenys jau atskleidė, kad plokščias bangos frontas atstatomas beveik iškart po to, kai praeina AR paviršių $100 \mu\text{m}$ periodu, todėl buvo tikimasi teisingo ZP veikimo net ir piramidžių padėties nesutapimo tarp dviejų paviršių atveju. Nepaisant to, buvo atlikti du papildomi modeliavimai, kuriuose buvo nagrinėjami piramidžių padėties sutapimo ir pasislinkimo per pusę periodo atvejais. 33 pav. yra pateikti amplitudės ir fazės pasiskirstymai abiem atvejais. Nepastebima jokių esminių fazės skirtumų tiek

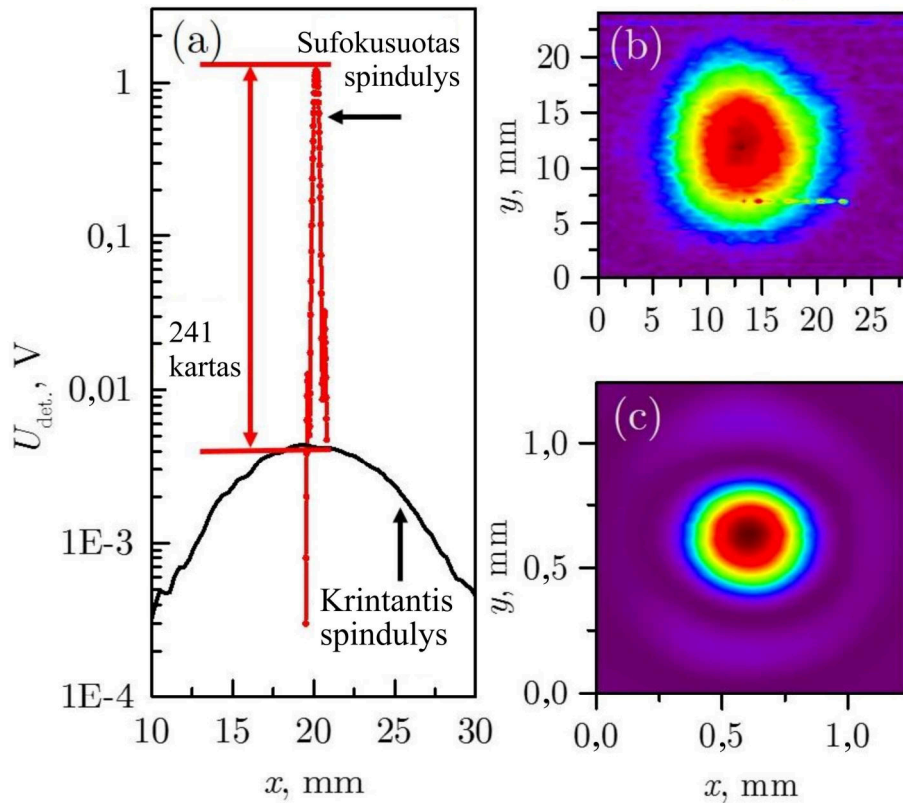
padėklo centre, tiek už bandinio ribų, kas patvirtina, kad idealiai tikslus piramidžių padėties sutapimas abejuose sluoksniuose nėra būtinas.



33 pav. Elektrinio lauko amplitudės pasiskirstymas, kai (a) abiejose pusėse piramidžių padėtys sutampa ir (b) kai priekiniame paviršiuje piramidės yra paslinktos per pusę periodo. Vertės buvo padalintos iš krintančios bangos amplitudės. Palyginimo tikslais (c) pavaizduotas fazės pasiskirstymas abiem atvejais (kai $y > 0$, nagrinėjamas sutampančių padėčių atvejis, kai $y < 0$, nagrinėjamas paslinktų padėčių atvejis). Nagrinėjamos struktūros abliacijos gylis buvo padidintas iki 110 mikronų, siekiant geresnio sutapimo su struktūra, naudojama zoninei plokštei (ilustracija iš [IP1]).

Zoninės plokštelės fokusavimo savybės buvo įvertintos vaizdinant fokusuojamos THz spinduliuotės pluošto profilį. Tam buvo panaudoti mikrobangų sintezatorius ir Virginia Diodes Inc. dažnių daugintuvo grandinė, skirta 0,6 THz dažniui. Naudojama THz spinduliuotės galia buvo $60 \mu\text{W}$. Spindulio galia buvo moduluota 1 kHz dažniu. Spindulys buvo kolimuotas 5 cm skersmens Teflon lęšiu, kurio židinio nuotolis yra 12 cm. Siekiant išskirti emituoto spindulio centrinę dalį, kolimuotas spindulys buvo sulenkta 5 cm veidrodžiu ir nukreiptas į tiriamą ZP bandinį, kuris spindulį sufokusavo į detektorius, patalpintą ZP židinio nuotolyje. Norint išmatuoti tolimojo lauko spinduliuotės pasiskirstymą, atstumas tarp THz šaltinio ir ZP buvo apytiksliai 1 m. THz spinduliuotei užfiksuoti buvo naudojamas mikrobolometrinis

detektorius [83] ir kompiuteriu valdomas sinchroninis stiprintuvas (angl. *lock-in amplifier*).



34 pav. (a) Krintančios ir sufokusuotos bangų spindulio profilių skerspjūvis. Apšvietus kolimuotu THz spinduliu, pirmiausia buvo užregistruota (b) detektoriaus signalo priklausomybė nuo koordinatės. Po to bandymai buvo pakartoti (c) įdėjus zoninę plokštelę (židinio plokštumoje, su didesne rezoliucija) (ilustracija iš [IP1]).

Iš pradžių buvo išmatuotas kolimuoto THz spindulio profilis (34(b) pav.), po to buvo pakartoti erdviniai profilio matavimai ZP patalpinus židinio nuotolio atstumu nuo detektoriaus (34(c) pav.). Paprastesniam palyginimui 34(a) pav. yra pateikti skerspjūviai. Pateikti duomenys patvirtina, kad signalas sustiprėjo apytiksliai 240 kartų ir pluošto plotis pusės maksimalios vertės lygyje (FWHM) buvo mažesnis nei vienas bangos ilgis, nepaisant to fakto, kad santykinai siauras krentantis pluoštas apima tik kelias Fresnel'io zonas. Dėl to dvinarė ZP gali būti sėkmingai naudojama fokusavimui, o pagamintų AR struktūrų vienodumas yra pakankamas gauti beveik ribotos difrakcijos veikimą.

6.2. Skyriaus rezultatų apibendrinimas

Šiame darbe buvo pasiūlytas ir išplėtotas spinduliuotės beveik neatspindinčių (AR) struktūrų lazerinės abliacijos dizainas. Gauta struktūra pasižymi mažu kelių procentų eilės atspindėjimu, kuris atitinka skaitmeninio modeliavimo rezultatus. Modeliuojant buvo numatytas daugiau nei 10% atspindžio minimumo poslinkis į žemesnių dažnių pusę santykinai grubioms struktūroms su 100 μm periodu, palyginus su kitomis THz sričiai skirtomis spinduliuotės neatspindinčiomis struktūromis. Toks dažnio sumažėjimas gali būti pritaikytas spinduliuotės neatspindinčių sluoksnių ploninimui, tuo pačiu gaunant papildomas tikslesnio sluoksnio savybių valdymo galimybes dėl didesnių struktūrų abliacijos.

Teoriškai ir eksperimentiškai buvo pademonstruota, kad neišvengiami formos netobulumai, atsirandantys dėl fizinio poveikio ketvirčio bangos ilgio storio struktūrų, skirtų 0,6 THz, lazerinio apdirbimo metu, gali būti kompensuoti padidinant struktūros gylį nuo 70 μm iki 100 μm . Silicio plokštelėms su abiem struktūrizuotais paviršiais eksperimentiškai gautas apie 90% pralaidumas ties 0,5-0,6 THz, kuris gerai atitinka modeliavimo rezultatus ir atveria kelius gaminti didelio efektyvumo zonines plokšteles, kurių nuostoliai yra itin maži.

Modeliavimo rezultatai parodė, kad nežymūs struktūros piramidžių šoninių sienelių nuolydžio ir pagrindo pločio patobulinimai gali būti pritaikyti impulsų vėlinimui, atitinkančiam visą 0,6 THz spinduliuotės periodą. Tai iliustruoja, kad lazerinės abliacijos technologija gali tarnauti kaip galingas įrankis gaminant paviršius, kurie tarnautų tiek kaip spinduliuotės neatspindintys, tiek fazę paslenkantys struktūrizuoti elementai. Buvo sumodeliuota ir pagaminta dvinarė zoninė plokštelė 0,6 THz dažniui, panaudojant dvigubo spinduliuotės neatspindinčio paviršiaus fazės poslinkio skirtumus, taip pat buvo įvertintas jos fokusavimo našumas bei veikimas, artimas difrakcijos ribai.

Ginamieji teiginiai, apibendrinantys šiame skyriuje gautus rezultatus:

- Atspindžius mažinančiuose sluoksniuose, kuriuose struktūros periodas yra artimas krintančios bangos ilgiui, galima suploninti atspindžius mažinantį sluoksnį ir palengvinti sluoksnių gamybą lazeriniu apdirbimu, kartu išlaikant mažą atspindžio koeficientą.
- Fazės poslinkiai struktūrizuotuose atspindžius mažinančiuose sluoksniuose yra pakankamai gerai kontroliuojami, kad iš jų būtų galima gauti kokybiškus fokusuojančius elementus tiek sub-THz/THz komunikacijų, tiek ir THz vaizdinimo sistemoms, leidžiančius pasiekti artimą difrakcija ribotam pluošto sąsmaukos plotį židinyje.

Rezultatai ir išvados

- 1) Modeliuojant 5G/B5G tinkluose naudojamų elektromagnetinių bangų silpninimą atmosferoje, būtina nustatyti momentines lietaus intensyvumo ir atmosferos lūžio rodiklio vertes, nes suvidurkinti duomenys dėl ženklių nuokrypių neatspindi realių verčių.
 - Pademonstruota „vienos minutės“ lietaus intensyvumo vertės svarba nagrinėjant sub-THz (100 GHz) ir THz (300 GHz) dažnių silpninimą atmosferoje, nes suvidurkintos lietaus intensyvumo vertės liūčių atveju iškraipo modeliavimo rezultatus: didelės momentinės lietaus intensyvumo vertės sumažėja, mažos išauga, o silpninimo maksimumas pasislenka laike;
 - Pademonstruota, kad silpnos aprėpties zonoje kintant atmosferos lūžio rodikliui (koeficientui), tuo pačiu metu vyksta signalo stiprumo pokyčiai su vidutine neigiama koreliacija ($r = -0,46$);
 - Pasiūlytas modelis atmosferos lūžio koeficiento apytiksliams įvertinimui vietovėse, kuriose nėra galimybės tiesiogiai matuoti meteorologinius parametrus.
- 2) Dėl 5G/B5G tinklams numatomo kvazioptinio perdavimo ir santykinai mažų atstumų dabartinių bevielio ryšio sistemų atžvilgiu, galimi sugerties nuokrypiai nuo verčių, apskaičiuojamų pagal šiaudien naudojamus standartizuotus modelius.
 - Suskaičiavus tikėtinus sugerties koeficiento nuokrypius THz dažnių ruožo spinduliuotei kvazioptinio perdavimo ir trumpų atstumų scenarijui, kurio galima tikėtis B5G tinkluose, parodyta, kad šie nuokrypiai yra reikšmingi palyginus su vidurkiu, o kai kuriais atvejais (pavyzdžiui, eksperimentų laboratorijose atveju) jį gali ir viršyti.
- 3) Atspindžius mažinančiuose sluoksniuose, kuriose struktūros periodas yra artimas krintančios bangos ilgiui, galima suploninti atspindžius

mažinantį sluoksnį ir palengvinti sluoksnių gamybą lazeriniu apdirbimu, kartu išlaikant mažą atspindžio koeficientą.

- Tuo pasinaudojant buvo sukurti ir optimizuoti teoriniais skaičiavimais pagrįsti atspindžius sumažinančių struktūruotų sluoksnių dizainai gamybai lazerinės abliacijos būdu.
- Neišvengiami formos netobulumai, dėl fizinių procesų atsirandantys lazerinio apdirbimo metu, gali būti kompensuoti padidinant gylį.
- Pasiiektas iš abiejų pusių struktūrizuotos silicio plokštelės pralaidumas siekia >90% 0,5 – 0,6 THz dažniams.

4) Fazės poslinkiai struktūrizuotuose atspindžius mažinančiuose sluoksniuose yra pakankamai gerai kontroliuojami, kad iš jų būtų galima gauti kokybiškus fokusuojančius elementus tiek sub-THz/THz komunikacijų, tiek ir THz vaizdinimo sistemoms, leidžiančius pasiekti artimą difrakcija ribotam pluošto sąsmaukos plotį židinyje.

- Buvo ištirti fazės poslinkio ypatumai AR sluoksniuose ir galimybės juos panaudoti fokusuojančių elementų formavimui tiesiog puslaidininkiniuose padėkluose;
- Šie fazių poslinkiai buvo panaudoti zoninės plokštelės dizainui sukurti, kuriame suderinamos AR savybės, fokusavimas (2π fazės poslinkis, 240 kartų sustiprintas signalas) ir visa tai galima padaryti viename 500 μm storio padėkle.

Literatūros sąrašas

- [1] Y. S. Lee, Principles of terahertz science and technology, Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] TED, „Is the world ready for T-rays?”, 2016. Tinkle: <https://ideas.ted.com/is-the-world-ready-for-t-rays/>.
- [3] ITU-R, „Radio Regulations”, Tinkle: <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2016&media=electronic>.
- [4] M. Tonouchi, „Cutting-edge terahertz technology”, *Nature Photonics*, t. 1, pp. 97-105, 2 2007.
- [5] TeraSense, „Applications”, Tinkle: <http://terasense.com/applications/>.
- [6] T. Nagatsuma, G. Ducournau ir C. C. Renaud, „Advances in terahertz communications accelerated by photonics”, *Nature Photonics*, t. 10, pp. 371-379, 2016.
- [7] J. Federici ir L. Moeller, „Review of terahertz and subterahertz wireless communications”, *Journal of Applied Physics*, t. 107, p. 111101, 2010.
- [8] S. Cherry, „Edholms law of bandwidth”, *IEEE Spectrum*, t. 41, pp. 58-60, 2004.
- [9] Cisco, „The Zettabyte Era: Trends and Analysis”, 2017. Tinkle: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
- [10] Ericsson, „Traffic exploration tool”, 2017. Tinkle: <https://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBasicEditor.ericsson>.
- [11] Bell Labs Consulting, „Who will satisfy the desire to consume? How will wireless data demand grow between now and 2020 and how should mobile operators respond?”, 2016. Tinkle: <https://readymag.com/BellLabs/480968/>.
- [12] IEEE Spectrum, „The Race to 5G: Technology”, Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/static/the-race-to-5g-technology>.
- [13] N. Kukutsu, A. Hirata, M. Yaita, K. Ajito, H. Takahashi, T. Kosugi, H. Song, H. Wakatsuki, Y. Muramoto, T. Nagatsuma ir Y. Kado, „Toward practical applications over 100 GHz”, *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1134-1137, 2010.

- [14] C. M. Armstrong, „The Truth About Terahertz”, 2012. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-truth-about-terahertz>.
- [15] M. Koch, „Terahertz Communications: A 2020 vision”, *İtraukta Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*, Dordrecht, 2007.
- [16] K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, N. Nishiyama ir S. Arai, „Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunnelling diodes”, *Electronics Letters*, t. 48, p. 582, 2012.
- [17] S. Yost, „What Does Every Engineer Need to Know about 5G?”, Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/what-does-every-engineer-need-to-know-about-5g>.
- [18] M. T. Barros, R. Mullins ir S. Balasubramaniam, „Integrated Terahertz Communication With Reflectors for 5G Small-Cell Networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 66, pp. 5647-5657, 7 2017.
- [19] P. Goldsmith, „Zone Plate Lens Antennas for Millimeter and Submillimeter Wavelengths”, *The Third International Symposium on Space Terahertz Technology: Symposium Proceedings*, pp. 345-361, 1992.
- [20] J. M. Rodríguez, H. Hristov ir W. Grote, „Fresnel zone plate and ordinary lens antennas: Comparative study at microwave and terahertz frequencies”, *2011 41st European Microwave Conference*, 2011.
- [21] M. R. D. Kodnoeih, Y. Letestu, R. Sauleau, E. M. Cruz ir A. Doll, „Compact Folded Fresnel Zone Plate Lens Antenna for mm-Wave Communications”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 17, pp. 873-876, 5 2018.
- [22] O. Yurduseven, „Wideband Integrated Lens Antennas for Terahertz Deep Space Investigation”, 2016.
- [23] N. T. Nguyen, N. Delhote, R. Sauleau, L. L. Coq ir D. Baillargeat, „Layer-to-layer ceramic stereolithography for the design of extended hemispherical lenses at 60 GHz”, *İtraukta 2008 Asia-Pacific Microwave Conference*, 2008.
- [24] N. T. Sönmez ir N. T. Tokan, „Effects of antireflective coatings on scanning performance of millimetre-wave lenses”, *IET Microwaves, Antennas Propagation*, t. 10, pp. 1485-1491, 2016.
- [25] C. E. Shannon, „Communication in the presence of noise”, *Proceedings of the IRE*, t. 37, pp. 10-21, 1949.

- [26] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, John Wiley & Sons, 2012.
- [27] „Lietuvos Respublikos Sveikatos apsaugos ministro įsakymas Dėl Lietuvos higienos normos 80:2011 "Elektromagnetinis laukas darbo vietose ir gyvenamojoje aplinkoje. Parametrų normuojamos vertės ir matavimo reikalavimai 10 kHz - 300 GHz radijo dažnių juostoje" patvirtinimo", 2011. Tinkle: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.45D9797974FE/UVzvUCVMNL>.
- [28] A. O. Hero, „Telecommunications media”, 2014. Tinkle: <https://www.britannica.com/topic/telecommunications-media>.
- [29] S. Han, I. C., Z. Xu ir C. Rowell, „Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G”, *IEEE Communications Magazine*, t. 53, pp. 186-194, 1 2015.
- [30] R. W. Heath, N. González-Prelcic, S. Rangan, W. Roh ir A. M. Sayeed, „An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, t. 10, pp. 436-453, 4 2016.
- [31] T. Nagatsuma, K. Oogimoto, Y. Inubushi ir J. Hirokawa, „Practical considerations of terahertz communications for short distance applications”, *Nano Communication Networks*, t. 10, pp. 1-12, 2016.
- [32] ITU-R, „F.2416-0 (11/2017) „Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band 275-450 GHz““.
- [33] M. Koziol, „5G New Radio and What Comes Next”, 2018. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/standards/3gpp-lays-the-groundwork-for-5g-new-radio-but-has-much-more-work-to-do>.
- [34] Qualcomm, „The Gigabit LTE phenomenon, powered by Snapdragon”, Tinkle: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/09/11/gigabit-lte-phenomenon-powered-snapdragon>.
- [35] „Preliminary Proposal for THz PHY in IEEE 802.15.3”, 2016. Tinkle: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/16/15-16-0481-01-003d-preliminary-proposal-for-thz-phy-in-ieee-802-15-3.pdf>.
- [36] Ericsson, „The launch of NMT”, Tinkle: <https://www.ericsson.com/en/about-us/history/changing-the-world/the-nordics-take-charge/the-launch-of-nmt>.
- [37] U. Varshney, „4G Wireless Networks”, *IT Professional*, t. 14, pp. 34-39, 9 2012.

- [38] Telia, „First in the world with 4G”, Tinkle: <https://www.teliacompany.com/en/about-the-company/history/first-in-the-world-with-4g>.
- [39] A. Nordrum, „CES 2018: 5G News and Nuggets”, 2018. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/ces-2018-5g-news-and-nuggets>.
- [40] A. C. K. Nordrum, „Everything You Need to Know About 5G”, 2017. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>.
- [41] A. Nordrum, „5G Researchers Set New World Record For Spectrum Efficiency”, 2016. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/5g-researchers-achieve-new-spectrum-efficiency-record>.
- [42] A. Nordrum, „New Full Duplex Radio Chip Transmits and Receives Wireless Signals at Once”, 2016. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/new-full-duplex-radio-chip-transmits-and-receives-wireless-signals-at-once>.
- [43] Ericsson, „More Than 50 Billion Connected Devices White Paper”, 2011.
- [44] A. Nordrum, „The Internet of Fewer Things”, 2016. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/telecom/internet/the-internet-of-fewer-things>.
- [45] S. Ranger, „What is the IoT? Everything you need to know about the Internet of Things right now”, 2018. Tinkle: <https://www.zdnet.com/article/what-is-the-internet-of-things-everything-you-need-to-know-about-the-iot-right-now/>.
- [46] Y. Mehmood, F. Ahmad, I. Yaqoob, A. Adnane, M. Imran ir S. Guizani, „Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 16-24, 2017.
- [47] D. Shrouf, J. Ordieres ir G. Miragliotta, „Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy”, *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015.
- [48] H. Dhillon, H. Huang ir H. Viswanathan, „Wide-area Wireless Communication Challenges for the Internet of Things”, *IEEE Communications Magazine*, t. 55, nr. 2, 2017.
- [49] T. Nguyen, „Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1)”, 2017. Tinkle: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>.

- [50] M. Koziol, „It’s Never Too Early To Think About 6G”, 2018. Tinkle: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/its-never-too-early-to-think-about-6g>.
- [51] E. Rimkus, Meteorologijos įvadas, Vilniaus universitetas, 2011.
- [52] S. Aggarwal, „Principles of Remote Sensing”, įtraukta *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, 2003.
- [53] "The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database", hitran.org.
- [54] R. S. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.676-11: Attenuation by atmospheric gases*, 09/2016.
- [55] E. R. Brown, „Fundamentals of Terrestrial Millimeter-Wave and THz Remote Sensing”, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, t. 13, pp. 995-1097, 12 2003.
- [56] Y. Yang, A. Shutler ir D. Grischkowsky, „Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz”, *Optics Express*, t. 19, p. 8830, 4 2011.
- [57] G. Ivanovs ir D. Serdega, „Rain intensity influence on microwave line payback terms”, *Electronics and Electrical Engineering*, t. 6, pp. 60-64, 2006.
- [58] Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, INST OF ELECTRICAL & ELECTRONICS, 1999.
- [59] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [60] R. D. A. Crane, „ACTS propagation experiment: attenuation distribution observations and prediction model comparisons”, *Proceedings of the IEEE*, t. 85, nr. 6, pp. 879--892, 1997.
- [61] R. W. Bergstrom, P. Pilewskie, B. Russell, J. Redemann, T. C. Bond, P. Quinn ir S. B. , „Spectral absorption properties of atmospheric aerosols”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, t. 7, pp. 5937-5943, 2007.
- [62] N. Norland, *Temporal Variation of the Refractive Index in Coastal waters*, IEEE, 2007.
- [63] J. T. Priestley ir R. J. Hill, „Measuring High-Frequency Humidity, Temperature and Radio Refractive Index in the Surface Layer”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, t. 2, pp. 233-251, 6 1985.

- [64] N. I. Kablak, „Refractive index and atmospheric correction to the distance to the Earth's artificial satellites”, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, t. 23, pp. 84-88, 4 2007.
- [65] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet ir C. Han, „Terahertz band: Next frontier for wireless communications”, *Physical Communication*, t. 12, pp. 16-32, 2014.
- [66] R. S. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.525: Calculation of free-space attenuation*, 03/2005.
- [67] T. Schneider, A. Wiatrek, S. Preussler, M. Grigat ir R.-P. Braun, „Link Budget Analysis for Terahertz Fixed Wireless Links”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, t. 2, nr. 2, pp. 250-256, 2012.
- [68] I. Lesnov ir V. Vdovin, „Corrected Link Budget Analysis for Terahertz Wireless”, *Communications*, t. 3, nr. 6, pp. 158-161, 2015.
- [69] H. Shams ir A. Seeds, „Photonics, Fiber and THz Wireless Communication”, *Optics and Photonics News*, t. 28, nr. 3, pp. 24-31, 2017.
- [70] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, S. J. ir T. Kurner, „Short-range ultra-broadband terahertz communications: Concepts and perspectives”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, t. 49, nr. 6, pp. 24-39, 2007.
- [71] M. I. B. Shams, Z. Jiang, J. Qayyum, S. Rahman, P. Fay ir L. Liu, „A terahertz reconfigurable photo-induced fresnel-zone-plate antenna for dynamic two-dimensional beam steering and forming”, *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015.
- [72] C. Kadlec, F. Kadlec, P. Kužel, K. Blary ir P. Mounaix, „Materials with on-demand refractive indices in the terahertz range”, *Opt. Lett.*, t. 33, pp. 2275-2277, 10 2008.
- [73] Y. W. Chen ir X. C. Zhang, „Anti-reflection implementations for terahertz waves”, *Front. Optoelectron.*, t. 7, p. 243, 2014.
- [74] Y. W. Chen, P. Y. Han ir X.-C. Zhang, „Tunable broadband antireflection structures for silicon at terahertz frequency”, *Appl. Phys. Lett.*, t. 94, 2009.
- [75] A. Brahm, S. Döring, A. Wilms, G. Notni, S. Nolte ir A. Tünnermann, „Laser-generated broadband antireflection structures for freeform silicon lenses at terahertz frequencies”, *Appl. Opt.*, t. 53, pp. 2886-2891, 5 2014.
- [76] T. Nitta, Y. Sekimoto, K. Noda, S. Sekiguchi, S. Shu, H. Matsuo, A. Dominjon, M. Naruse, N. Kuno ir N. Nakai, „Broadband Pillar-Type

Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina”, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, t. 7, pp. 295-301, 2017.

- [77] I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Minkevičius, A. Sešek, F. Wahaia, V. Tamošiūnas, B. Voisiat, D. Seliuta, G. Valušis, A. Švigelj ir J. Trontelj, „Spectroscopic Terahertz Imaging at Room Temperature Employing Microbolometer Terahertz Sensors and Its Application to the Study of Carcinoma Tissues”, *Sensors*, t. 16, p. 432, 2016.
- [78] M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama ir K. Kawase, „Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection”, *Opt. Express*, t. 24, pp. 6425-6432, 2016.
- [79] U. Puc, A. Abina, M. Rutar, A. Zidanšek, A. Jeglič ir G. Valušis, „Terahertz spectroscopic identification of explosive and drug simulants concealed by various hiding techniques”, *Appl. Opt.*, t. 54, pp. 4495-4502, 2015.
- [80] I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Grigelionis ir G. Valušis, „InGaAs-based bow-tie diode for spectroscopic terahertz imaging”, *J. Appl. Phys.*, t. 110, p. 114505, 2011.
- [81] L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, I. Kašalynas, R. Venckevičius, G. Račiukaitis, V. Tamošiūnas ir G. Valušis, „Focusing Performance of Terahertz Zone Plates with Integrated Cross-shape Apertures”, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, t. 35, pp. 699-702, 2014.
- [82] L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas, B. Voisiat, V. Janonis, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, G. Račiukaitis ir G. Valušis, „Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon”, *Opt. Lett.*, t. 42, pp. 1875-1878, 5 2017.
- [83] J. Trontelj, G. Valušis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, A. Sešek ir A. Švigelj, „A high performance room temperature THz sensor”, *Proc. SPIE*, t. 9199, pp. 91990K-91990K-10, 2014.
- [84] M. Bauer, R. Venckevičius, I. Kašalynas, S. Boppel, M. Mundt, L. Minkevičius, A. Lisauskas, G. Valušis, V. Krozer ir H. G. Roskos, „Antenna-coupled field-effect transistors for multi-spectral terahertz imaging up to 4.25 THz”, *Opt. Express*, t. 22, pp. 19235-19241, 2014.
- [85] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos ir K. Köhler, „Terahertz heterodyne imaging with InGaAs-based bow-tie diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, t. 99, p. 131101, 2011.

- [86] O. Yurduseven, N. L. Juan ir A. Neto, „A Dual-Polarized Leaky Lens Antenna for Wideband Focal Plane Arrays”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 64, pp. 3330-3337, 8 2016.
- [87] A. Garufo, N. Llombart ir A. Neto, „Radiation of Logarithmic Spiral Antennas in the Presence of Dense Dielectric Lenses”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 64, pp. 4168-4177, 10 2016.
- [88] J. M. Edwards, R. O'Brient, A. T. Lee ir G. M. Rebeiz, „Dual-Polarized Sinuous Antennas on Extended Hemispherical Silicon Lenses”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 60, pp. 4082-4091, 9 2012.
- [89] L. D. Emiliani, J. Agudelo, E. Gutierrez, J. Restrepo ir C. Fradique-Mendez, „Development of rain-attenuation and rain-rate maps for satellite system design in the Ku and Ka bands in Colombia”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, t. 46, pp. 54-68, 12 2004.
- [90] R. S. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.838: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, 2005.
- [91] S. Tamošiūnas, M. Žilinskas, A. Nekrošius ir M. Tamošiūnienė, „Calculation of radio signal attenuation using local precipitation data”, *Lithuanian Journal of Physics*, t. 45, pp. 353-357, 2005.
- [92] S. Tamošiūnas, M. Žilinskas, M. Šileika ir M. Tamošiūnienė, „Revised model of attenuation of electromagnetic waves due to rain”, *Lithuanian Journal of Physics*, t. 46, pp. 433-436, 2006.
- [93] M. Zilinskas, S. Tamosiunas ir M. Tamosiuniene, „Calculation of radio signal attenuation using annual precipitation and heavy rainfall data”, įtraukta *Proceedings of EMC 2006 18 th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, June 28-30, 2006.
- [94] J. Chebil ir R. T. A., „Development of the one–minute Rain Rate Contour Maps for Microwave Applications in Malaysia Peninsula”, *Electronics Letters*, t. 35, pp. 1772-1774, 1999.
- [95] Y. Karasawa ir T. Matsudo, „One–minute rain rate distributions in Japan derived from A MeDAS one–hour rain rate data”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 29, pp. 890-894, 1991.
- [96] P. Tattelman ir D. Grantham, „A Review of Models for Estimating 1 min Rainfall Rates for Microwave Attenuation Calculations”, *IEEE Transactions on Communications*, t. 33, nr. 4, pp. 361--372, 1985.

- [97] R. S. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.841-5: Conversion of annual statistics to worst-month statistics*, 09/2016.
- [98] M. Sekine, S. Ishii, S. I. Hwang ir S. Sayama, „Weibull Raindrop-Size Distribution and its Application to Rain Attenuation from 30 GHz to 1000 GHz”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, t. 28, pp. 383-392, 01 5 2007.
- [99] E. Villermaux ir B. Bossa, „Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops”, *Nature Physics*, t. 5, pp. 697-702, 2009.
- [100] E. Adirosi, L. Baldini, F. Lombardo, F. Russo, F. Napolitano, E. Volpi ir A. Tokay, „Comparison of different fittings of drop spectra for rainfall retrievals”, *Advances in Water Resources*, t. 83, pp. 55-67, 2015.
- [101] H. C. Hulst, *Light scattering by small particles*, John Wiley and sons, 1957.
- [102] S. Ishii, M. Kinugawa, S. Wakiyama, S. Sayama ir T. Kamei, „Rain Attenuation in the Microwave-to-Terahertz Waveband”, *Wireless Engineering and Technology*, t. 7, p. 59, 2016.
- [103] J. Ma, F. Vorrius, L. Lamb, L. Moeller ir J. F. Federici, „Comparison of experimental and theoretical determined terahertz attenuation in controlled rain”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, t. 36, pp. 1195-1202, 2015.
- [104] P. S. Ray, „Broadband complex refractive indices of ice and water”, *Applied optics*, t. 11, pp. 1836-1844, 1972.
- [105] C. Mätzler, „MATLAB functions for Mie scattering and absorption, version 2”, *IAP Res. Rep*, t. 8, pp. 1-24, 2002.
- [106] International Telecommunication Union, „Recommendation P.453-13: The radio refractive index: its formula and refractivity data”, 12/2017. Tinkle: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.453/en>.
- [107] International Telecommunication Union, „Recommendation P.836: Water vapour: surface density and total columnar content”, 12/2017. Tinkle: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.836/en>.
- [108] A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos ir S. G. Johnson, „MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method”, *Comput. Phys. Commun.*, t. 181, pp. 687-702, 1 2010.

- [109] P. Rice ir N. Holmberg, „Cumulative time statistics of surface-point rainfall rates”, *IEEE Transactions on Communications*, t. 21, pp. 1131-1136, 1973.
- [110] F. M. L. Moupfouma, „Modelling of the rainfall rate cumulative distribution for the”, *International Journal of Satellite*, t. 13, nr. 2, pp. 105-115, 1995.
- [111] R. S. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.837: Characteristics of precipitation for propagation modelling*, 06/2017.
- [112] H. J. Song ir T. Nagatsuma, „Present and Future of Terahertz Communications”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, t. 1, pp. 256-263, 9 2011.
- [113] T. Kürner ir S. Priebe, „Towards THz Communications - Status in Research, Standardization and Regulation”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, t. 35, pp. 53-62, 01 1 2014.
- [114] S. F. Yunas, M. Valkama ir J. Niemelä, „Spectral and energy efficiency of ultra-dense networks under different deployment strategies”, *IEEE Communications Magazine*, t. 53, pp. 90-100, 1 2015.
- [115] C. A. Zuhlke, T. P. Anderson ir D. R. Alexander, „Formation of multiscale surface structures on nickel via above surface growth and below surface growth mechanisms using femtosecond laser pulses”, *Opt. Express*, t. 21, pp. 8460-8473, 4 2013.
- [116] I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Tumonis, B. Voisiat, D. Seliuta, G. Valušis ir G. Račiukaitis, „Reflective terahertz imaging with the TEM₀₁ mode laser beam”, *Appl. Opt.*, t. 52, pp. 5640-5644, 8 2013.
- [117] S. F. Busch, G. E. Town, M. Scheller ir M. Koch, „Focus free terahertz reflection imaging and tomography with Bessel beams”, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, t. 36, pp. 318-326, 2015.
- [118] Y. Monnai, D. Jahn, W. Withayachumnankul, M. Koch ir H. Shinoda, „Terahertz plasmonic Bessel beamformer”, *Appl. Phys. Lett.*, t. 106, p. 021101, 2015.
- [119] Y. Monnai, „Integrated terahertz beamformers based on leaky-wave approaches”, įtraukta *2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2016.

- [120] X. Wei, C. Liu, L. Niu, Z. Zhang, K. Wang, Z. Yang ir J. Liu, „Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range”, *Appl. Opt.*, t. 54, pp. 10641-10649, 12 2015.
- [121] A. F. Oskooi, C. Kottke ir S. G. Johnson, „Accurate finite-difference time-domain simulation of anisotropic media by subpixel smoothing”, *Opt. Lett.*, t. 34, pp. 2778-2780, 9 2009.
- [122] P. H. Bolivar, M. Brucherseifer, J. G. Rivas, R. Gonzalo, I. Ederra, A. L. Reynolds, M. Holker ir P. Maagt, „Measurement of the dielectric constant and loss tangent of high dielectric-constant materials at terahertz frequencies”, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, t. 51, pp. 1062-1066, 2003.