

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Ieva Dračanovaitė
METAPAVIRŠIŲ TAIKYMAS MIKROBANGŲ ANTENŲ SPINDULIUOTĖS VALDYMUI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijos
studijų programa

Studentas

Ieva Dračanovaitė

Leista ginti

2023-05-24

Darbo vadovas

dr. Paulius Ragulis

Instituto direktorius

prof. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2023

TURINYS

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	4
1.1 Metamedžiagos ir jų klasifikacija	4
1.1.1 ENG tipo metamedžiagos	6
1.1.2 MNG tipo metamedžiagos	6
1.1.3 DNG tipo metamedžiagos	9
1.2 Metapaviršių taikymas mikrobangų antenose.....	10
1.2.1 Antenos dažnių juostos pločio didinimas	11
1.2.2 Antenos stiprinimo gerinimas.....	13
1.2.3 Antenos matmenys	15
1.2.4 Antenos spindulio pluošto valdymas	16
2. Modeliavimas CST Studio Suite programa	20
2.1 Mikrojuostelinių antenų modeliavimas	20
2.1.1 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo antenos pločio ir aukščio	21
2.1.2 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo plyšio pločio	22
2.1.3 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo padėklo storio	23
2.1.4 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo koaksialines jungties padėties.....	23
2.2 I-osios antenos metapaviršiaus modeliavimas	24
2.3 II-osios antenos metapaviršiaus modeliavimas.....	26
3. Bandinių paruošimas ir eksperimento metodika	30
3.1. Bandinio paruošimas.....	30
3.2. Matavimo įranga	31
4. Matavimo rezultatai	33
4.1 I-osios antenos eksperimentiniai tyrimai	33
4.2 II-osios antenos eksperimentiniai tyrimai	36
Išvados ir rezultatai	41
Literatūros sąrašas	42
Summary	44

Įvadas

Metamedžiagos konceptą primą kartą paminėjo rusų kilmės mokslininkas teoretikas Viktor Veselgo 1968 metais, pavadindamas metamedžiagas kairiarankėmis (angl. left-handed materials), jo teigimu, medžiagos, turinčios neigiamą dielektrinę arba magnetinę skvarbą iš tiesų egzistuoja. Kilus dideliam mokslininkų susidomėjimui ir eksperimentiškai išanalizavus iškeltą teoriją, galiausiai tik praėjus keliems dešimtmečiams buvo praktiškai pademonstruota, kad pasitelkus metamedžiagas galima kontroliuoti elektromagnetines bangas [1]. Metamedžiagos tai – dirbtinai sukurtos kompozicinės medžiagos, dažniausiai sudarytos iš periodinių sub-bangų ilgio metalinių ir (arba) dielektrinių struktūrų, kurios rezonansiškai susijungia su krentančių elektromagnetinių bangų elektriniais ir magnetiniais laukais ir įgyja neįprastas, natūralioje aplinkoje nesutinkamas elektromagnetines savybes [2]. Metastruktūros dažniausiai išdėstomos pasikartojančiais raštais, kurie yra mažesni, nei juos veikiančių elektromagnetinių bangų ilgiai. Metamedžiagos savo savybes įgyja ne iš pagrindinių medžiagų savybių, o iš naujai sukurtų konstrukcijų. Tiksli jų forma, geometrija, dydis, orientacija ir išdėstymas suteikia metamedžiagoms ypatingų savybių, galinčių manipuluoti elektromagnetinėmis bangomis: blokuoti, sugerti ar lenkti sklindančias elektromagnetines bangas [3].

Antena, kaip svarbi ryšių sistemos dalis, pritraukė vis daugiau mokslininkų dėmesio siekiant patobulinti antenas, todėl jų gamyboje buvo įtrauktos metamedžiagos. Metamedžiagų panaudojimas antenų gamyboje turi eilę privalumų. Pasitelkus metamedžiagas galime sumažinti antenos matmenis, taip pat gali būti pagerinti kai kurie antenų parametrai, tokie kaip stiprinimas, atspindys, kryptingumas, dažnių juostos plotis, spinduliavimo kryptis [4]. Be viso to metamedžiagos plačiai naudojamos ir kitose srityse, tokiose kaip spektroskopija, palydovinės sistemos, radijo astronomija, taip pat šios struktūros yra taikomos mikrobangų filtruose, absorbentuose, lęšiuose [5]. Metapaviršiai gali būti pagaminti pasitelkus standartinius fotolitografijos, ęsdinimo, saviorganizacijos (angl. self-assembly) metodus [6].

Šio darbo tikslas teoriškai ir eksperimentiškai išanalizuoti metapaviršiaus poveikį dviejų mikrojuostelinių antenų spinduliavimui ir valdymui.

Darbo uždaviniai:

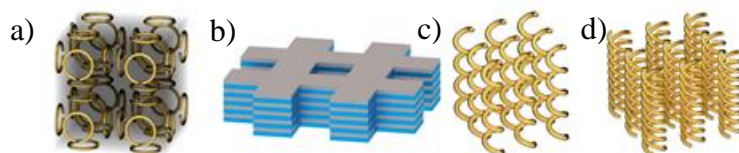
- Išnagrinėti mokslinius straipsnius susijusius šia tema.
- Įvaldyti CST programinę įrangą ir naudojantis ja sumodeliuoti antenos ir metapaviršiaus struktūrą.
- Iširti, kaip antenos savybių kitimas priklauso nuo antenos parametru.
- Pagaminti dvi antenas su metapaviršiumi fotolitografijos būdu ir atlikti matavimus.
- Palyginti išmatuotus rezultatus su teoriniai apskaičiuotais.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Metamedžiagos ir jų klasifikacija

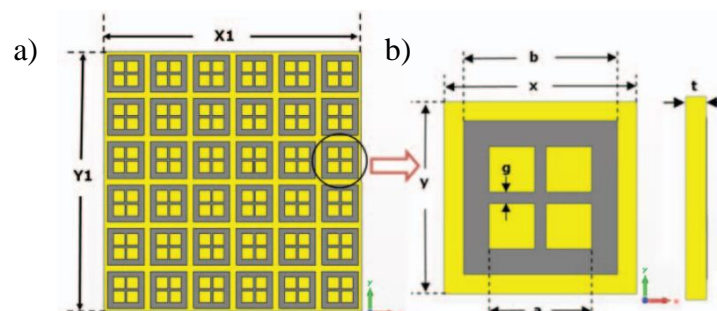
Šiais laikais centimetrinių ir subcentimetrinių bangų prietaisai yra naudojami įvairiose mokslo srityse, tokiose kaip spektroskopija, palydovinės sistemos, telekomunikacija, radijo astronomija, ir t.t., todėl pažangios technologijos mikrobangų prietaisų srityje vis daugiau dėmesio skiria metamedžiagų gamybai ir jų struktūrų gerinimui. Metamedžiagos yra viena iš sudėtinių struktūrų klasės medžiaga, kurios sudedamosios dalys yra vienetinės celės (angl. unit cells). Šios celės pasižymi tam tikromis metalinėmis (pvz. varinėmis) formomis, kurios yra išdėstomos ant pagrindo, dažniausiai pagaminto iš dielektrinės medžiagos. Struktūrinėse medžiagose demonstruojamos neįprastos, natūraliai gamtoje medžiagoms nebūdingos savybės, kurias technologiškai būtų nelengva pasiekti. Šios savybės priklauso nuo vienetinių celių formos, matmenų, jų išdėstymo ir periodiškumo. Pastarieji parametrai yra pasirenkami daug mažesnio arba artimo dydžio veikiamos bangos ilgiui, keičiant vienetinės celės kriterijus galime manipuliuoti metastruktūros dielektrine bei magnetine skvarba. Metamedžiagų didžiausias išskirtinumas yra tai, kad dielektrinės ir magnetinės skvarbos vertės gali būti neigiamos tam tikro dažnio intervaluose, o kartu pasiektas ir neigiamas medžiagos lūžio rodiklis. Šiame skyriuje bus aptarta metamedžiagų klasifikacija bei jas charakterizuojantys parametrai[3].

Metamedžiagos yra skirstomos į dvi grupes pagal jų struktūrą – trimatės ir dvimatės. Trimatėms metamedžiagoms galime priskirti magnetines (a), neigiamo indekso (b), chiralines (c) bei hiperbolines metamedžiagas (d), jų pavyzdžiai pateikti 1-ame paveiksle [7],[8].



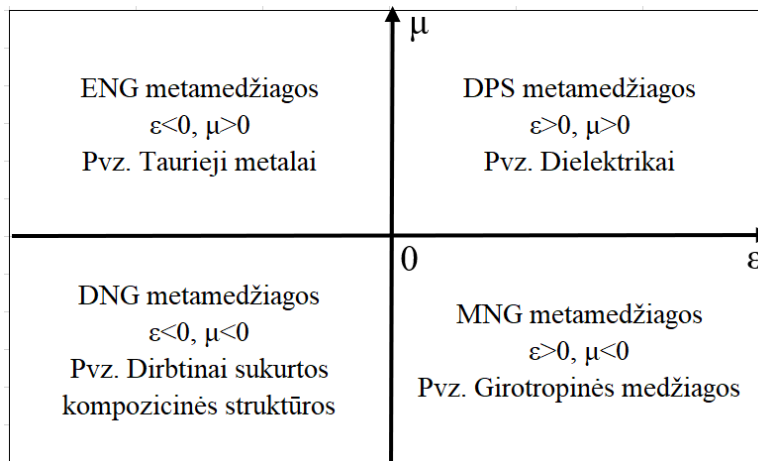
1 pav. Trimačių metamedžiagų vienetinių celių pavyzdžiai [8].

Tuo tarpu dvimačių metamedžiagų struktūros yra daug paprastesnės (2 pav.), geriausiai žinomos – dažniui selektyvūs paviršiai, aukšto impedanso bei sugeriantys paviršiai [7],[9].



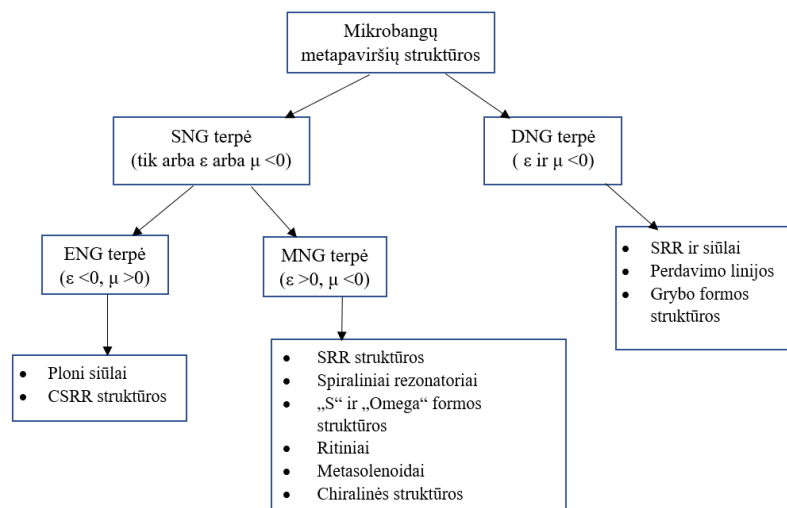
2 pav. a) Dažniui selektyvaus paviršiaus metastruktūra, b) dažniui selektyvaus paviršiaus metastruktūros vienetinės celės, pavyzdys [9].

Praktiškai visos izotropinės medžiagos, randamos gamtoje, turi tiek teigiamą magnetinę, tiek teigiamą dielektrinę skvarbos vertes, tokios medžiagos yra vadinamos DPS (angl. Double positive materials), pavyzdžiui, dielektrikai. Medžiagos, kurių tik dielektrinė skvarba arba tik magnetinė skvarba įgyja neigiamas vertes, yra laikomos SNG (angl. Single negative materials) ir pastaroji klasė yra skirstoma dar į dvi pagrindines grupes, priklausomai nuo neigiamojo parametro: ENG (angl. Epsilon negative) ir MNG (angl. Mu-negative), dar kitaip vadinamos girotropinėmis magnetinėmis medžiagomis. Medžiagos, kurių tiek dielektrinė, tiek magnetinė skvarba yra neigiamos – neegzistuoja gamtoje, jos yra dirbtinai gaminamos, šios medžiagos yra vadinamos DNG (angl. Double negative materials). Neigiamos dielektrinės ir magnetinės skvarbos konstantos egzistavimas leidžia daryti išvadą, kad elektromagnetinės bangos sklindančios DNG bandiniu, lūžio rodiklis taip pat yra neigiamas (3 pav.) [10].



3 pav. Medžiagų klasifikacija pagal dielektrinės ir magnetinės skvarbos vertes (adaptuota iš [10]).

Metamedžiagos gali būti skirstomos į dvi pagrindines klases, pirmoji – DNG ir SNG struktūros, o antroji – PBG (angl. photonic band gap), arba kitaip vadinami fotoninių kristalų struktūros. Žemiau pavaizduota mikrobangų taikymui būdingų metamedžiagų klasifikacija (4 pav.), čia SRR – atviro žiedo formos rezonatorius, CSRR – keli papildantys vienas kitą atviro žiedo formos rezonatoriai.

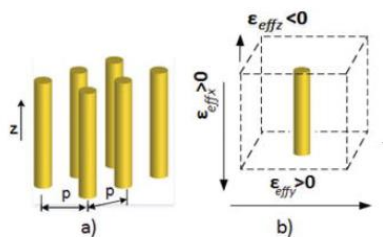


4 pav. Metamedžiagų struktūrų klasifikacija mikrobangų srityje (adaptuota iš [10]).

1.1.1 ENG tipo metamedžiagos

Geriausiai žinoma ENG medžiaga yra plazma, kurios dielektrinės skvarbos vertė yra neigiama tam tikrame dažnių intervale, taip pat prie šių medžiagų yra priskiriami ir metalai (varis, aliuminis, sidabras, auksas), nes metalų dielektrinė skvarba yra nusakoma dažnio funkcija pagal Drude modelį, kuris nurodo, jog viršijus plazmos dažnį, metalo dielektrinė skvarba tampa neigiama. Taurieji metalai elgiasi kaip ENG medžiagos infraraudonųjų ir optinių dažnių intervaluose, todėl šviesos sklidimas šiomis medžiagomis neįmanomas [10]. Tokios ENG metamedžiagos, kaip metaliniai siūlai, struktūra sudaryta iš stačiakampių matricių, kurios yra begalinio ilgio ir išdėstytos lygiagrečiai plonam metaliniam siūlui įterptam dielektrinėje terpėje. Elektromagnetinių bangų sklidimas tokia terpe yra panašus į sklidimą plazmoje. ENG metamedžiagų efektinę dielektrinę skvarbą galima aprašyti formule (1), čia ω_p yra plazmos dažnis, radiusas r ir struktūros periodiškumas a [10].

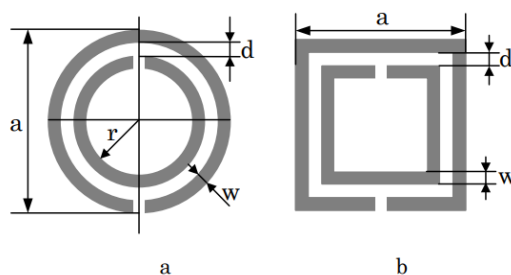
$$\varepsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega[\omega - i(\omega_p^2 a^2 \varepsilon_0 / \sigma \pi r^2)]} \quad (1)$$



5 pav. Plonų strypelių struktūra [11].

1.1.2 MNG tipo metamedžiagos

Labiausiai paplitęs MNG metamedžiagos pavyzdys yra žiedinio rezonatoriaus SRR (angl. Split ring resonator) struktūros. Šios struktūros vienatinės celės gali būti tiek stačiakampio, tiek žiedo pavidalo ir yra laikomos didelio laidumo rezonansinėmis struktūromis. Kintamas magnetinis laukas nukreiptas statmenai žiedinės struktūros indukuoja sroves, kurios sukuria antrinį magnetinį lauką. Priklausomai nuo rezonansinės struktūros, sukurtas magnetinis laukas gali būti stiprinamas arba silpninamas – kitaip tariant, bus sukurama arba teigiama arba neigiama magnetinės skvarbos vertė. MNG struktūros pavyzdys pavaizduotas 6 paveiksle [10].



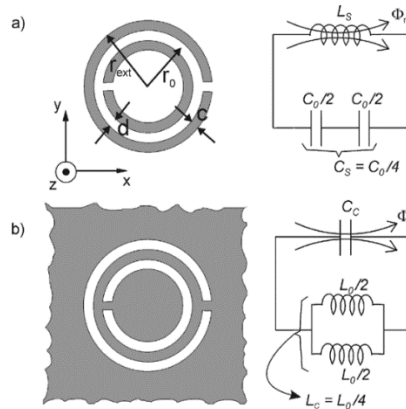
6 pav. MNG struktūros pavyzdys, a) apvalaus ir b) stačiakampio žiedo formos [10].

Tokioms struktūroms efektinė magnetinės skvarbos formulė:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{(\pi r^2) / a}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0} - \frac{3d}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 \epsilon_0 \epsilon r^3}} \quad (2)$$

Čia a - vienetinės celės plotis, d - intervalai tarp žiedų, r -vidinio žiedo radiusas, σ - elektrinis laidumas.

Dvimatėse metastruktūrose, kitaip vadinamose metapaviršiais dažniausiai yra naudojami žiedelio formos rezonatoriai. Žiedelis su tarpeliu elgiasi kaip elementari LC grandinė, 7 paveiksle pavaizduota, kaip atrodo vienetinės celės žiedinio rezonatoriaus ekvivalenčios LC grandinės. Pilkoji zona nurodo metalizuotą topologijos dalį [12].

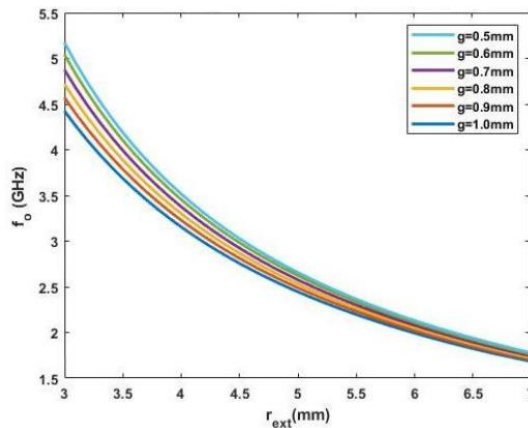


7 pav. a) SRR ir b) CSRR topologijos ir joms ekvivalenčios LC grandinės [12].

Struktūros dažnį galima apskaičiuoti pagal formulę (3), L – magnetinis induktyvumas (žiedo kontūras, ekvivalentas ritei), C – elektrinė talpa (žiedelio tarpas, ekvivalentas kondensatoriui) [13].

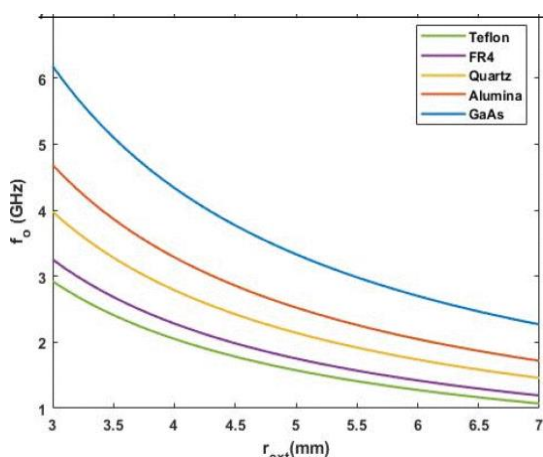
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_T C_{eq}}} \quad (3)$$

Darbe išleistame 2020 metais [13] buvo ištirta, kaip kinta dažnis nuo žiedinio rezonatoriaus žiedelio bei tarpelio dydžio. Rezonansinis dažnis mažėja didėjant žiedinio rezonatoriaus radiusui r_{ext} , o didinant žiedinio rezonatoriaus tarpelį g , struktūros talpa padidėja, todėl rezonansinis dažnis pamažėja (8 pav.).



8 pav. Rezonansinio dažnio priklausomybė nuo žiedinio rezonatoriaus radiuso r_{ext} ir tarpelio pločio g [13].

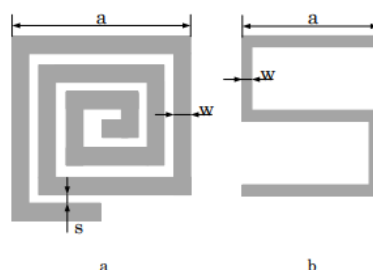
Taip pat buvo ištirta, kad didesnė padėklo dielektrinė skvarba lemia mažesnę talpą, savo ruožtu padidindama rezonansinį dažnį (9 pav.).



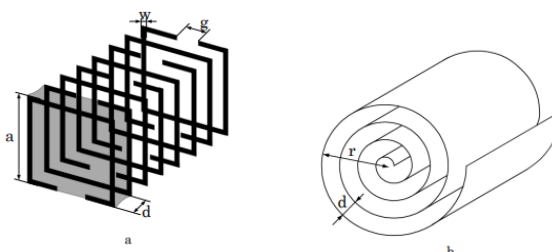
9 pav. Rezonansinio dažnio priklausomybė nuo padėklo dielektrinės skvarbos [13].

Didžiausias tokių struktūrų minusas yra tai, kad jos turi siaurą pralaidumo dažnių juostą esant teigiamai magnetinei skvarbai ir yra patiriami dideli elektromagnetiniai nuostoliai [10].

Pagal metamedžiagų struktūrų klasifikaciją mikrobangų srityje (4 pav.) taip pat prie MNG metamedžiagų struktūrų yra priskiriamos ir spiralinės struktūros (10 pav. a), S formos rezonatoriai (10 pav. b), metasolenoidai (11 pav. a), ritinio formos (11 pav. b) bei omega formos rezonatoriai (12 pav.). Pagrindinis privalumas minėtų struktūrų nuo SRR yra tai, kad jos yra kompaktiškos ir lengvai gaminamos.



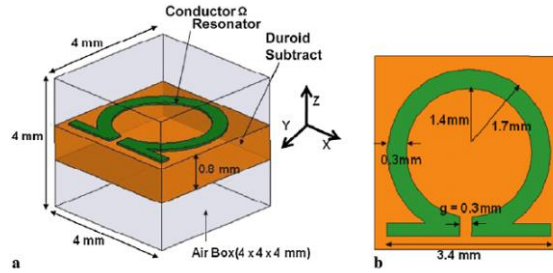
10 pav. MNG struktūros vienetinė celė a) spiralinis rezonatorius b) S formos rezonatorius [10].



11 pav. a) Metasolenoido ir b) ritinio metastruktūros [10].

Bendruoju atveju, metastruktūrose anizotropija yra nepageidaujamas efektas. Omega formos rezonatoriai pasižymi tuo, kad rezonansinis dažnis tiesiogiai priklauso nuo elektrinio lauko orientacijos struktūros plokštumai. Šios struktūros yra laikomos tinkamiausiomis, kur naudojama sąveika su tiesiškai poliarizuotomis plokštuminėmis bangomis, išsaugant maksimalią energiją,

pavyzdžiui, antenos, sugeriantys įtaisai ir lęšiai. Iš dalies keičiant geometrinius Ω struktūros parametrus galima tiesiogiai valdyti rezonanso dažnį ir taip optimizuoti visos sistemos elektromagnetines charakteristikas [10],[14].



12 pav. Omega formos rezonatorius [14].

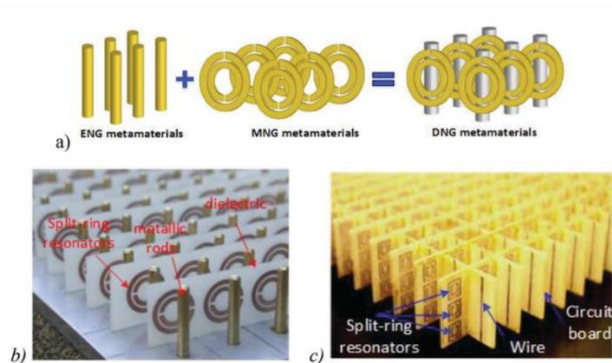
Ritinio MNG struktūros ir metasolenoidai yra panašūs savo vienetinių celių struktūromis ir veikimo principu, tačiau jos yra sukurtos tam, kad galėtų veikti skirtinguose dažnių ruožuose. Schematinė ritinio ir metasolenoidų struktūra pavaizduota 11 pav. Ritinėliai gaminami praktiškai kaip metalo dielektrinio sluoksnio medžiaga, kuri yra spirale suvyniojama ant dielektrinio strypo. Tokių vienetinių elementų masyvo efektinę magnetinę skvarbą galima apskaičiuoti pasinaudojant (4) formule. Čia N yra spiralinių apsisukimų skaičius, r – kiekvieno ritinio spindulys, ε – strypo dielektrinė skvarba ir ρ – laidininko savitoji varža.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\pi r^2 / a}{1 - \frac{dc_0^2}{2\pi^2 \varepsilon r^3 (N-1)\omega^2} + i \frac{2\rho}{\omega r \mu_0 (n-1)}} \quad (4)$$

Daugybė laidininkų sluoksnių įtakoja tokių ritinėlių savaiminį magnetinį induktyvumą, o storis ir strypo elektrinė dielektrinė skvarba – savaiminę talpą. Ritinėliai yra visiškai tinkami naudoti žemo dažnio įrenginiuose. Visų pirma, jie plačiai naudojami magnetinio rezonanso tomografijoje, kur veikimo dažnis siekia apie 100 MHz. Vienetinę metasolenoido celę galima apibūdinti kaip atskirų ritininės struktūros pjūvių rinkinį. Metasolenoido pralaidumas nėra platesnis, palyginti su SRR struktūromis, tačiau turi didelės magnetinės skvarbos reikšmės platesniame dažnių diapazone, esančiame toli nuo rezonanso. Chiralinės struktūros plačiai naudojamos infraraudonųjų ir submilimetrinių bangų ilgių technikoje, taip pat optiniuose įrenginiuose [10].

1.1.3 DNG tipo metamedžiagos

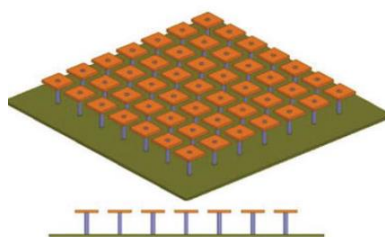
DNG tipo metamedžiagų pagrindinės struktūros yra – perdavimo linijos, grybo formos struktūros ir plonų siūlų sukombinuotu kartu su žiediniais rezonatoriais (13 pav.).



13 pav. Plonų siūlų sukombinuotų su žiediniais rezonatoriais pavyzdys [11].

Alternatyvus būdas formuoti DNG metamedžiagą yra perdavimo linijų struktūros, kurios plačiai naudojamos mikrobangų technikoje. Skirtingai nuo plono žiedo ir SRR struktūros, perdavimo linijos yra nerezonansinės ir dažniausiai plokščios. Patogiausias būdas apibūdinti vienetinius elementus ir visas sistemas, pagrįstas metamedžiagos perdavimo linijomis, yra lygiaverčių grandinių metodas [10].

Grybo pavidalo metamedžiagų struktūra (14 pav.) taip pavadinta dėl vienetinių ląstelių formos, primenančios grybo kepurės ir stiebus. Norint suformuoti metamedžiagos vienetines celes, metaliniai dariniai periodiškai išdėstomi matricoje. Tarpai tarp „lopu“ sudaro talpuminius ryšius, o „stiebai“ - induktyvumus. Grybų struktūra turi tiek DPS tiek DNG medžiagų savybių, priklausomai nuo dažnio. Tokia struktūra turi savybių, tinkamų žemo ir aukšto dažnio filtrų pritaikymui dažnių diapazone aplink tuos, kuriuose struktūra turi DNG savybių. Grybo formos struktūroje kaip metalinės ląstelės gali būti naudojamos įvairių tipų MNG medžiagos: SRR ir išvestinės konfigūracijos, Ω formos ir chiralinės struktūros. Puikus pavyzdys yra grybo formos metalo dielektrinė struktūra su PIN diodais, išdėstytais išilgai perėjimų krypčiai. Tokia konstrukcija su kelių diodų jungikliu leidžia sumažinti nepageidaujamą perdavimą tam tikru kritimo kampų. Grybo formos struktūra su diodais gali būti pritaikyta dviejų juostų sub-bangos vaizdavimui, kur veikimo dažnis gali būti valdomas keičiant diodų būsenas [11].

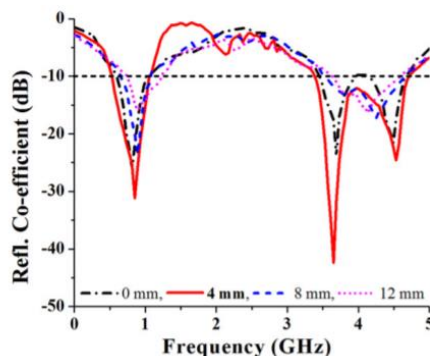


14 pav. Grybo formos metastruktūra [11].

1.2 Metapaviršių taikymas mikrobangų antenose

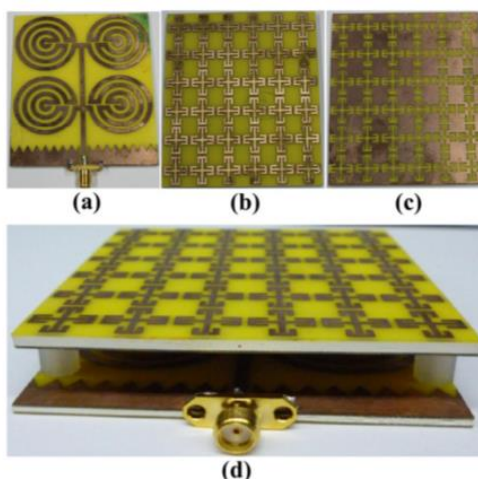
Paskutiniu metu belaidėje telekomunikacijų srityje kyla vis didesnis poreikis pagerinti antenų charakteristikas, todėl pritaikius metapaviršius galime išgauti geresnius antenų parametrus, tokius

Svarbu pasirinkti tinkamą atstumą tarp antenos ir metapaviršiaus. 17 paveiksle pavaizduota, kaip atspindžio koeficientas priklauso nuo minėto atstumo. Tyrimui buvo pasirinktas 4 mm oro tarpas, šioje pozicijoje esantis metapaviršius demonstruoja mažiausią atspindžio koeficientą ir plačiausią dažnių ruožą. Oro tarpas tarp metapaviršiaus ir antenos turi mažesnę įtaką žemesniųjų dažnių ruožui, tačiau aukštesniuose dažniuose ruožas yra stipriau paveikiamas – pasislenka rezonansinis dažnis [15].



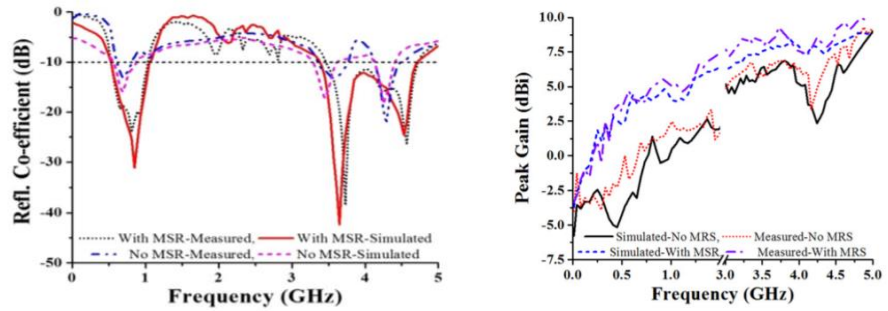
17 pav. Atspindžio priklausomybė nuo oro tarpas tarp metapaviršiaus ir antenos [15].

Pagaminta antena (18 pav. a) bei metapaviršius (18 pav. b, c) pavaizduoti paveiksle žemiau. Taip pat (18 pav. d) pavaizduota, kaip atrodo sukonstruota antena.



18 pav. Metapaviršiaus ir antenos konstrukcija [15].

19 paveiksle atvaizduoti sumodeliuotos antenos ir metapaviršiaus rezultatai – išmatuotos atspindžio koeficiento vertės su ir be metapaviršiaus, taip pat rezultatuose įtraukti ir modeliavimo rezultatai. Ženklaus atspindžio sumažėjimas matomas, kuomet antena yra su metapaviršiumi, tuo pačiu antenos spinduliuojamas dažnių juosta tampa platesnė, kuomet antena yra naudojama kartu su metapaviršiumi. Taip pat stiprinimo rezultatai įrodo dar kartą, jog antenai tinkamai parinkus metapaviršių galima pasiekti daug didesnes stiprinimo koeficiento vertes.



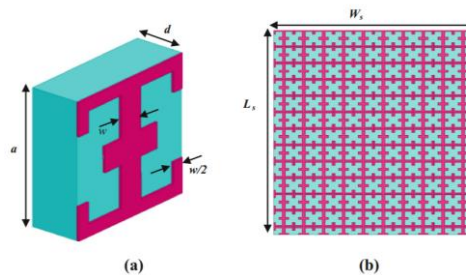
19 pav. Atspindžio koeficiento ir stiprinimo rezultatai [15].

Šios antenos ir metapaviršiaus kombinacija, parodo, jog veikimo juostos yra tinkamos HF RFID skaitytuvui, WiMAX ir WLAN pritaikymams [15].

1.2.2 Antenos stiprinimo gerinimas

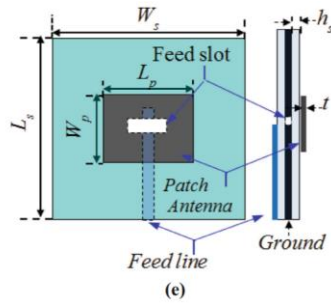
Telekomunikacijų srityje yra aktualu turėti kuo mažesnių matmenų antenas, tačiau sumažintos antenos kenčia nuo spinduliavimo našumo pablogėjimo. Ši problema yra dar jautresnė kalbant apie daugiajuotines antenas, ypatingai žemuose dažniuose, todėl mokslininkai susiduria su nemažai iššūkių norint išsaugoti gerą antenos našumą mažinant jos matmenis. Šioms problemas išspręsti, viena iš technologinių galimybių yra metapaviršiai. Šiame skyrelyje bus aptarta NZIM (angl. near-zero-index metamaterial) metapaviršiaus, kuris sudarytas iš periodiškai išdėstytų Jeruzalės kryžiaus formos vienetinių celių ir mikrojuostelinės (angl. microstrip patch) antenos sąveika [16].

Jeruzalės kryžiaus vienetinė celė yra pavaizduota 20 paveikslo a) dalyje. Šiam metapaviršiui buvo panaudotas dielektrinis padėklas, kurio dielektrinė skvarba $\epsilon = 2.2$, padėklo storis $d = 0.8$ mm, kryžiaus metalizacijos storis – 0.035 mm.



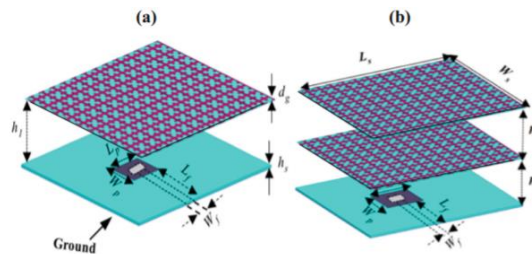
20 pav. a) Metapaviršius vienetinė celė ir b) meapaviršius [16].

Antena, kurios matmenys – $Wp \times Lp = (0.184 \times 0.257)$ mm ir darbinis dažnis 43.5 GHz, yra pagaminta ant tokio pat padėklo kaip ir antena (21 pav.).



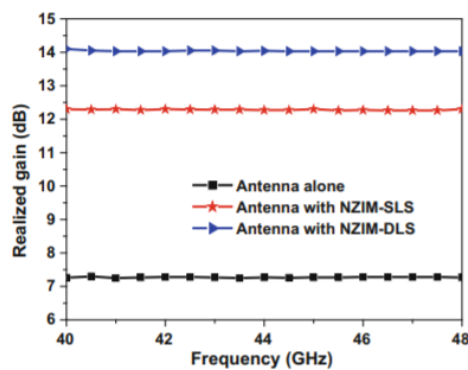
21 pav. Mikrojuostelinė antena [16].

Šiame straipsnyje buvo ištirti du atvejai, kuomet virš antenos yra panaudojamas tik vienas metapaviršius ir kai panaudojami du metapaviršiai (22 pav.). Atstumai tarp antenos ir pirmojo metapaviršiaus h_1 , o atstumas nuo pirmojo iki antrojo metapaviršiaus yra h_2 . Optimaliausios atstumų vertės pasirinktos $h_1 = 2.2$ mm, $h_2 = 2.3$ mm. a) atveju nagrinėjamas NZIM-SLS konstrukcija, o b) NZIM-DSL [16].



22 pav. a) NZIM-SLS konstrukcija b) NZIM-DSL konstrukcija [16].

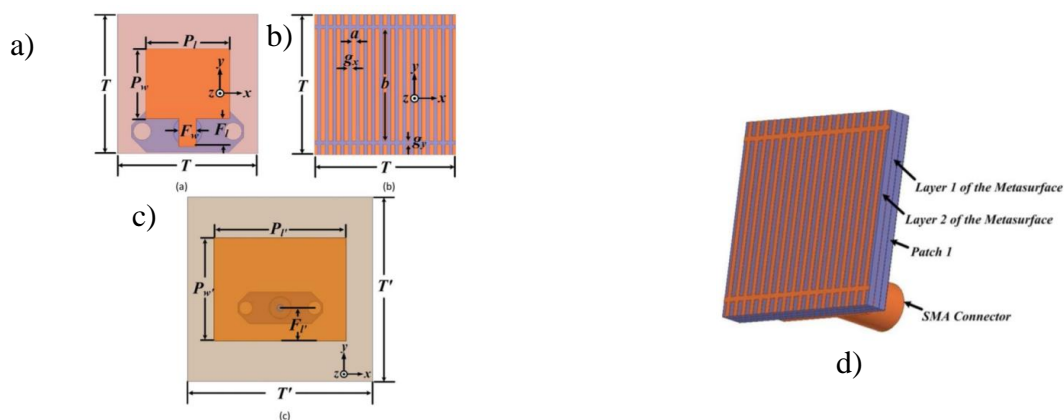
Įrodyta, kad antenos su dviguba metapaviršiaus konstrukcija stiprinimas yra didžiausias – 14 dB, tuo tarpu su vienu – 12.2 dB. Rezultatai pasiekti beveik dvigubai geresni, lyginant su antenos veikimu atskirai be metapaviršiaus (23 pav.) [16].



23 pav. Stiprinimo matavimų rezultatai antenos be metapaviršiaus, NZIM-SLS ir NZIM-DSL konstrukcijos [16].

1.2.3 Antenos matmenys

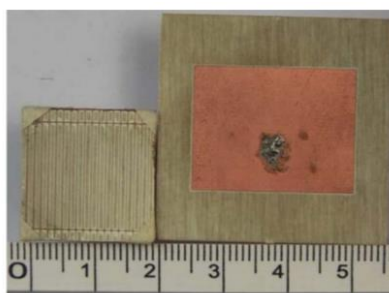
Išsaugęs mažesnių matmenų antenų poreikis taip pat įtraukė metapaviršius į efektyvesnę antenų gamybą. Šiame skyrelyje bus aptarta, kaip išsaugoti spinduliuotės parametrus keičiant antenos matmenis.



24 pav. a) Pirmoji antena b) metastruktūra c) antroji antena d) miniatiūrizuota antena, pirmosios antenos ir metapaviršiaus kombinacija [17].

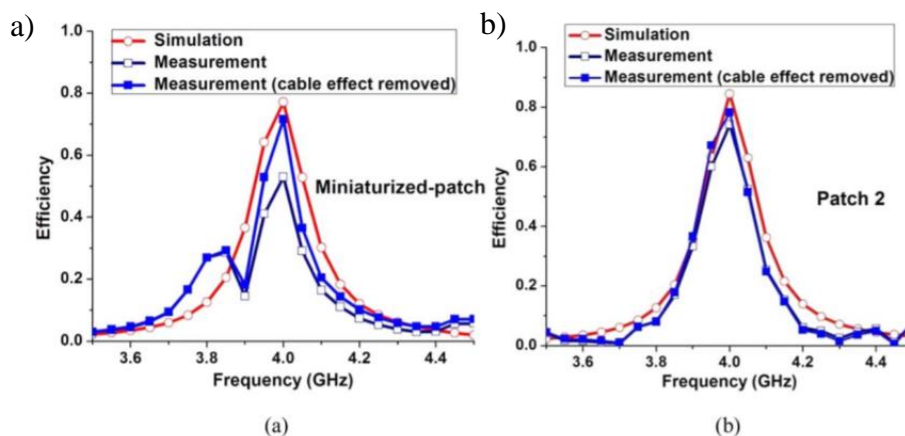
Šiame pavyzdyje, antena yra pagaminta ant dvipusio padėklo, taip kaip pavaizduota 24 paveiksle a) dalyje, ją sudaro mikrojuostelinė antena ir maitinimo linija. Antenos matmenys $P_w = 10$ mm, veikimo dažnis – 4 GHz. Šios antenos bendras užimamas plotas yra $T \times T = 20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$ – aiškumo dėlei šią anteną pavadinsime antena numeris 1. Sumodeliuotas metapaviršius miniatiūrizuotai antenai yra dvipusis, pirmosios pusės sluoksnis sudarytas iš vienetinių celių, turinčių juostelines linijas, kurių plotis a ir ilgis b , kaip parodyta 24 pav. b) dalyje. Vienetinės celės išdėstytos periodiškai x ir y kryptimis. Antroji metapaviršiaus pusė yra papildanti 1-ąjį paviršių. Miniatiūrizuotos antenos konstrukcija susideda iš pirmosios antenos, dvipusio metapaviršiaus tiesioginiu sąlyčiu ir SMA jungties, taip kaip parodyta 24 pav. d) dalyje. Miniatiūrizuota antena, taip pat kaip ir pirmoji užima 400 mm^2 plotą [17].

Antroji antena sumodeliuota be metapaviršiaus, kaip parodyta 24 pav. c) dalyje, jos parametrai atitinka miniatiūrizuotosios antenos parametrus – rezonansinis dažnis 4 GHz, toks pat dažnių juostos plotis bei stiprinimas. Šios antenos matmenys yra $35 \times 35 \text{ mm}^2 = 1225 \text{ mm}^2$, tai yra 67% didesnis plotas, lyginant su miniatiūrizuota antena [17].

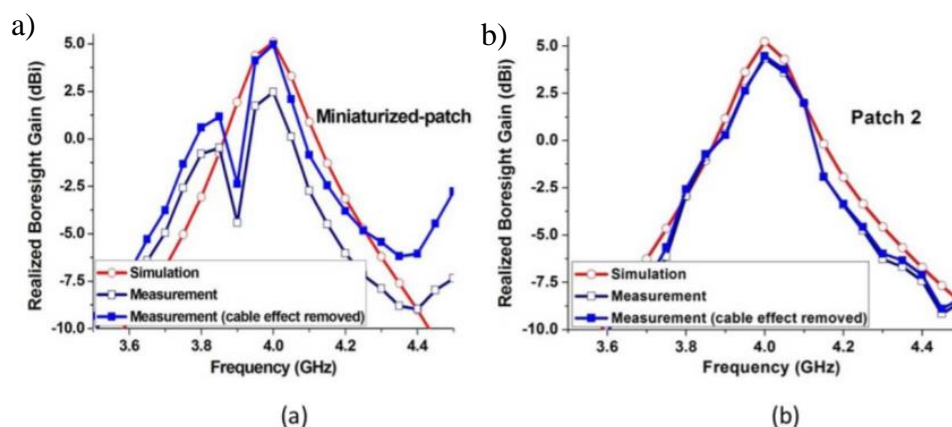


25 pav. Miniatiūrizuotos ir antrosios antenos palyginimas [17].

Palyginus, kaip veikia abi antenos buvo pastebėta, kad tiek sumažintos antenos, kuri buvo sukonstruota kartu su metapaviršiumi, tiek didesnių išmatavimų antrosios antenos rezultatai yra panašūs, vadinasi metapaviršiai puikiai tinka antenų matmenų mažinimui. Žemiau pavaizduoti antenų efektyvumas bei stiprinimo rezultatai palyginimui [17].



26 pav. a) Miniatiūrizuotos antenos su metapaviršiumi ir b) didesnės antenos efektyvumą palyginimas [17].

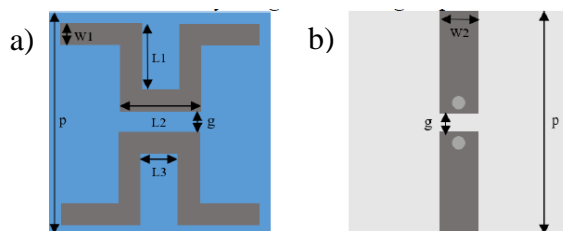


27 pav. a) Miniatiūrizuotos antenos su metapaviršiumi ir b) didesnės antenos stiprinimo palyginimas [17].

1.2.4 Antenos spindulio pluošto valdymas

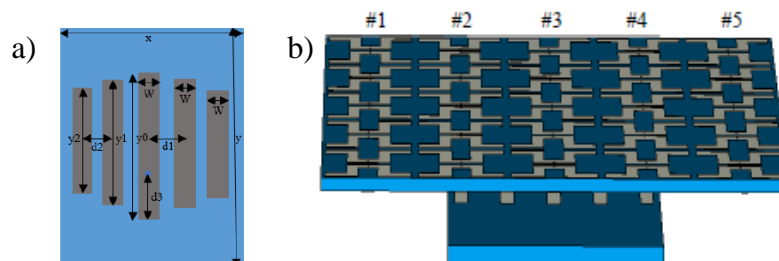
Antenos spinduliuotės pluošto valdymas (angl. beam steering) susilaukė didelio susidomėjimo dėl tinklo pajėgumo plėtros. Ši technologija vis dažniau naudojama tokiose sistemose kaip korinis arba mobilusis ryšys, 5G ar WiFi. Antenos spinduliuotės valdymo pagrindinis privalumas yra tai, jog galime sutelkti spinduliuotės priėmimo spindulį norima kryptimi į konkrečią stotį, užtikrindami maksimalų stiprinimą ir mažesnę interferenciją [18]. Antenos pluošto valdymas galimas keliais būdais. Paprasčiausias – pasyvus metodas, pakeičiant metapaviršiaus raštą, arba aktyvus valdymo būdas. Aktyvus valdymo būdas yra gerokai sudėtingesnis lyginant su pasyviu, dėl reikalingų papildomų elementų ir valdymo grandynų (varaktorių ar PIN diodų [19]). Šiame skyrelyje bus aptarti keli būdai, kaip galima valdyti antenos spindulio pluoštą.

Išnagrinėtame straipsnyje [20] antenos pagrindinio spindulio pluošto valdymas yra pasitelkiamas rekonfiguraciniu metapaviršiumi. Šis metapaviršius yra ypatingas tuo, kad ant metastruktūros yra išdėlioti PIN diodai, kurie sudaro skirtingus srovės pasiskirstymo kelius. Šio metapaviršiaus vienetinės celės pavyzdys pateiktas 28 pav., čia PIN diodas yra tarp viršutinės ir apatinės sekcijos, o vienetinės celės yra sujungtos nuosekliai sudarydamos 5×5 matricą. Metapaviršiaus didžiausias pralaidumas išgaunamas ties 3,75 GHz dažniu, jis yra išsėdintas ant FR4 padėklo, kurio dielektrinė skvarba yra 4,3.



28 pav. Metapaviršiaus vienetinės celės pavyzdys iš a) viršaus ir b) apačios [20].

Bandymui buvo panaudota mikrojuostelinė „Quasi-Yagi“ antena, kuri yra pavaizduota 29 pav. a) dalyje, ji sudaryta iš pagrindinės juostelės per vidurį ir iš abiejų pusių esančių simetriškai viena kitai parazitinių juostelių, kurios eliminuoja atspindžius [21]. Atstumas tarp antenos ir metapaviršiaus yra 14 mm, pilna struktūra pavaizduota 29 pav. b) dalyje.



29 pav. a) Quasi-Yagi antena ir b) antenos kartu su metapaviršiumi struktūra [20].

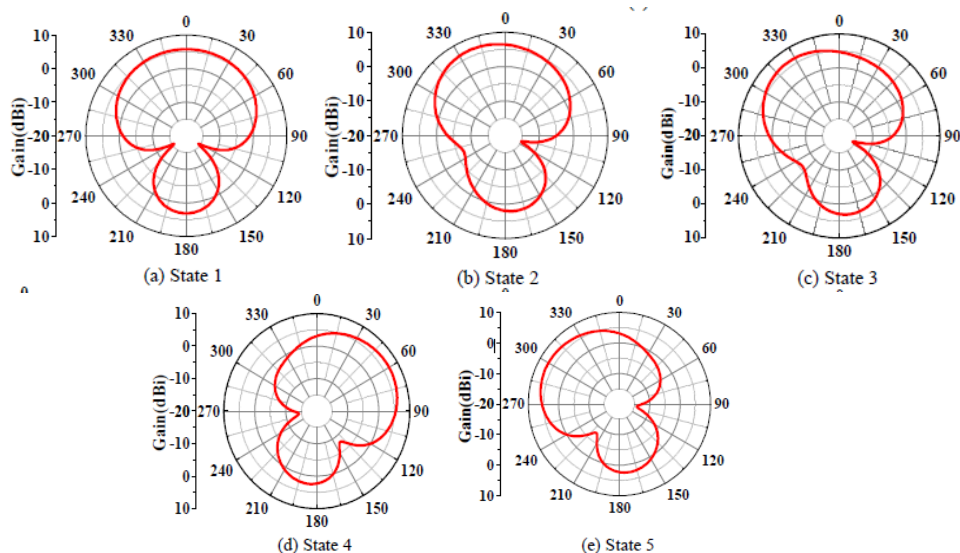
Antenos valdymas išgaunamas manipuluojant dviem PIN diodų būsenom (išjungta/įjungta). Metapaviršius suskirstytas į penkis stulpelius, kur kiekviename yra po penkis PIN diodus (29 pav. b). Lenteleje 1 pateiktos šios penkios variacijos. Kuomet visi PIN diodai yra išjungti antenos su metapaviršiumi struktūra spinduliuoja teisiai (0°), pakeitus pirmojo stulpelio metapaviršiuje PIN diodų būsenas į „įjungta“, išgauname spindulio pasukimą 20° kampu, analogiškai priešingoje puseje penktame stulpelyje įjungus PIN diodus (3-ia būseną) pasukimas atsikartoja priešinga kryptimi tokiu pačiu kampu. Tuo tarpu sukombinavus pirmo ir antro stulpelio PIN diodų būsenas ir jas įjungus, spinduliavimo kryptis dar labiau pasistumia ir spinduliuoja 60° kampu. Analogiškai išgaunamas spinduliavimas ir į priešingą pusę. Antenos spinduliavimo kryptinės priklausomybės pavaizduotos 30 paveiksle. Negana to, kad pasikeičia pagrindinė spinduliavimo kryptis, tuo pačiu įjungus PIN diodus, pagerėja ir antenos stiprinimas kiek daugiau nei 1 dBi 2-3-ioje ir 4-5-oje būsenoje lyginant su pirmąja.

STATES OF THE PROPOSED ANTENNA

State	#1	#2	#3	#4	#5	Beam direction	Gain(dBi)
1	off	off	off	off	off	theta = 0°	5.74
2	on	off	off	off	off	theta = 20°	6.84
3	off	off	off	off	on	theta = -20°	6.84
4	on	on	off	off	off	theta = 60°	6.92
5	off	off	off	on	on	theta = -60°	6.92

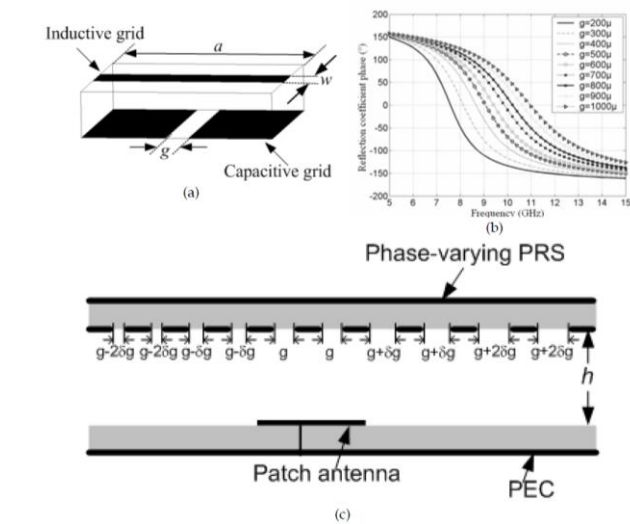
1 lent. Antenos PIN diodų būsenos [20].

Antenos spinduliuotės pasikeitimą įjungus arba išjungus PIN diodą galime pagrįsti tuo, kad įjungus PIN diodu tekėti srovei, metapaviršius įgyja ENG (būsena, kuomet dielektrinė skvarba yra neigiama) medžiagai būdingų savybių, kurios blokuoja bangų sklaidimą ir atspindi visas krintančias bangas su atitinkama poliarizacija. O kuomet PIN diodu yra prijungta kita kryptimi tekanti srovė, metapaviršius įgyja MNZ (magnetinė skvarba artima nuliui) savybių, dėl kurių, spinduliuojamos bangos praleidžiamos [22].



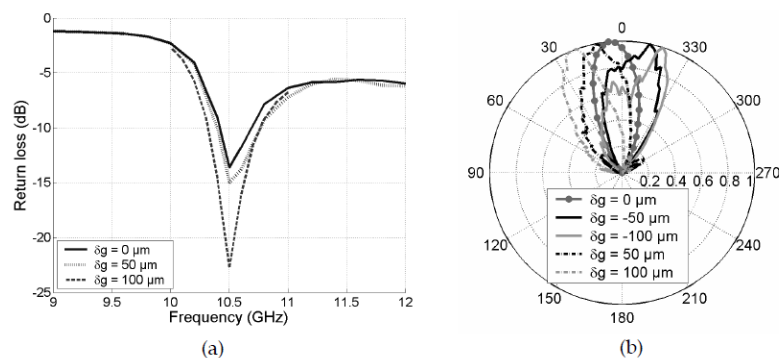
30 pav. Antenos spinduliuotės kryptinės diagramos esant skirtingoms būsenoms [20].

Dar vienas būdas valdyti antenos spinduliuotės kryptį pateiktas [19] straipsnyje pasitelkiant fazinio gradiento metapaviršius (angl. phase gradient metasurface). Paprasčiausias antenos spinduliuotės valdymas galimas pritaikant dvipusį metapaviršių [19], kuris yra sudarytas iš 1-D varinių juostelių, išgraviruotų kiekviename dielektrinio pagrindo paviršiuje, kaip parodyta 31 pav. a) dalyje. Svarbu paminėti, kad tarpas g tarpiniame tinkle vaidina lemiamą vaidmenį nustatant metapaviršiaus talpą, o tuo pačiu ir rezonanso dažnį. Keičiant g ir išlaikant visus kitus geometrinis parametrus nepakitusius, keisis ir metamedžiagos talpa. Dėl to apskaičiuotų atspindžio koeficientų fazės skiriasi. Šį elgesį iliustruoja 31 pav. b) pateikti skaitiniai rezultatai. Galime pastebėti, kad g tarpelio didinimas lemia rezonanso dažnio poslinkį aukštesnių dažnių link. Jei kiekvieną tarpą laikysime plyšine antena, tuomet galima padaryti analogiją su kelių antenų masyvu, turinčiu reguliarių fazių skirtumą. Toks lokaliai kintamos fazės metapaviršius gali būti pritaikytas pasyviai spindulio valdymui 31 pav. c) [19].



31 pav. a) Metapaviršiaus vienatinė celė, sudaryta iš indukcinio ir talpinio tinklelio, b) Metapaviršiaus atspindžio fazės kitimo priklausomybė nuo tarpo pločio g , c) Plokščios antenos ir metapaviršiaus su kintamu tarpo pločiu, vaizdas [19].

Straipsnyje [19] norint praktiškai parodyti spindulio valdymą, buvo pagamintos kelios antenos naudojant 1-D metapaviršių kaip PRS (angl. phase reflecting surface). Pirmąjį sudaro metamedžiaga PRS, kurios tarpas $g = 400 \mu\text{m}$ tarp talpinio tinklelio metalinių juostelių, o $\delta g = 0$. Šis prototipas neužtikrins jokio pluošto nukrypimo, nes jame nėra metamedžiagos fazės pokyčių. Antrasis ir trečiasis yra prototipai, turintys atitinkamai $\delta g = 50 \mu\text{m}$ ir $2\delta g = 100 \mu\text{m}$ pokytį, kaip parodyta 31 paveiksle c) dalyje. Nustatyta, kad visų trijų prototipų rezonansinis dažnis yra $\sim 10,5 \text{ GHz}$, kaip parodyta 32 pav. a) dalyje. Didžiausias atspindys pastebimas, kai PRS talpinio tinklelio metalinis tarpas įgyja $\delta g = 100 \mu\text{m}$ pokytį. 32 paveiksle b) dalyje matome išmatuotus antenos stiprinimo modelius $E(\varphi = 90^\circ)$ plokštumoje esant $10,5 \text{ GHz}$, kai atstumas tarp antenos ir metapaviršiaus yra $h = 1 \text{ mm}$. Jei $\delta g = 0$, spindulys yra nukreipiamas antenos plokštumai ir nematyti jokio nuokrypio, tačiau, esant reguliariam $50 \mu\text{m}$ pokyčiui, matomas antenos pluošto nuokrypis apie 10° , kuris gali būti stebimas arba į dešinę (pagal laikrodžio rodyklę), arba į kairę (prieš laikrodžio rodyklę), priklausomai nuo to, ar δg yra atitinkamai neigiamas ar teigiamas [19].



32 pav. a) Antenos atspindys esant skirtingiems tarpelių pokyčiui ir b) išmatuotas stiprinimas keičiant tarpelio dydį [19].

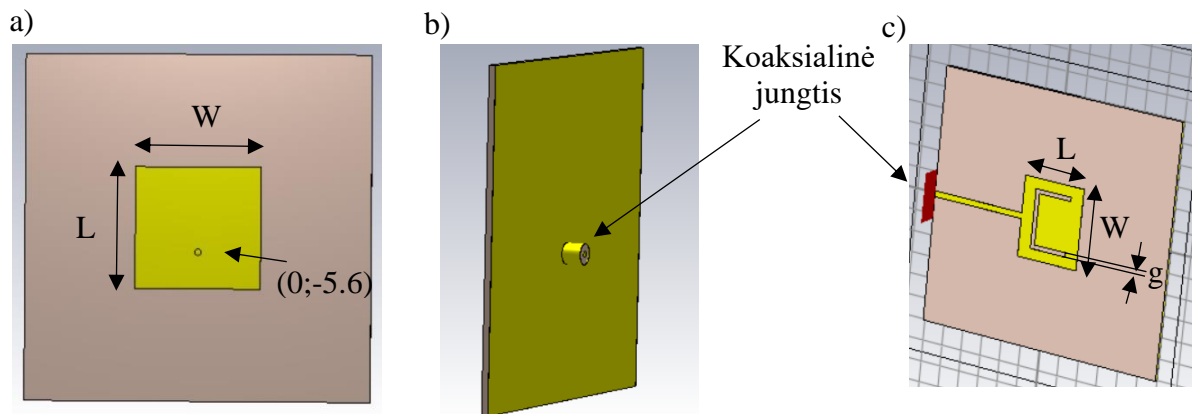
2. Modeliavimas CST Studio Suite programa

Atliekant antenos matavimus neretai reikia pakeisti daug kintamųjų dydžių, pavyzdžiui, mikrojuostelinės antenos ilgį ar aukštį, padėklo storį ar koaksialinės jungties padėtį, kol randame labiausiai mus tenkinantį rezultatą, todėl labai patogu iš anksto numatyti rezultatus ir apsiskaičiuoti antenos parametrus modeliuojant kompiuterine programa. Šiame darbe modeliavimai atlikti naudojantis CST Studio Suite, tai yra didelio našumo elektromagnetinės analizės programinės įrangos paketas, kuris gali pasitarnauti kuriant elektromagnetinių komponentų sistemas, padeda jas optimizuoti, analizuoti. Viena iš darbo užduočių buvo sumodeliuoti dvi mikrojuostelines antenas su metapaviršiumi, remiantis pasirinktais moksliniais straipsniais [23],[24]. Šiame skyrelyje bus aprašomas minėtų struktūrų modeliavimas.

2.1 Mikrojuostelinių antenų modeliavimas

Pirmoji antena optimizuota ties 2,45 GHz dažniu. Mikrojuostelinės antenos matmenys – plotis $L= 28,5$ mm, aukštis $W= 29$ mm. Antena yra išsėdinta ant FR4 padėklo, kuris yra pagamintas iš vientiso austo stiklo audinio su elektriniu epoksidinės dervos rišikliu. Padėklo storis $h = 1,55$ mm, plotis – 80 mm, ilgis – 80 mm, dielektrinė skvarba $\epsilon = 4.3$. Mikrojuostelinės antenos metalizacijai naudojamas varis, kurios storis 0,035 mm. Koaksialinė jungtis, kurios impedansas 50 omų, yra prijungta atstumu, kurio koordinatės $(0;-5.6)$ mm nuo mikrojuostelinės antenos centro. Galinė antenos dalis padengta variu – padarytas įžeminimas. 33 pav. pavaizduotas antenos modelis iš a) viršaus ir b) apačios.

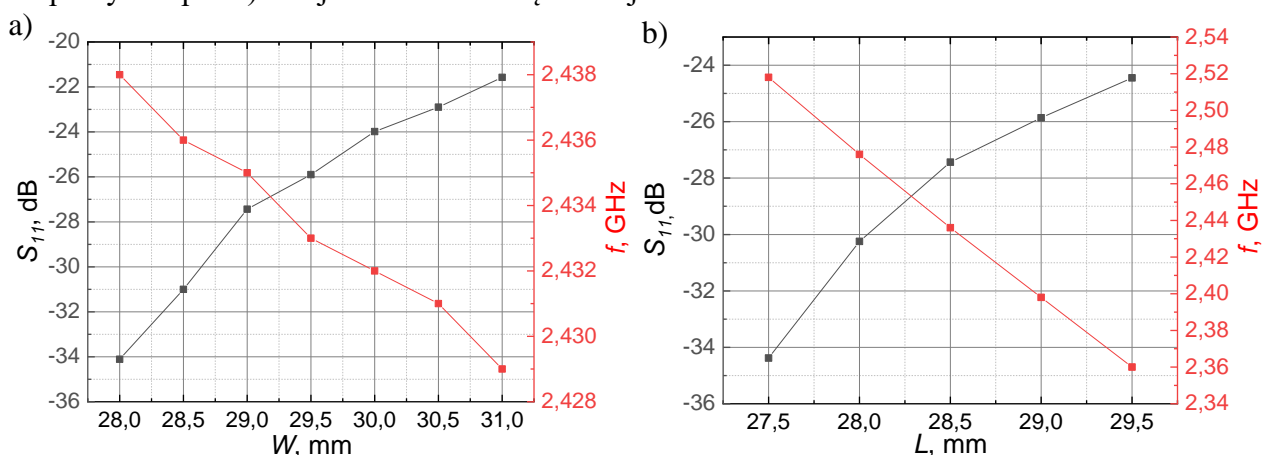
Modeliuojant antrąją anteną buvo pasirinktas plyšinės antenos modelis, kuris pavaizduotas 33 pav. c) dalyje. Mikrojuostelinės antenos matmenys – plotis $L = 30$ mm, aukštis $W= 38$ mm. Antena taip pat išsėdinta ant FR4 padėklo, kurio storis 1,6 mm, plotis – 120 mm ir ilgis – 120 mm. Antra antenos pusė taip pat padengta variu, kurio metalizacijos storis 0,035 mm. Koaksialinė jungtis, skirtingai nei pirmuoju atveju, yra prilituojama apačioje, kurios impedansas taip pat 50 omų, nuo antenos iki koaksialinės jungties yra išsėdinta linija, kurios ilgis – 45 mm, plotis – 2,72 mm, tokie matmenys pasirinkti siekiant suderinti antenos impedansą su koaksialinės jungties impedansu. Šios antenos rezonansinis dažnis yra 2,6 GHz.



33 pav. Sumodeliuota I-oji mikrojuostelinė antena a) iš viršaus b) iš galo ir c) II-oji antena.

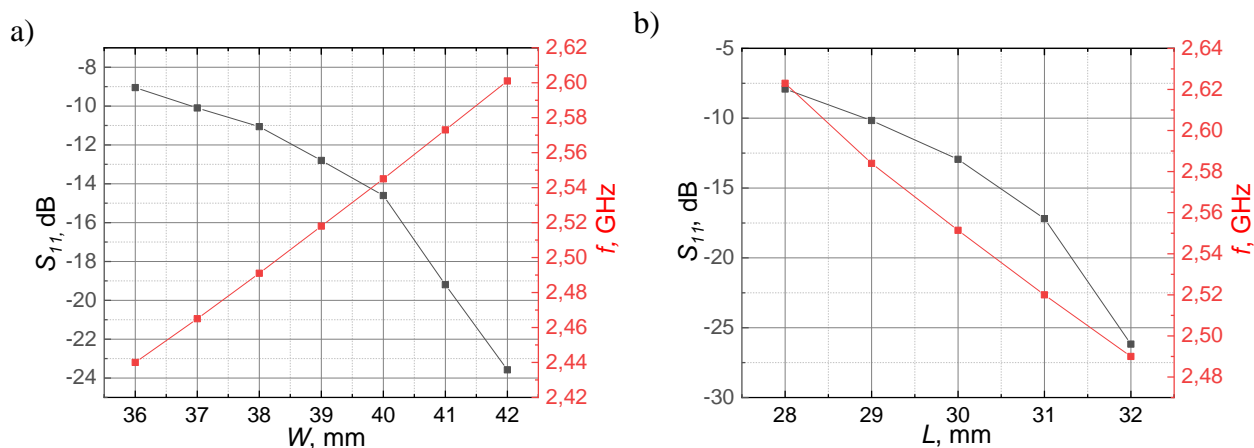
2.1.1 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo antenos pločio ir aukščio

Atliekant įvairius matmenų pakeitimus pirmajai antenai, stebėta, kaip kinta rezonansinis dažnis ir antenos atspindys (S_{11} parametras). 34 pav. a) pavaizduota, kaip kinta mikrojuostelinės antenos parametras S_{11} ir rezonansinis dažnis keičiant antenos plotį W , o b) dalyje matyti priklausomybė nuo antenos aukščio L . Didinant antenos plotį, matyti, kad atspindys didėja nuo -34 dB iki -21,5 dB, tai vyksta dėl to, nes mažinant antenos plotį, antenos impedansas ima labiau sutapti su koaksialinės jungties impedansu, tuo tarpu antenos rezonansinis dažnis kinta nežymiai, tačiau pastebima tendencija, jog didinant plotį, rezonansinis dažnis tiesiškai mažėja. Keičiant antenos aukštį L (34 pav. b), matyti, kad rezonansinis dažnio kitimas yra reikšmingesnis ir didinant antenos aukštį, rezonansinis dažnis pasislenka mažesnių dažnių srities link, šį mažėjimą lemia tai, kad padidinus antenos aukštį, padidėja spinduliuojamos bangos ilgis, kadangi rezonansinis dažnis yra atvirkščiai proporcingas bangos ilgiui, gauname dažnio slinkimąsi link mažesnių dažnių srities. Tuo tarpu atspindys kaip ir a) atveju didinant aukštį – didėja.



34 pav. Pirmosios antenos a) atspindžio (juoda kreivė) ir rezonansinio dažnio (raudona kreivė) priklausomybės nuo a) antenos pločio W ir b) nuo antenos aukščio L .

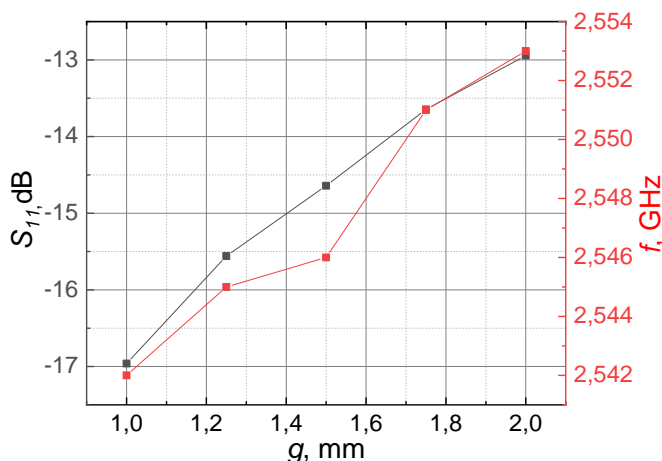
Ištirus antrąją anteną (35 pav.), pastebėtas kiek kitoks parametrų kitimo elgesys, lyginant su pirmąja antena. Taigi, didinant antenos plotį W (35 pav. a), rezonansinis dažnis slenkasi aukštesnių dažnių srities, o atspindys ženkliai mažėja. Tuo tarpu didinant antenos aukštį L , tiek rezonansinis dažnis slenka žemesnių dažnių srities link, tiek antena pradeda atspindėti mažiau.



35 pav. Antrosios antenos a) atspindžio (juoda kreivė) ir rezonansinio dažnio (raudona kreivė) priklausomybės nuo a) antenos pločio W ir b) nuo antenos aukščio L .

2.1.2 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo plyšio pločio

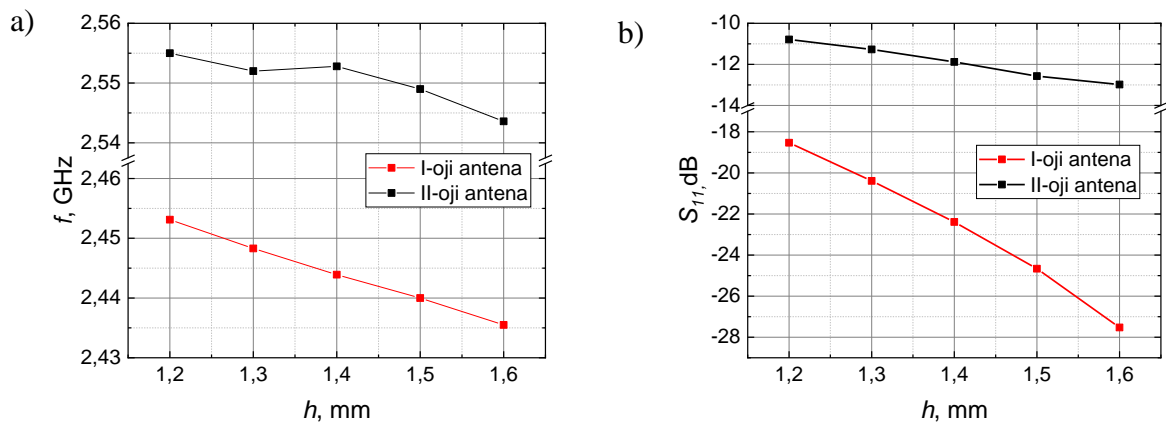
Atlikus analizę, kaip kinta rezonansinis dažnis ir antenos atspindys keičiant antrosios antenos plyšelio plotį g , matyti (36 pav.), kad abu parametrai didinant antenos plyšio plotį tiesiškai auga. Plyšeliui padidėjus du kartus, antenos rezonansinis dažnis nežymiai pakinta, tuo tarpu atspindys padidėja iš -17 dB iki -13 dB.



36 pav. Antrosios antenos atspindžio (juoda kreivė) ir rezonansinio dažnio (raudona kreivė) priklausomybė nuo antenos plyšelio pločio g .

2.1.3 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo padėklo storio

Pademonstruota antenos atspindžio ir rezonansinio dažnio priklausomybė nuo padėklo storio. Didėjant padėklo storiui, kartu didėja ir padėklo efektinė dielektrinė skvarba, kuri yra atvirkščiai proporcinga rezonansiniam dažniui iš 37 pav. a) dalies galime pastebėti nežymų rezonansinio dažnio mažėjimą. Taip pat pastebima, kad padėklo storiui didėjant antenos atspindys mažėja (37 pav. b).



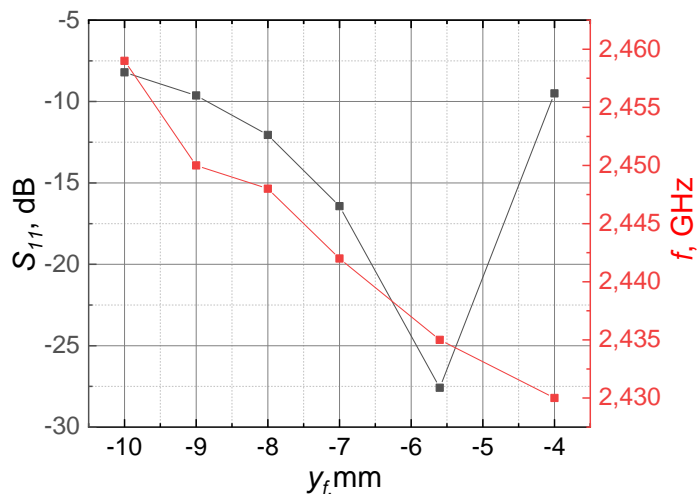
37 pav. Pirmosios ir antrosios antenos a) atspindžio (juoda kreivė) ir b) rezonansinio dažnio (raudona kreivė) priklausomybės nuo antenos padėklo storio.

2.1.4 Antenos savybių kitimo priklausomybė nuo koaksialinės jungties padėties

Pirmojoje antenoje koaksialinės jungties padėties perkėlimas toliau nuo antenos centro gali turėti įtakos rezonansiniam dažniui bei atspindžiui. Kuo toliau yra prijungiama nuo antenos centro koaksialinė jungtis, tuo vis mažiau ima sutapti jungties bei pačios antenos impedansai. Impedanso suderinimą galime atlikti žinodami sąryšį, kad impedansas $Z=U/I$ yra tiesiogiai proporcingas įtampai ir atvirkščiai proporcingas srovei ir turėdami omeny, kad tolstant nuo antenos krašto įtampa mažėja, o srovė didėja, galime teigti, jog antenos impedansas tolstant nuo krašto mažės, kol galiausiai galėsime suderinti su norimu koaksialinės jungties impedansu. Antenos impedansą galima apskaičiuoti remiantis tokia formule:

$$Z_{IN}(R) = \cos^2\left(\frac{\pi R}{L}\right) Z_{IN}(0) \quad (5)$$

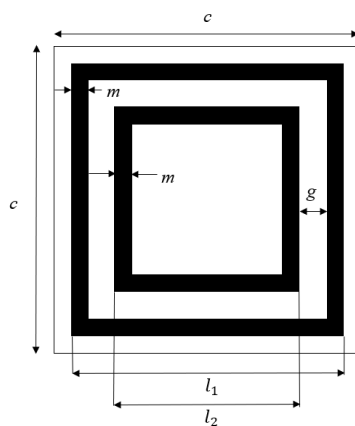
Čia $Z_{IN}(0)$ įėjimo impedansas, kai žadinimas yra antenos krašte, R – žadinimo vieta išreikšta per antenos aukštį L . 38 paveiksle pavaizduota, kad koaksialinės padėties tolinimas nuo centro lemia atspindžio didėjimą, tuo tarpu rezonansinis dažnis slenkasi aukštesnių dažnių link. Ties efektyviausia vieta, kuomet $y_f = -5,6$ mm, gauname atspindžio sumažėjimą, vadinasi toje vietoje esant koaksialinei jungčiai, antenos impedansas geriausiai sutampa su koaksialinės jungties impedansu.



38 pav. Pirmosios antenos atspindžio (juoda kreivė) ir rezonansinio dažnio (raudona kreivė) priklausomybė nuo koaksialinės jungties padėties y_f .

2.2 I-osios antenos metapaviršiaus modeliavimas

Modeliuojant metapaviršių pirmajai antenai, vienetinės celės atvaizdas, remiantis pasirinktu straipsniu, buvo atkartotas dviejų stačiakampių žiedelių – vieno didesnio ir antro viduje mažesnio, pavidalu (39 pav.).

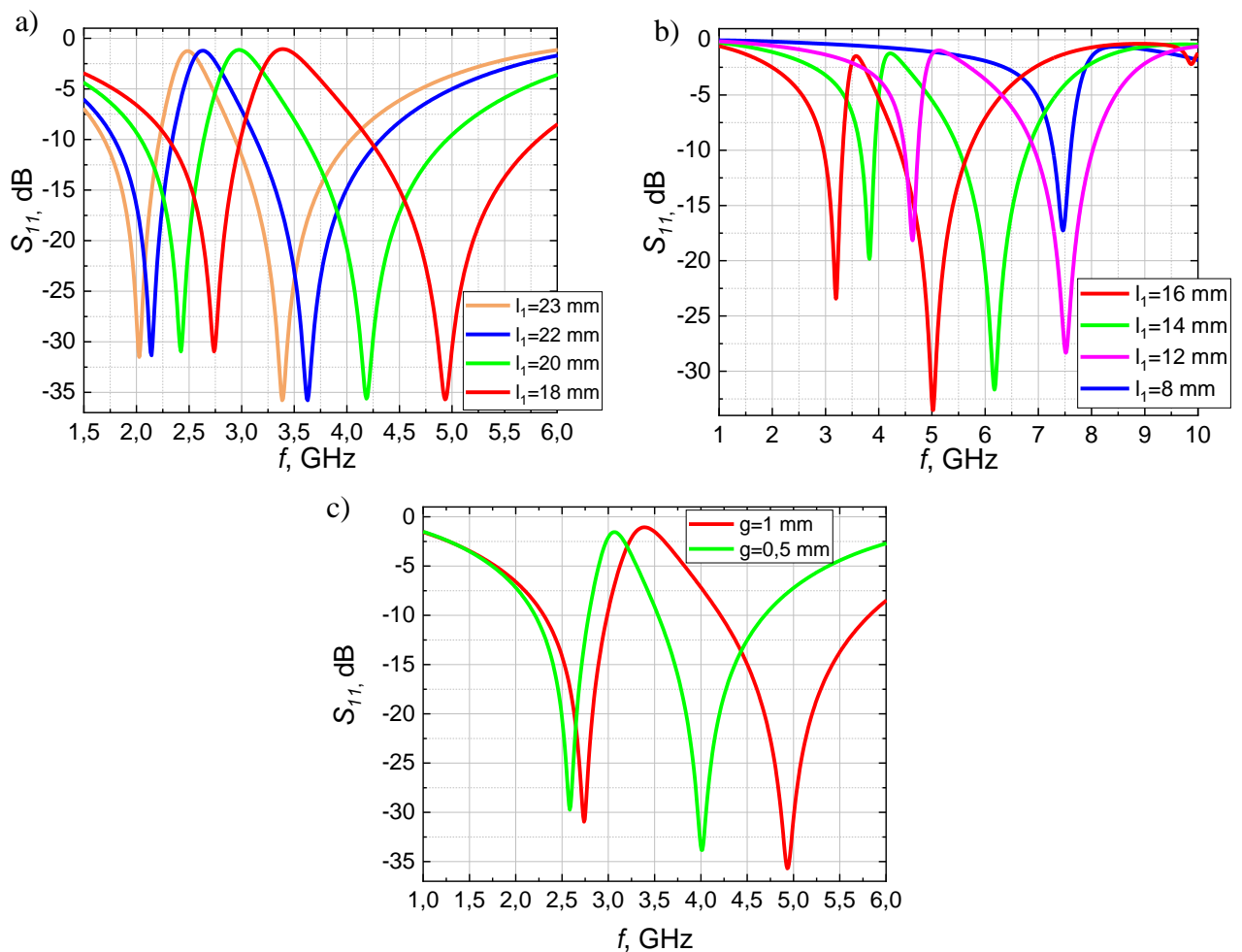


39 pav. Pirmosios antenos modeliuojamo metapaviršiaus vienetinė celė.

Atkartojus metapaviršių pagal straipsnį, kuriuo remiamasi pirmajai antenai, kai vienetinės celės matmenys $m = 1$ mm, $c = 20$ mm, $l_1 = 18$ mm, $l_2 = 16$ mm, $g = 1$ mm, stiprinimas ties 2,45 GHz gautas -5 dB, o atspindys -6 dB (mėlyna kreivė 41 pav. a, b). Pagal straipsnį stiprinimas turėjo siekti 9,16 dB, o atspindys -20 dB – gauta per didelė sugertis ir antenos stiprinimas nebuvo pagerintas, todėl šiek tiek teko pamodifikuoti rašto matmenis, kad metapaviršius galėtų rezonuoti kartu su mikrojuosteline antena ties 2,45 GHz ir pagerintų antenos savybes.

Kadangi rezultatas netenkino ir nesutapo su minėto straipsnio rezultatais, buvo iširta vienetinės metapaviršiaus celės S_{12} parametro (pralaidumo) priklausomybė nuo dažnio keičiant celės matmenis,

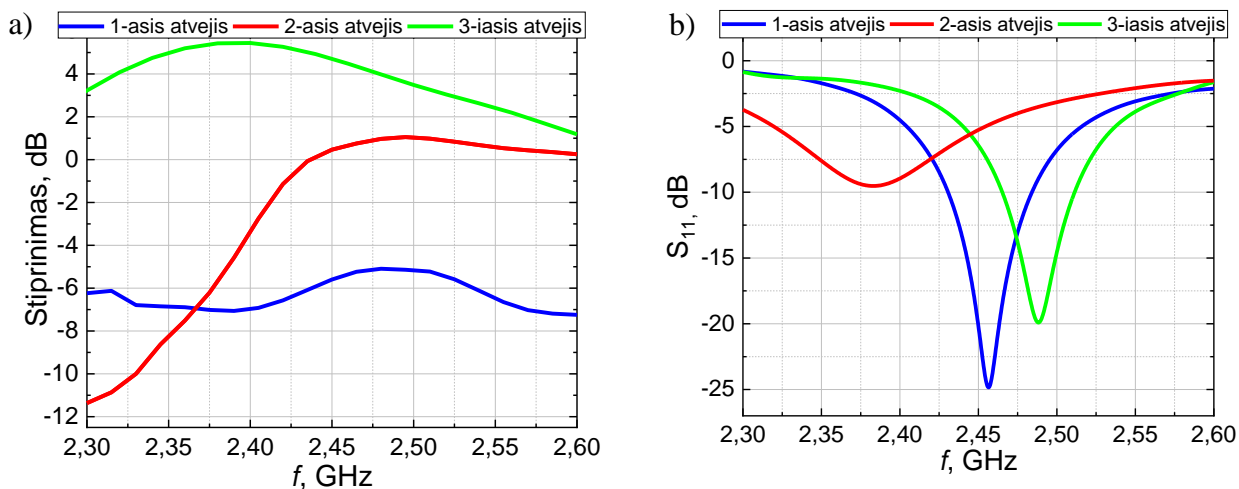
kad įsitikintume, ties kuriais dažniais metapaviršius geriausiai praleidžia spinduliuotę. 40 pav. a) dalyje pavaizduota kaip kinta vienetinės celės pralaidumas nuo rezonansinio dažnio esant skirtingiems l_1 , akivaizdu kad didėjant l_1 parametrai kreivės piko viršūnė slenkasi į kairę pusę ir ties 2,45 GHz geriausia pralaidumo vertę pasiekia oranžinės spalvos kreivė, kai vienetinės celės parametrai $m = 1$ mm, $c = 20$ mm, $l_1 = 23$ mm, $l_2 = 19$ mm, $g = 1$ mm. Taip pat ištirta, kad siauresnė metalizaciją g lemia pralaidumo priklausomybės slinkimąsi į mažesnių dažnių pusę (40 pav. c). Sumoduliuotus metapaviršių (antrasis variantas) pagal minėtus parametrus antenos stiprinimas gautas 0,5 dB o atspindys -20 dB. (raudona kreivė 41 pav. a, b).



40 pav. Vienetinės celės pralaidumo priklausomybės nuo dažnio a), b) skirtingoms l_1 ir c) skirtingoms metalizacijos pločio vertėms.

Kadangi rezultatai dar vis nėra tenkinantys, galiausiai trečiuoju atveju buvo stebėta, kaip kinta vienetinės celės pralaidumo priklausomybės nuo mažėjančios l_1 reikšmės (t.y. slenkant atspindžio priklausomybes į dešinę pusę). 40 pav. b) dalyje pavaizduota kaip kinta vienetinės celės pralaidumo priklausomybė mažinant l_1 vertes. Geriausia pralaidumo vertė (mėlyna kreivė) pasiekama, kai vienetinės celės parametrai $m = 0,5$ mm, $c = 9$ mm, $l_1 = 8$ mm, $l_2 = 6$ mm, $g = 1$ mm. Šiuo

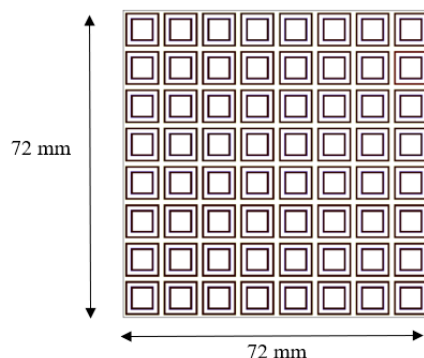
atveju sumodeliavus metapaviršių pagal šiuos parametrus antenos stiprinimas ženkliai išauga iki 5 dB, o atspindys sumažėja iki -9 dB ties 2,45 GHz dažniu (žalia kreivė 41 pav. a, b).



41 pav. Sumodeliuotų metapaviršių poveikis a) antenos stiprinimui ir b) antenos atspindžiui.

Modeliavimai atlikti, kai atstumas tarp metapaviršiaus ir antenos yra 10 mm.

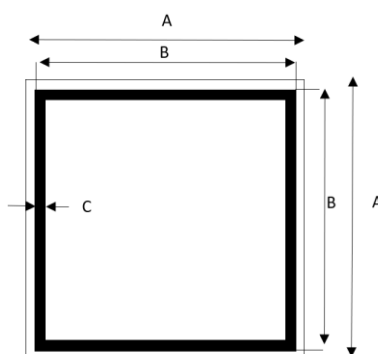
Atlikus šias modifikacijas I-ajai mikrojuostelinei antenai buvo pritaikytas 72×72 mm dydžio metapaviršius su išdėliotomis vienetinėmis celėmis matrica 8×8 (42 pav.).



42 pav. Pirmosios antenos sumodeliuotas metapaviršius

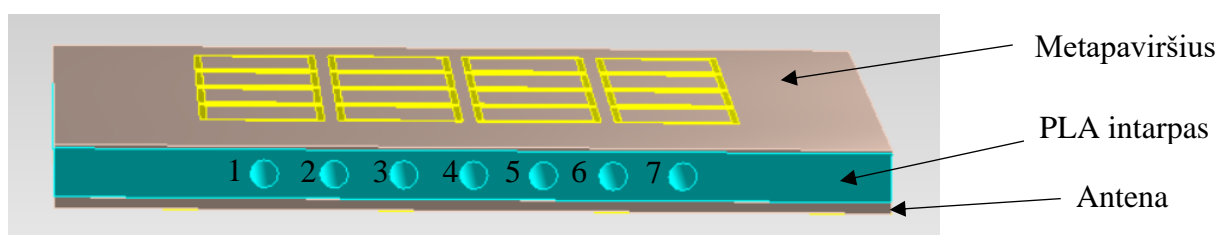
2.3 II-osios antenos metapaviršiaus modeliavimas

Antrosios antenos metapaviršiaus vienetinės celės atvaizdas atrodė viengubo stačiakampio žiedelio formos (43 pav.), modeliavimui pasirinkti parametrai $A=19$ mm, $B=18$ mm, $C=1$ mm.



43 pav. Antrosios antenos modeliuojamo metapaviršiaus vienetinė celė.

Svarbu paminėti, kad ši struktūra, skirtingai nei pirmoji, tarp metapaviršiaus ir antenos turi plastiko intarpą, kurio matmenys 120×120×7,1 mm. Ši detalė pagaminta iš PLA plastiko, kurio dielektrinė skvarba ~2,5. Intarpe išspausdintos septynios skylės, taip kaip parodyta 44 paveiksle. Skylių diametras yra 4 mm. Siekiant išgauti antenos spinduliavimo krypties pasisukimą, šios skylės bus užpildytos vandeniu, kurio dielektrinė skvarba svyruoja nuo 80 (0°C) iki 88 (20°C). Lyginant vandens dielektrinę skvarbą su metapaviršiaus, ji yra didesnė ~20 kartų. Elektromagnetinių bangų sklidimas yra pagrįstas Snelijaus dėsnium, kuris teigia, kad elektromagnetinės bangos yra linkusios pasirinkti kelią, kuriuo keliauti užtruks mažiau laiko, vadinasi kai antena yra nukreipta į aukštos dielektrinės konstantos medžiagą, pavyzdžiui, kaip šiuo atveju – vandenį, antenos spindulys praėjęs pro didesnės dielektrinės skvarbos terpę juda lėčiau, todėl banga yra nukreipiama ir tokiu būdu išgaunamas antenos spindulio sukimas.



44 pav. Antrosios antenos modelis iš šono.

Darbe bus ištirti trys antenos režimai, 1-asis, kuomet vandeniu yra užpildomi tik 1-2 kanalai, 2-asis režimas, kai visos skylės tuščios ir galiausiai 3-iasis režimas, kuris priešingas pirmajam – 6-7 vandens kanalai užpildyti, o visi kiti likę yra tušti (žr. 2 lent.).

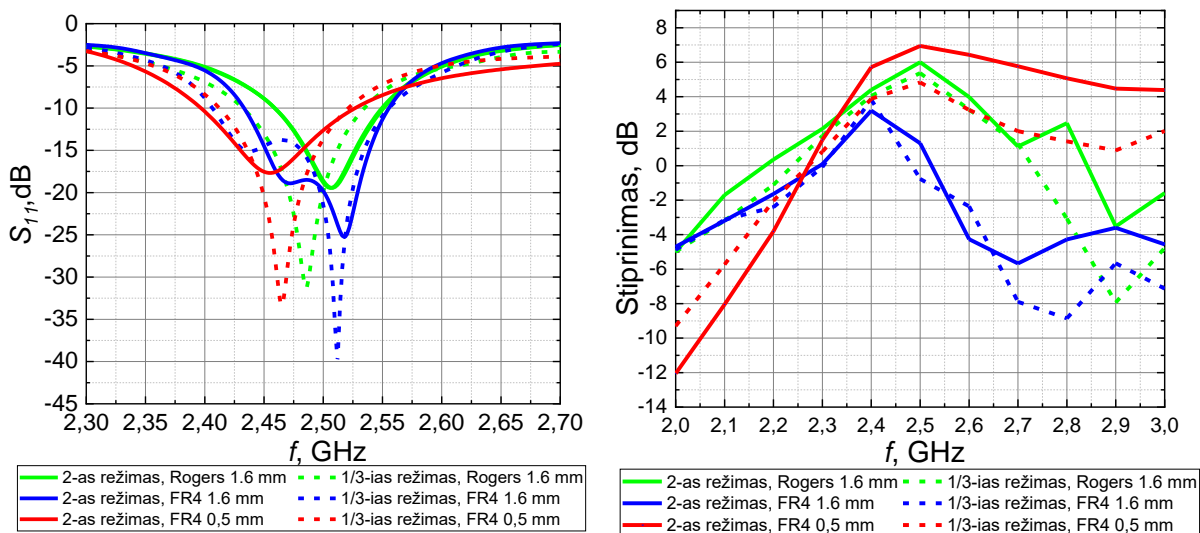
Kanalo numeris	1	2	3	4	5	6	7
1-as režimas	taip	taip	ne	ne	ne	ne	ne
2-as režimas	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
3-ias režimas	ne	ne	ne	ne	ne	taip	taip

2 lent. Antrosios antenos kartu su metapaviršiumi spindulio sukimo režimai

Pasirinktame straipsnyje, metapaviršiaus gamybai buvo naudojamas Rogers RO3003 padėklas, kurio dielektrinė skvarba $\epsilon=3$, o storis 1,6 mm. Ši medžiaga ypatinga tuo, kad jos tangentiniai nuostoliai yra labai maži ir siekia 0,0013. Kadangi tokią medžiagą antenos realizavimui sunku gauti (aukšta kaina ir ilgas pristatymo terminas), vienas iš pasirinkimų buvo permodeliuoti metapaviršių su lengvai prieinamu ir pigiu FR4 dielektriku. Žemiau pateiktose priklausomybėse matyti trijų modeliavimų rezultatai: a) kai metapaviršiui naudojamas Rogers RO3003 padėklas, kurio storis 1,6 mm, b) FR4 padėklas, kurio storis 1,6 mm ir galiausiai c) FR4 padėklas, kurio storis 0,5 mm.

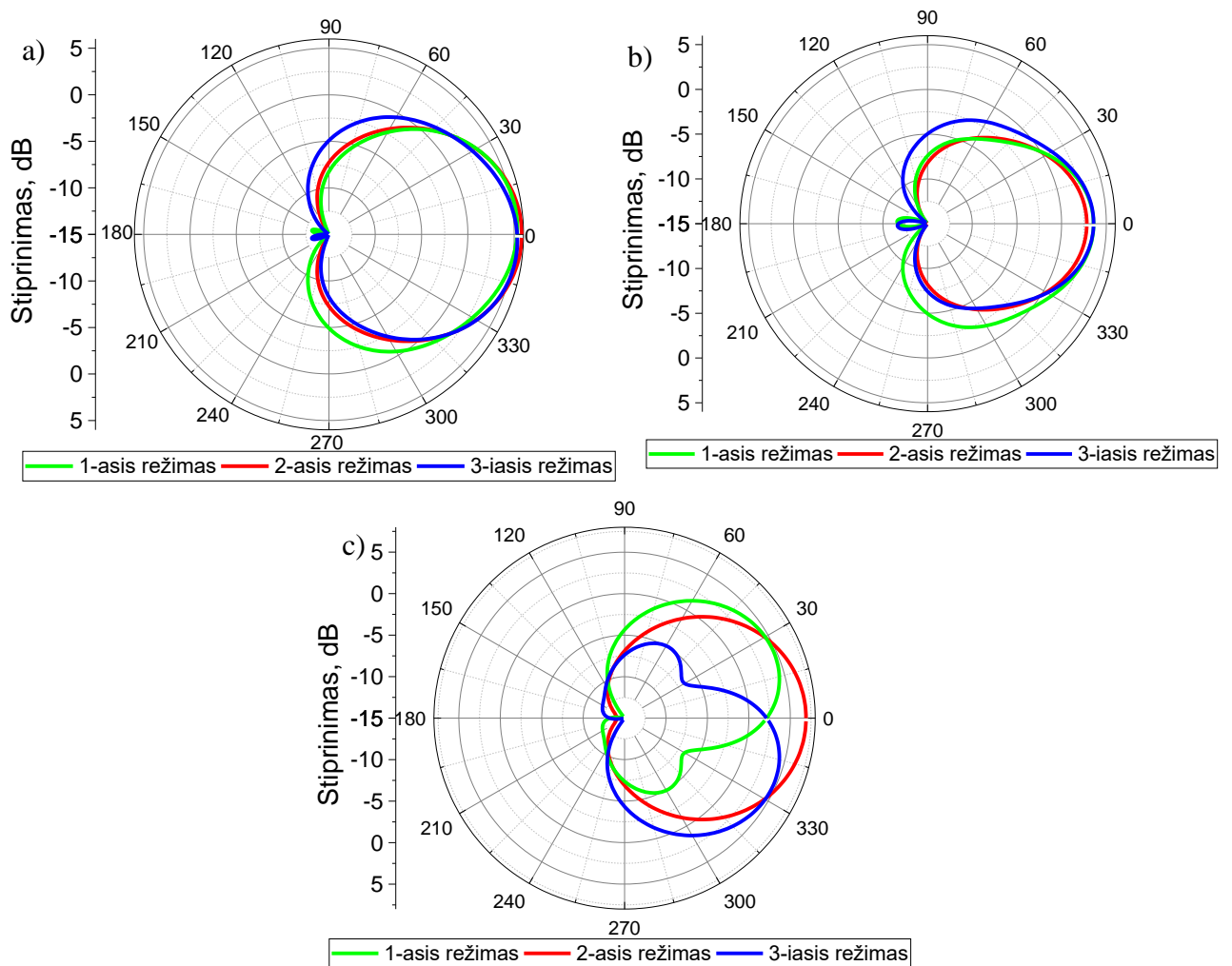
Tyrinėjant atspindžio kitimą nuo dažnio (45 pav. a), matyti, kuomet metapaviršius modeliuotas su FR4 padėklų, kurio storis 1,6 mm (mėlyna kreivė), visais trimis režimais išgaunamas mažiausias atspindys. Pirmam ir trečiam režimuose (mėlyna punktyrinė linija) atspindys siekia – 40,8 dB, o antruoju režimu (mėlyna vientisa linija) -25,12 dB. Tuo tarpu lyginant Rogers3003 (storis 1,6 mm)

kartu su FR4 (storis 0,5 mm), matyti, kad atspindžio vertės visais trimis režimais yra gana panašios Rogers3003 padėklo atveju, kuomet struktūroje nėra vandens (žalia vientisa linija) atspindys yra -19,5 dB, o su vandeniu (žalia punktyrinė linija) -31,3 dB. Atveju, kai padėklas yra 0,5 mm storio iš FR4 dielektriko, kai nėra vandens (raudona vientisa linija) atspindys siekia -17,86 dB, o su vandeniu (raudona punktyrinė linija) -33 dB. Pastebimas rezonansinio dažnio pasislinkimas į žemesnius dažnius pusę sumažinus FR4 padėklo storį. Antenos stiprinimo priklausomybėje nuo dažnio (45 pav. b), pastebima, kad metapaviršius modeliuojamo iš FR4 padėklo, kurio storis 0,5 mm stiprinimas ties 2,5 GHz, kai struktūroje nėra vandens siekia 7 dB (raudona vientisa linija), o kai yra vandens – 4,6 dB (raudona punktyrinė linija). Blogiausias stiprinimo rezultatas išgaunamas su 1,6 mm storio FR4 padėklu. Ties 2,3 GHz dažniu visais trimis režimais (mėlynos kreivės) stiprinimas siekia apie 3 dB, tuo tarpu su Rogers3003 padėklu (žalios kreivės) stiprinimas yra apie 5,5 dB ties 2,5 GHz.



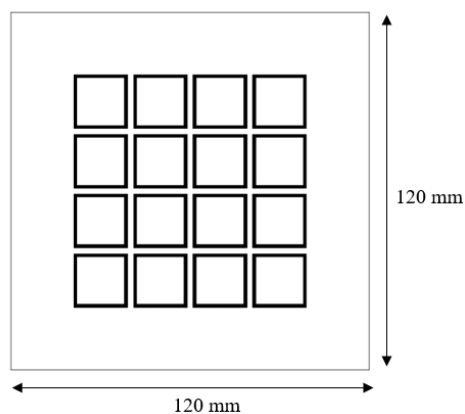
45 pav. Trijų struktūrų, kai kinta metapaviršiaus padėklo medžiaga ir storis, a) atspindžio ir b) stiprinimo priklausomybės nuo dažnio.

Ištirta, kaip visais trimis atvejais keičiasi spinduliavimo diagramos (46 pav.). Atveju, kai padėklas modeliuojamas su Rogers3003 medžiaga, kurios storis 1,6 mm, pagrindinė spinduliavimo kryptis yra 0° kampu, kryptis sutampa trimis režimais ir šiuo atveju spindulio sukimo vandens pagalba nepastebėta. Antruoju atveju, kai padėklo storis išlaikomas toks pat – 1,6 mm, bet pakeičiamas į FR4 dielektriką, spindulio sukimo taip pat nesimato – spinduliavimas vyksta 0° kampu. Tačiau atliekant modeliavimą su plonesniu FR4 dielektriku (46 pav. c) spinduliavimas, kuomet struktūroje nėra vandens vyksta 0° kampu, nes nėra vandens įtakos, o kuomet papildomi du kanalai (pirmasis režimas, žalia kreivė) spindulio pasukimas matomas ties 23° kampu, o antruoju režimu spindulio pasukimas matomas ties 337° kampu.



46 pav. Trijų struktūrų kryptinės stiprinimo priklausomybės, kai a) metapaviršius modeliuotas su Rogers3003 medžiaga, kurios storis 1,6 mm ties 2,5 GHz, b) FR4 1,6 mm ties 2,4 GHz ir c) FR4 kai storis 0,5 mm ties 2,5 GHz.

Pastebėtina tai, kad dėl struktūros simetrijos tiek atspindžio, tiek stiprinimo kreivės nuo dažnio sutampa 1-ojo ir 3-iojo režimo atvejais. Geriausią spinduliuko sukimą demonstruoja struktūra su metapaviršiumi, kurio pagrindas FR4, o jo storis 0,5 mm. Taigi, galiausiai priimtas sprendimas metapaviršiaus gamybai naudoti FR4 padėklą, kurio matmenys 120×120×0,5 mm (47 pav.).

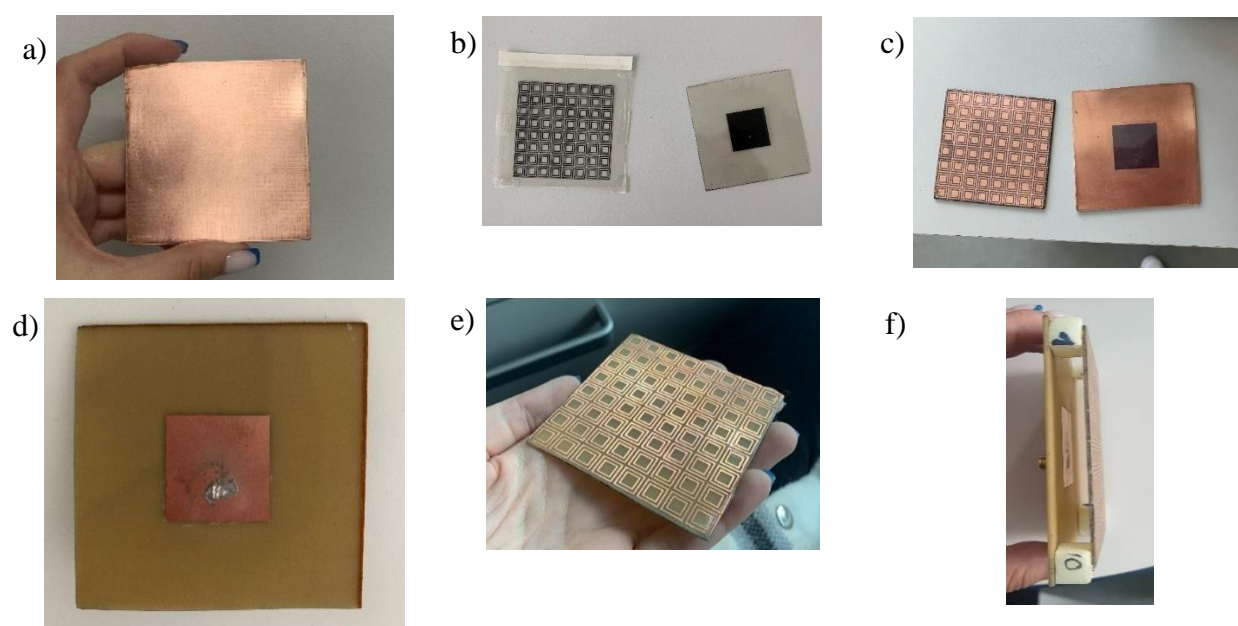


47 pav. Antrosios antenos sumodeliuotas metapaviršius

3. Bandinių paruošimas ir eksperimento metodika

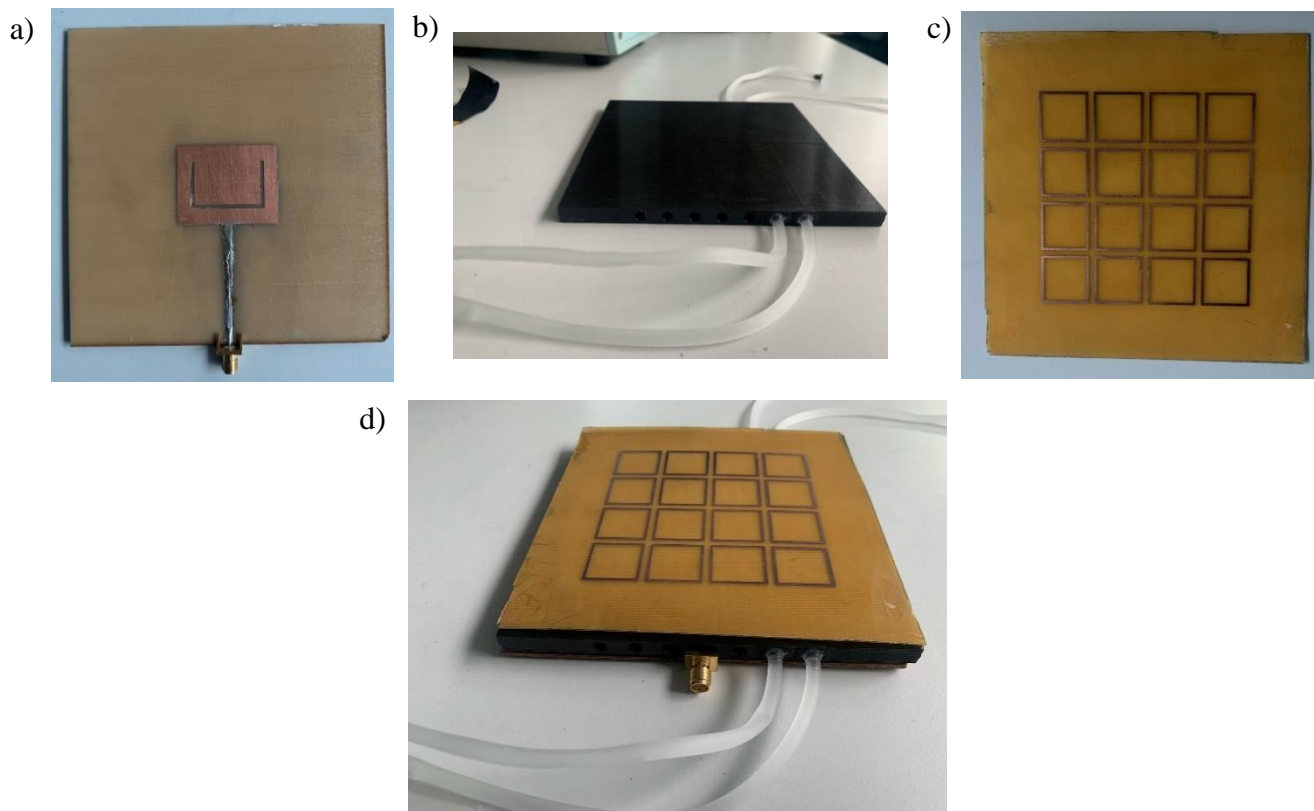
3.1. Bandinio paruošimas

Antenos gamybai pasiruosiame padėklą – siaurapjūklį išsipjauname reikiamus 80×80 mm ir 120×120 mm matmenų dydžio padėkliukus iš FR4 lakšto ir apdorojame metalizuotus paviršius su švelniu šlifavimo popieriumi bei spiritu, tam kad nebūtų nešvarumų, bei nelygumų, kurie gali turėti įtakos vėlesniame gamybos procese (48 pav. a). Šablonai su norimomis formomis yra atspausdinami ant skaidraus popieriaus (48 pav. b). Ant padėklo užpurškiame ploną, tolygų fotorezisto sluoksnį tamsioje patalpoje, nes fotorezistas yra jautrus įprastam apšvietimui. Svarbu padengti tolygiai, nes esant fotorezisto sankaupoms ar trūkumui sunku bus išgauti ryškias bei neišblukusias formas. Po padengimo fotorezistu, bandinį įdedame atkaitinimui ~50°C temperatūroje pusvalandžiui, kad fotorezistas polimerizuotųsi. Šablonus ant skaidraus popieriaus kartu su atkaitintu padėklu sulygiavus paliekame ultravioletinių spindulių apšvietai vienai minutei. Ultravioletinių spindulių apšvieta yra skirta tam, kad suaktyvinti tas fotorezisto vietas, kuriose metalizacija yra nereikalinga. Palaikius bandinį ultravioletinių spindulių apšvietoje, tolygiai teliuškuojant išplauname NaOH ryškale, kuris panaikina suaktyvintą fotorezistą – rezultate turėsime neapsaugotas fotorezistu dalis, kurias išsėdinsime FeCl₃ rūgštyje (48 pav. c), o tose vietose kur reikalinga metalizacija fotorezistas atliks apsaugos nuo išsėdinimo funkciją. Priklausomai nuo rūgšties stiprumo bandinį laikome panardintą apie vieną valandą. Galiausiai, gautus bandinius apvalome spiritu ir pašaliname fotorezisto likučius (48 pav. d, e). Mikrojuostelinės antenos antroje pusėje prilituojama koaksialinė jungtis. Pirmosios antenos atveju tarpikliai tarp metapaviršiaus ir mikrojuostelinės antenos išpjauti trijų skirtingų storių – 10 mm, 15 mm ir 20 mm iš medžiagos, kurios dielektrinė skvarba artima orui $\epsilon \sim 1$ (48 pav. f).



48 pav. I-osios antenos ir metapaviršiaus gamybos procesas.

Antrosios antenos gamybos procesas niekuo nesiskiria nuo pirmosios, tačiau jai papildomai 3D spausdintuvu buvo pagamintas PLA intarpas tarp metapaviršiaus ir antenos. Spausdinant intarpą, buvo pasirinktas maksimalus spausdinimo užpildymas, spausdinimo greitis 70 mm/s, spausdintuvo adatėlės diametras 0.4 mm, Z-rezoliucija nustatyta 20 μm , o X/Y – 400 μm . Vandens įleidimui paprastumo dėlei buvo prarastos vandens šlangelės (49 pav. b, d).



49 pav. II-osios antenos gamybos procesas.

3.2 Matavimo įranga

Matavimo schema pavaizduota 50 paveiksle. Matavimai atliekami beaidžiame kambaryje. Kambaryje su ypatingos formos kūgiais sugeriančiais elektromagnetines bangas patalpiname perdavimo anteną (51 pav. a) ir 2,08 metrų atstumu pastatome tiriamąją pagamintą mikrojuostelinę anteną be ir su metapaviršiumi atskiriems matavimams. Prie abiejų antenų prijungti galios matuokliai NRP Z55 (51 pav. b). Tiriamoji antena pastatyta ant sukimo mechanizmo su žingsniniu varikliuku. Svarbu antenas sulygiuoti, kad stovėtų tame pačiame aukštyje, lygiagrečiai tiek vertikaliai, tiek horizontaliai ir būtų tiesiai nukreiptos viena kitai. Antenų sulygiavimui pasitelkiame gulsčiuką, metrą bei lazerinį gulsčiuką. Už mikrobangų beaidės kameros ribų turime kompiuterį bei mikrobangų generatorių.

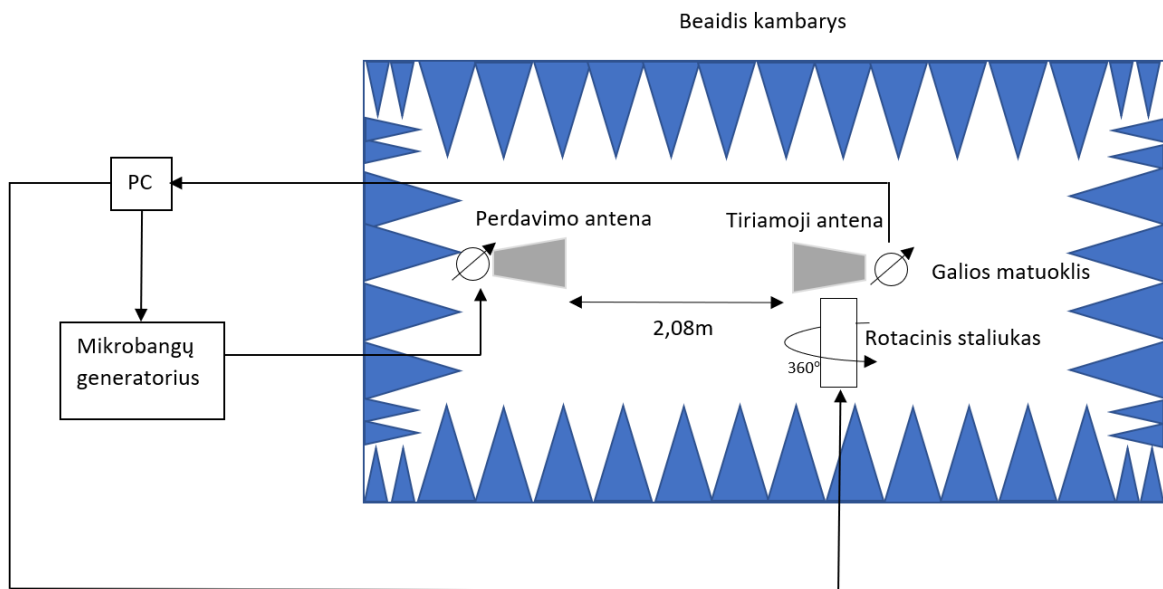
Galios matavimui pasitelkus mikrobangų generatorių spinduliuojame siunčiamas bangas, kurių galia yra ~ 20 dBm, o su tiriamosios antenos galios matuokliu priimame gautą informaciją, kuri yra

persiunčiama į kompiuterinę programą, rezultate turime galios pasiskirstymą nuo dažnio. Stiprinimą persiskaičiuojame pagal (6) formulę:

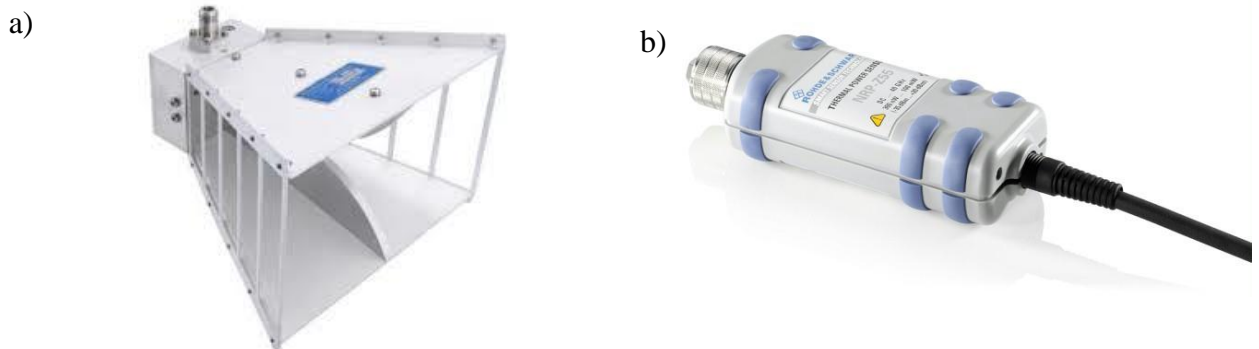
$$G_R = \frac{P_R}{P_T G_T} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

Čia G_R – tiriamosios antenos stiprinimas, P_R – mikrobangų galia, išmatuota su tiriamąja antena G_T – siunčiamosios antenos stiprinimas, P_T – mikrobangų galia, paduodama į siunčiamąją santeną, d – atstumas tarp antenų, λ – spinduliuojamųjų mikrobangų ilgis. Skaičiuojant tiriamosios antenos stiprinimą įvertiname kabelio nuostolius.

Kryptingumo matavimui, pasitelkiame panašią metodiką, kaip galios matavimui, tik pridėdame antenos sukimo mechanizmą, kuris yra valdomas kompiuterine programa ir matuojame galią esant įvairioms tiriamosios antenos padėtimis sukant ją 0° – 360° kampu (rotacijos žingsnis 5°).



50 pav. Galios matavimo schema.



51 pav. a) siunčiamoji „Broadband Horn“ antena ir b) galios matuokis NRP Z55.

Atspindžio matavimai atlikti naudojantis vektoriniu grandynų analizatoriumi, matavimai atlikti nuo 1,25 GHz iki 5 GHz dažnių ruože.

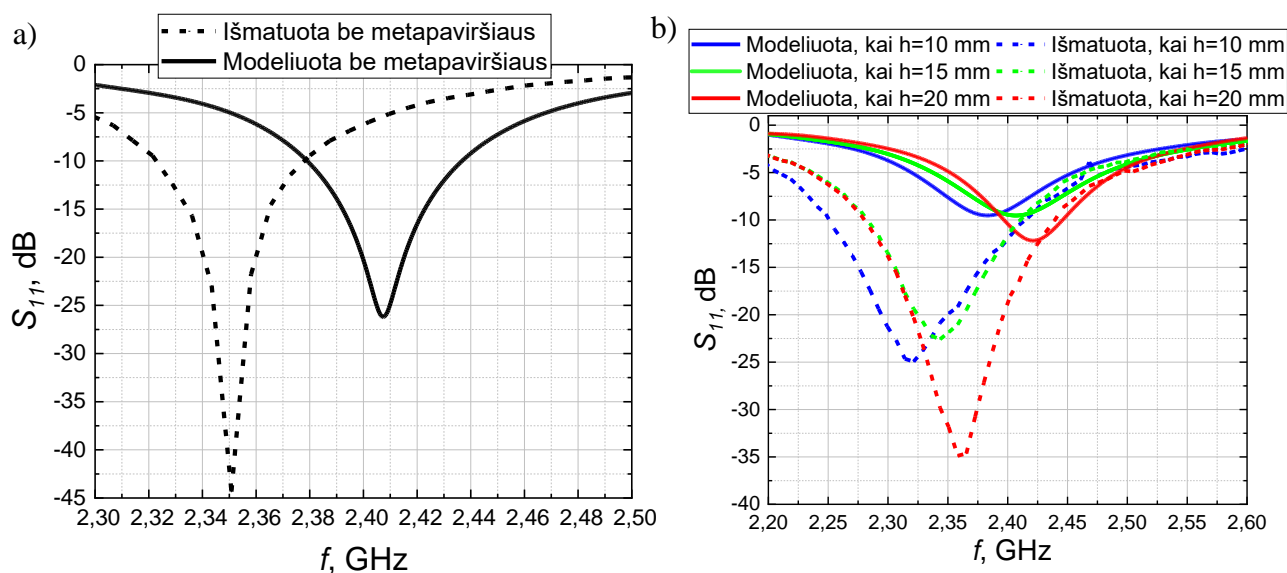
4. Matavimo rezultatai

4.1 I-osios antenos eksperimentiniai tyrimai

Sumodeliavus mikrojuostelinę anteną be metapaviršiaus (52 pav. a), atspindžio vertė ties 2,407 GHz yra -26,1 dB (juoda vientisa kreivė), tačiau realiai išmatavus pagamintą anteną, gavome rezonansinį žadinimą pasislinkusį link žemesnių dažnių srities – mažiausias atspindys nuo antenos stebimas esant 2,35 GHz dažniui. Atspindžio koeficientas realiai išmatuotos antenos gautas geresnis, nei sumodeliuotos, atspindžio vertė siekia -44,2 dB (juoda punktyrinė linija). Dažnių juostos plotis realiai išmatuotos antenos ties -10 dB yra siauresnis 4,5 %, lyginant su sumodeliuota.

Sumodeliavus mikrojuostelinės antenos kartu su metapaviršiaus konstrukcijas trimis skirtingais atstumais vienas nuo kito, gauname analogišką situaciją (52 pav. b) – realiai išmatuotos atspindžio vertės yra geresnės, nei sumodeliuotos ir pasislinkusios į žemesnių dažnių sritį. Stipriausias antenos žadinimas vyksta, kai atstumas tarp metapaviršiaus ir antenos yra 20 mm, $S_{11} = -34,8$ dB esant 2,36 GHz dažniui. Didžiausias dažnių juostos plotis ties -10 dB yra 0,164 GHz esant 10 mm atstumui tarp antenos ir metapaviršiaus, tai yra 3 kartus didesnis lyginant su antena be metapaviršiaus.

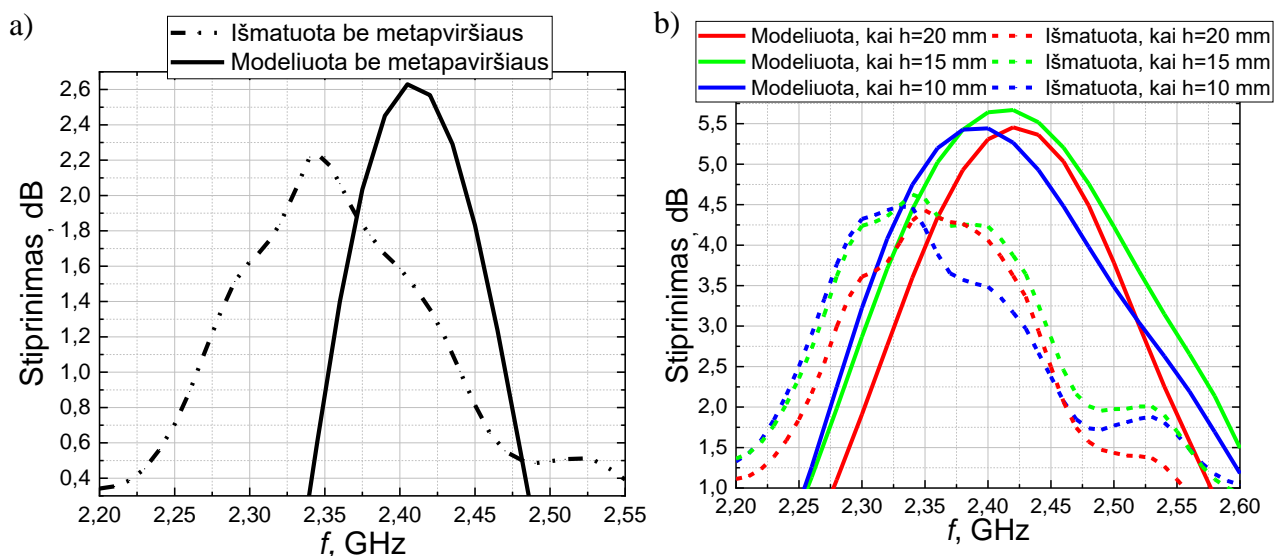
Modeliavimo nesutapimą su matavimo rezultatais galėjo lemti gamybos metu netiksliai apskaičiuota tikroji FR4 padėklo dielektrinės skvarbos vertė, matmenų netikslumai pjaunant padėklą ar ėsdinant elementus, nepakankamai geras matavimo tikslumas. Svarbu paminėti, kad net labai menkas 0.1 mm mikrojuostelinės antenos pločio ar ilgio sumažėjimas gali smarkiai paslinkti žadinimo dažnį.



52 pav. Sumodeluotos ir realiai išmatuotos pirmosios mikrojuostelinės antenos a) be metapaviršiaus ir b) su metapaviršiumi, atspindžio priklausomybės nuo rezonansinio dažnio esant skirtingais atstumais tarp antenos ir metapaviršiaus, palyginimas.

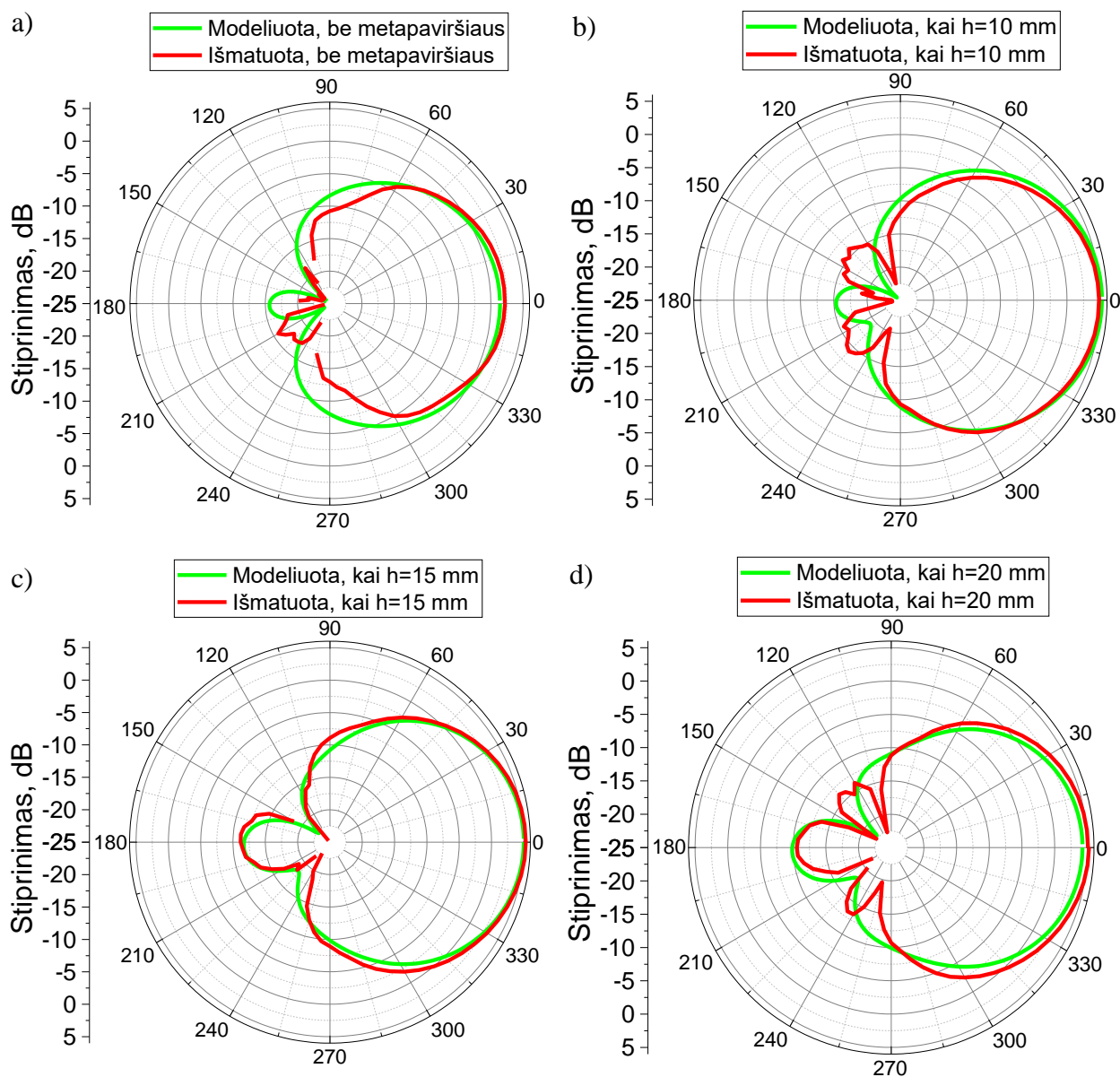
Sumodeliuotas antenos be metapaviršiaus stiprinimo priklausomybė nuo dažnio pavaizduota 53 pav. a) dalyje. Realiai išmatuotas mikrojuostelinės antenos stiprinimas gautas 0,4 dB mažesnis lyginant su sumodeliuotu stiprinimu. Pagamintos mikrojuostelinės antenos geriausias stiprinimas pasiekiamas ties 2,34 GHz. Realiai išmatuoto stiprinimo maksimali vertė yra pasislinkusi link žemesnių dažnių ruožo lyginant su sumodeliuota stiprinimo priklausomybe nuo dažnio.

Metapaviršiaus daroma įtaka antenai yra akivaizdi (53 pav. b) – stiprinimas padidėja 3 dB modeliavimo atveju ir 2,4 dB realiomis sąlygomis. Geriausi stiprinimo rezultatai gauti, kai tarpas tarp metapaviršiaus ir antenos yra 15 mm.



53 pav. Sumodeliuotos ir realiai išmatuotos mikrojuostelinės antenos a) be metapaviršiaus ir b) su metapaviršiumi, stiprinimo priklausomybės nuo rezonansinio dažnio esant skirtingais atstumais tarp antenos ir metapaviršiaus, palyginimas.

Pagal kryptines diagramas (54 pav.), matyti, kad antenos spinduliavimas vyksta viena kryptimi, antenos pozicijai kintat nuo 270° iki 90° . Kai antena yra nusiukusi spinduliavimas praktiškai nevyksta. Išmatavus kryptingumo priklausomybes nuo stiprinimo, akivaizdu, jog nepasuktos antenos 0° kampu stiprinimas su metapaviršiumi yra didesnis nei lyginant su antena be metapaviršiaus. Geriausios spinduliavimo charakteristikos 0° pozicijoje gautos, kai metapaviršiaus yra 15 mm atstumu nuo mikrojuostelinės antenos (54 pav. c). Lyginant anteną be ir su metapaviršiumi 15 mm atstumu stiprinimas padidėja 3,06 dB, vadinasi antenos spinduliavimo galia padidėja dviem kartais. Kuomet antena yra pasukta 45° kampu stiprinimas gerokai sumažėja ir spinduliuojamoji galia taip pat. Lyginant anteną be metapaviršiaus ir anteną su metapaviršiumi 15 mm atstumu, stiprinimas 45° pozicijoje padidėja 1,9 dB. Lyginant stiprinimą pagal antenos išstatymo kampą, taip pat akivaizdu, kad stiprinimas esant 0° pozicijoje yra 5 dB didesnis su metapaviršiumi 15 mm atstumu ir 4 dB be metapaviršiaus, nei lyginant su 45° pozicija.



54 pav. Kryptinės stiprinimo diagramos, žalia – modeliavimo rezultatai, raudona- realiai išmatuoti rezultatai sukant tiriamąją anteną 360° kampu a) kai antena be metapaviršiaus, b) kai atstumas tarp antenos ir metapaviršiaus 10 mm, c) 15 mm ir d) 20 mm.

Viena iš pagrindinių savybių yra spinduliavimo kampas, kuris aprašomas, kaip kampas, kai antenos stiprinimas sumažėja 3 dB. Visų keturių matavimo rezultatų duomenys pateikti 3-ioje lentelėje.

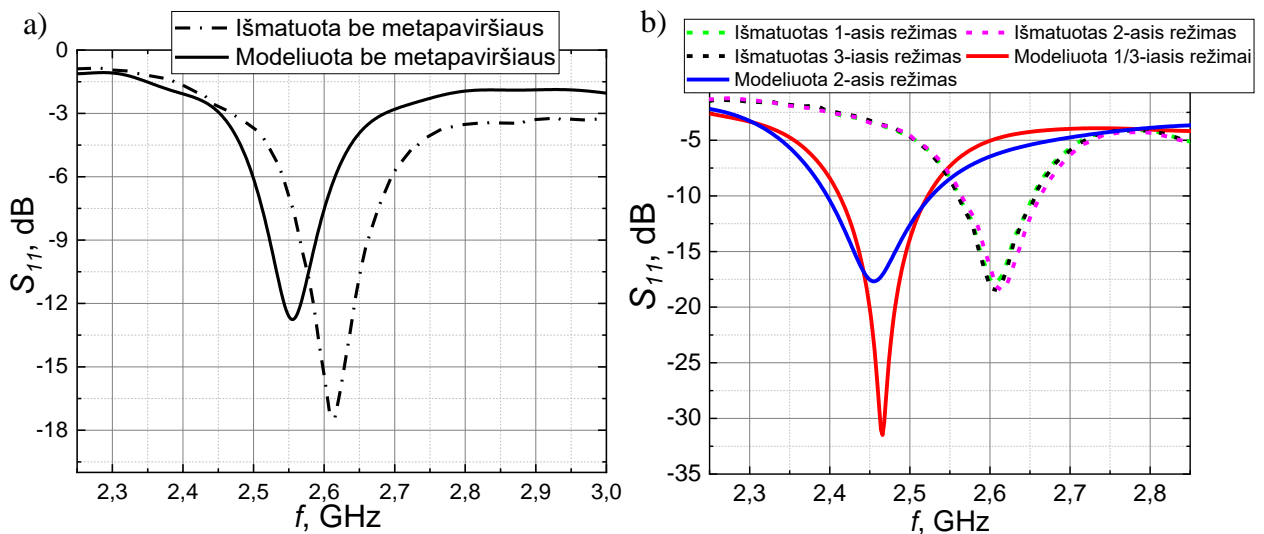
	Antena be metapaviršiaus	Atstumas 10 mm	Atstumas 15 mm	Atstumas 20 mm
Modeliuota	88,5°	72,5°	69,5°	67,5°
Išmatuota	65°	70°	68°	65°

3 lent. Antenų spinduliavimo kampas

4.2 II-osios antenos eksperimentiniai tyrimai

Sumodeliavus antrąją mikrojuostelinę anteną be metapaviršiaus (55 pav. a), atspindžio vertė ties 2,55 GHz yra -12,7 dB (juoda vientisa linija), o realiai išmatuotos antenos, rezonansinis žadinimas pasislinkęs aukštesnių dažnių srities link – mažiausias atspindys -17,5 dB nuo antenos stebimas esant 2,6 GHz dažniui (punktyrinė linija). Dažnių juostos plotis realiai išmatuotos antenos ties -10 dB yra platesnis 1,5 karto lyginant su sumodeliuota.

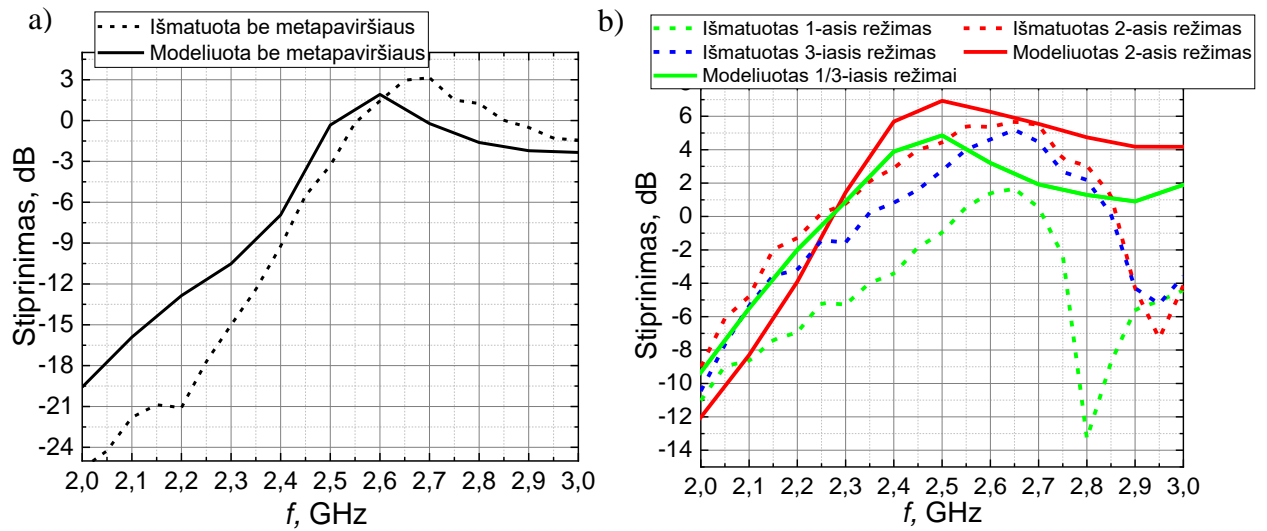
Iš mikrojuostelinės antenos kartu su metapaviršiaus trimis skirtingais režimais atspindžio priklausomybės nuo dažnio (55 pav. b) matyti, kad rezonansinis dažnis realiai išmatuotos (violetinė punktyrinė linija) antenos be vandens yra pasislinkęs aukštesnių dažnių link per 0,15 GHz lyginant su modeliuota (raudona vientisa linija). Abiejų matavimų atspindys panašus ir siekia apie -18 dB. Modeliuojant anteną su vandeniu (raudona vientisa linija) ir be vandens (mėlyna vientisa linija) pastebima, kad antena atspindi daugiau, kuomet visi vandens kanalai yra tušti. Išmatavus realiai anteną, visais trimis atvejais gautas panašus rezultatas – nepastebima, kad vandens pripildymas turi didelės įtakos antenos atspindžiui bei rezonansiniam dažniui. Visų realiai išmatuotų režimų rezonansinis dažnis yra ~2,6 GHz, o atspindys siekia ~-18 dB, šių matavimų dažnių juostos plotis yra taip pat panašus ir ties -10 dB yra 0,1 GHz.



55 pav. Sumodeluotos ir realiai išmatuotos mikrojuostelinės antenos a) be metapaviršiaus ir b) su metapaviršiumi, atspindžio priklausomybės nuo rezonansinio dažnio esant skirtingais režimais, palyginimas.

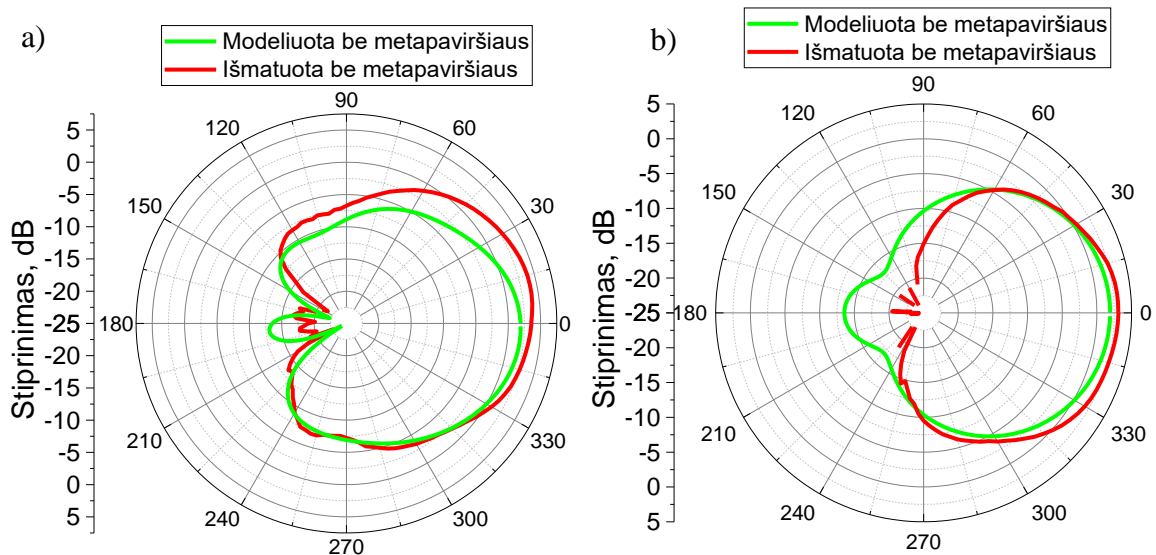
Sumodeliuotas ir realiai išmatuotas antenos be metapaviršiaus stiprinimo priklausomybė nuo dažnio pavaizduota 56 pav. a) dalyje. Realiai išmatuotos ir modeliuotos antenos stiprinimas ties 2,6 GHz yra panašus ir lygus 1,8 dB. Pagamintos mikrojuostelinės antenos geriausias stiprinimas pasiekiamas ties 2,7 GHz, stiprinimo maksimali vertė yra pasislinkusi 0,1 GHz link aukštesnių dažnių ruožo lyginant su sumodeliuota stiprinimo priklausomybe nuo dažnio.

Pridėjus prie antenos metapaviršių, stiprinimas smarkiai išauga (56 pav. b) – kai struktūroje nėra vandens (2-as režimas) antenos stiprinimas padidėja 4,2 dB modeliavimo atveju ir 2,4 dB realiomis sąlygomis ties 2,6 GHz, lyginant su antena be metapaviršiaus. Tuo tarpu kai į struktūrą yra patalpinamas vanduo, stiprinimas šiek tiek sumažėja. Modeliavimo atveju, stiprinimas ties 2,6 GHz nukrenta iki 3,2 dB, o realiomis sąlygomis išmatavus iki 1,4 dB (1-asis režimas) ir iki 4,6 dB (3-iasis režimas). Kadangi stiprinimas yra matuojamas, kai antena yra pasukta 0° kampu, šis stiprinimo sumažėjimas yra tikėtinas ir nulemtas to, kad pripylus vandens antenos spinduliavimo kryptis nusisuka.



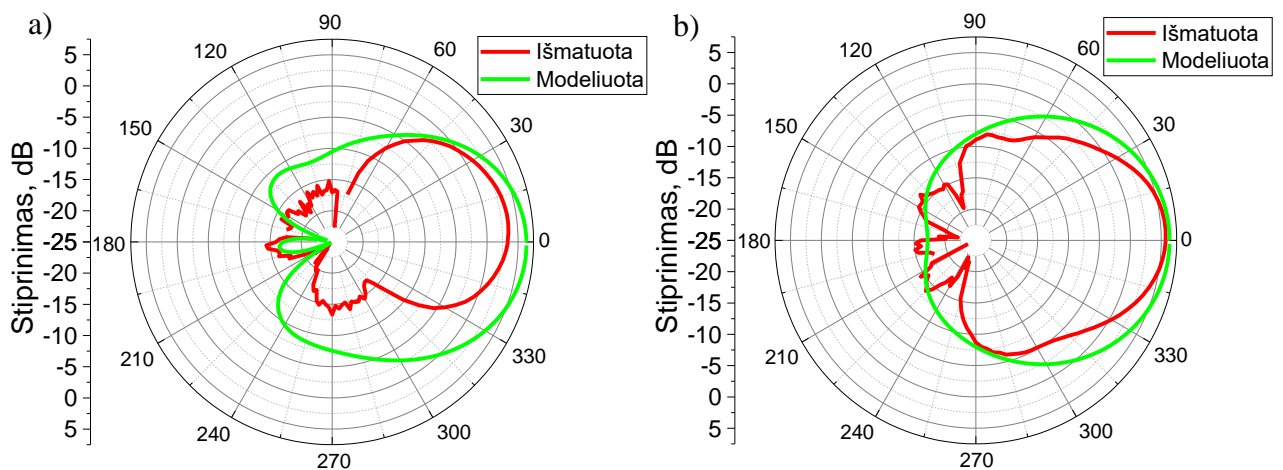
56 pav. Sumodeluotos ir realiai išmatuotos mikrojuostelinės antenos a) be metapaviršiaus ir b) su metapaviršiumi, stiprinimo priklausomybės nuo rezonansinio dažnio esant skirtingiems režimams, palyginimas.

Išmatuotos ir palygintos su modeliavimo rezultatais antenos be metapaviršiaus kryptinės stiprinimo diagramos pavaizduotos 57 pav. a) dalyje matavimai atlikti, kai tiriamoji ir perdavimo antenos stovi vertikaliai, o b) atveju – horizontaliai, tokiu būdu galima išmatuoti stiprinimo kampines priklausomybes dviejų sukimosi ašių atžvilgiu. 57 paveiksle matyti, kad antenos be metapaviršiaus spinduliavimas tiek modeliavimo atveju, tiek realiai išmatuotu vyksta 0° kampu.



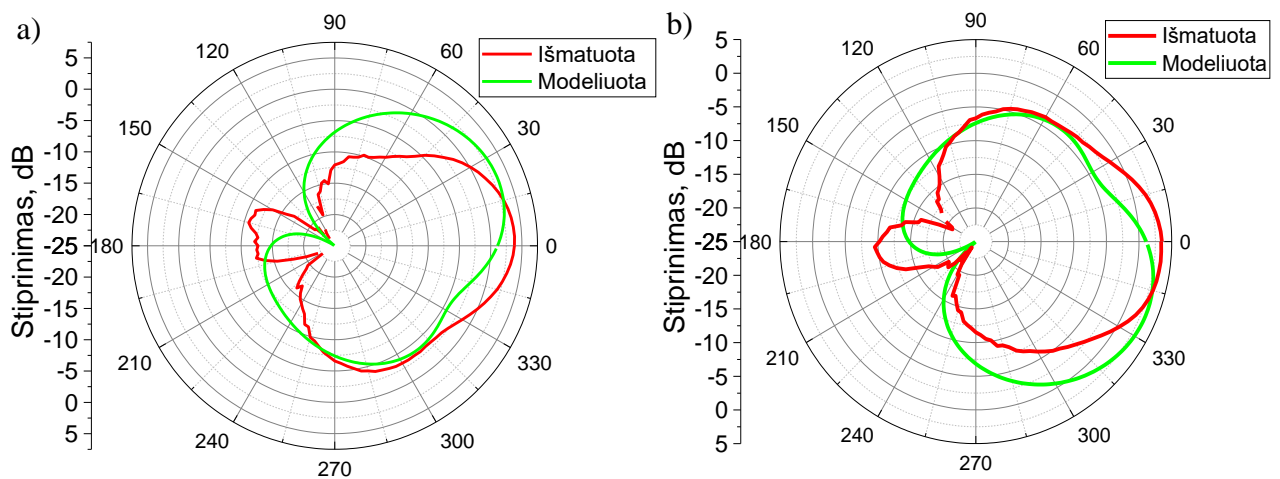
57 pav. Kryptinės stiprinimo diagramos, žalia – modeliavimo rezultatai, raudona- realiai išmatuoti rezultatai sukant tiriamąją anteną 360° kampu, kai antena be metapaviršiaus a) kai matuota horizontali ir b) vertikali poliarizacija esant 2,6 GHz dažniui.

Atliktas tyrimas, kaip kinta antenos kryptinės stiprinimo diagramos trimis režimais ir palyginta realiai išmatuoti rezultatai su teoriniais. Kuomet struktūroje nėra vandens spinduliavimo diagramos pateiktos 58 paveiksle skirtingomis poliarizacijomis. Pastebima, kad kai struktūroje nėra vandens spinduliavimas vyksta 0° kampu kaip ir buvo sumodeliuota.



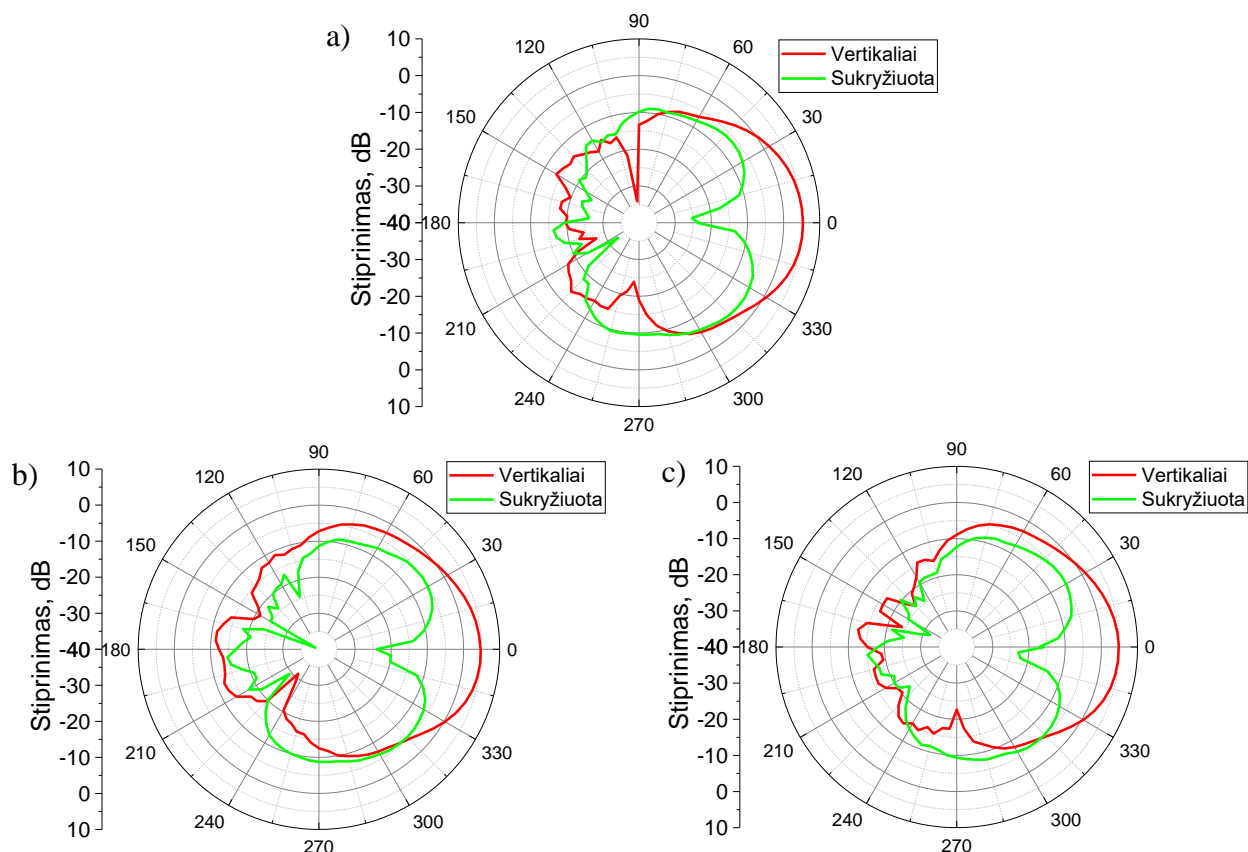
58 pav. Kryptinės stiprinimo diagramos, žalia – modeliavimo rezultatai, raudona- realiai išmatuoti rezultatai sukant tiriamąją anteną 360° kampu, esant 2-am režimui a) kai matuota horizontali ir b) vertikali poliarizacija esant 2,65 GHz dažniui.

Tuo tarpu ištyrus spinduliavimo diagramas, kuomet struktūroje yra vanduo (1-as ir 3-ias režimai), iš 59 paveikslo a) dalies matyti, kad pripildžius vandeniu modeliuojant gauta, kad spindulio krypties pasisukimas matomas 23° kampu, o realiai išmatuotos 6°. Analogiška situacija matoma ir trečiuoju režimu, tik pasisukimas modeliavimo atveju yra ties 337° kampu, o realiai išmatuotas spinduliavimas yra nukreiptas ties 354° kampu.



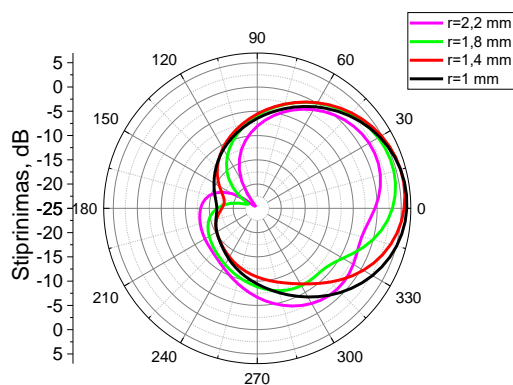
59 pav. Kryptinės stiprinimo diagramos, žalia – modeliavimo rezultatai, raudona- realiai išmatuoti rezultatai sukant tiriamąją anteną 360° kampu, esant a) 1-am režimui ir b) 3-iam režimui, 2,65 GHz.

Kadangi tyrimas nebuvo gerai pasisekęs, buvo panagrinėtos priežastys, kodėl nesimato didesnio, nei buvo modeliuota, antenos su metapaviršiumi spinduliavimo krypties pasisukimo, kai struktūroje yra vandens. Pirmiausiai buvo atliktas kryžminės poliarizacijos tyrimas, tiriamajai antenai esant vertikaloje pozicijoje, o perdavimo antenai horizontalioje. Šis tyrimas parodė, jog antenai esant vertikaloje pozicijoje matavimams neturėjo įtakos horizontalus spinduliavimas. Iš 60 pav. matyti, kad visais trimis atvejais, kuomet antena stovi vertikaliai stiprinimas 0° laipsniu kampu yra didžiausias, o tuo tarpu sukryžminus tiriamąją ir siuntimo antenas, matome jog spinduliavimas 0° visiškai nevykta, todėl galime teigti, kad pagamintai antenai visais veikimo režimais (be vandens ir su vandeniu) apskritiminė poliarizacija nesužadinama.



60 pav. Kryžminės poliarizacijos tyrimas a) kai struktūroje nėra vandens b) kai užpildyti du vandens kanalai ir c) kai užpildyti trys vandens kanalai.

Taip pat buvo panagrinėta dar viena priežastis, kodėl nesimato didesnio spindulio krypties pasisukimo. Kadangi realiomis sąlygomis pripilti vandens idealiai yra labai sunku buvo sumodeliuota, kaip kinta spinduliavimo kryptis keičiant vandens kanalų radiusą ir buvo pastebėta, kad menkas radiuso pakeitimas turi labai didelės įtakos spinduliavimo kryptim. Manoma, kad spausdinto intarpo kanalų radiusas turėtų būti šiek tiek didesnis nei 2 mm, norint išgauti dar didesnę spinduliavimo sukimąsi. 61 paveiksle matyti, kad kuomet radiusas yra nuo 1 iki 1,4 spinduliavimas vyksta 0° kampu, o didinant radiusą iki 2,4 mm, pagrindinė spinduliavimo kryptis nukreipta $\sim 30^\circ$ kampu.



61 pav. Modeliuota antenos kryptinė stiprinimo priklausomybė nuo kanalo radiuso, esant pirmajam režimui.

Išvados ir rezultatai

1. Atlikus modeliavimą, nustatyta, kad didinant mikrojuostelinės antenos plotį ir ilgį, didėja antenos atspindys ir rezonansinis dažnis slenkasi žemesnių dažnių srities link. Tai vyksta dėl to, kad padidinus antenos matmenis padidėja spinduliuojamų bangų ilgis, kuris yra atvirkščiai proporcingas rezonansiniam dažniui.
2. Išanalizavus, kaip keičiasi antenos rezonansinis dažnis ir atspindys nuo plyšinės antenos tarpelio pločio, buvo pastebėta, kad siaurėjant tarpeliui išgaunamas mažesnis antenos atspindys, o rezonansinis dažnis slenkasi žemesnių dažnių link, šiuos parametrų kitimus lemia geresnis antenos impedanso suderinimas.
3. Ištyrus kaip kinta rezonansinis dažnis bei atspindys nuo antenos padėklo storio, buvo pastebėta, kad didinant padėklo storį abiejų antenų atvejais rezonansinis dažnis išauga, o atspindys didėja. Šiuos pakitimus lemia didėjanti efektinė dielektrinė svarba, kuri yra atvirkščiai proporcinga rezonansiniam dažniui.
4. Eksperimentiškai išanalizavus mikrojuostelinės antenos stiprinimo priklausomybę nuo atstumo iki metapaviršiaus, parodyta, kad metapaviršiui esant 15 mm atstumu nuo mikrojuostelinės antenos stiprinimas padidėja 2,4 dB, lyginant su antena be metapaviršiaus.
5. Išanalizavus mikrojuostelinės antenos, valdomos vandeniui, kryptines priklausomybes, nustatyta, kad užpildžius vandeniui du kanalus, antenos spinduliavimo kryptis pasisuka 6 laipsniais. Antenos spinduliuojamų mikrobangų nukreipimas vyksta dėl vandens ir metapaviršiaus sąveikos.

Literatūros sąrašas

- [1] R. Kumar, M. Kumar, J. S. Chohan, and S. Kumar, “Overview on metamaterial: History, types and applications,” *Mater Today Proc*, vol. 56, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.423.
- [2] Y. Liu and X. Zhang, “Metamaterial,” *Encyclopedia Britannica*. 2016.
- [3] M. A. Qadeer Malik, “Smart Materials Vis-à-vis Metamaterials,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/908/1/012006.
- [4] N. I. Zheludev and Y. S. Kivshar, “From metamaterials to metadevices,” *Nature Materials*, vol. 11, no. 11. Nature Publishing Group, pp. 917–924, 2012. doi: 10.1038/nmat3431.
- [5] M. M. K. Shuvo *et al.*, “Polarization and angular insensitive bendable metamaterial absorber for UV to NIR range,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-08829-2.
- [6] K. Bi, Q. Wang, J. Xu, L. Chen, C. Lan, and M. Lei, “All-Dielectric Metamaterial Fabrication Techniques,” *Advanced Optical Materials*, vol. 9, no. 1. 2021. doi: 10.1002/adom.202001474.
- [7] P. S. Chindhi, G. B. Kalkhambkar, H. P. Rajani, and R. Khanai, “A Brief Survey on Metamaterial Antennas: Its Importance and Challenges,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-4625-6_41.
- [8] M. Kadic, G. W. Milton, M. Van Hecke, and M. Wegener, “3D Metamaterials.”
- [9] Y. Ranga, L. Matekovits, K. P. Esselle, and A. R. Weily, “Oblique incidence performance of UWB frequency selective surfaces for reflector applications,” in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2011. doi: 10.1109/APS.2011.5997206.
- [10] I. A. Buriak, V. O. Zhurba, G. S. Vorobjov, V. R. Kulizhko, O. K. Kononov, and O. Rybalko, “Metamaterials: Theory, classification and application strategies (review),” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 8, no. 4, 2016, doi: 10.21272/jnep.8(4(2)).04088.
- [11] W. Jan Krzysztofik and T. Nghia Cao, “Metamaterials in Application to Improve Antenna Parameters,” in *Metamaterials and Metasurfaces*, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80636.
- [12] J. D. Baena *et al.*, “Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 53, no. 4 II, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.845211.
- [13] B. Chowdhury, T. Walpita, B. Yang, and A. Eroglu, “Resonant characteristics of split ring resonator and unit cell for periodic metamaterial devices,” *Appl Comput Electromagn Soc J*, vol. 35, no. 11, 2020, doi: 10.47037/2020.ACES.J.351158.
- [14] H. Griguer, M. Drissi, E. Marzolf, H. Lalj, and F. Riouch, “Design and characterization of a tunable DNG metamaterial superstrate for small beam steering antennas,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 103, no. 3, 2011, doi: 10.1007/s00339-011-6252-0.

- [15] M. H. Ullah and M. T. Islam, "A new metasurface reflective structure for simultaneous enhancement of antenna bandwidth and gain," *Smart Mater Struct*, vol. 23, no. 8, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/8/085015.
- [16] M. Bouzouad, S. M. Chaker, D. Bensafeldine, and E. M. Laamari, "Gain enhancement with near-zero-index metamaterial superstrate," *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 121, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s00339-015-9206-0.
- [17] H. L. Zhu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Miniaturization of patch antenna using metasurface," *Microw Opt Technol Lett*, vol. 57, no. 9, 2015, doi: 10.1002/mop.29275.
- [18] "Beamforming & Beamsteering Antennas." Electronics-notes. <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/phased-array-antennas/phased-array-basics.php> (2022-11-14)
- [19] S. Nawaz, A. Ourir, A. de, and R. Yahiaoui, "Metasurfaces for High Directivity Antenna Applications," in *Metamaterial*, InTech, 2012. doi: 10.5772/35845.
- [20] M. Tan, F. Lin, Y. Feng, Y. Wang, and W. Zhang, "A Wide Beam Steering Antenna Based on Reconfigurable Metasurface," in *2022 IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/APCAP56600.2022.10070002.
- [21] W. Y. Zhou, Z. L. Mei, and M. Lu, "A Compact Quasi-Yagi Antenna with High Gain by Employing the Bent Arms and Split-Ring Resonators," *Int J Antennas Propag*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6666657.
- [22] S. Chaimool, T. Hongnara, C. Rakluea, P. Akkaraekthalin, and Y. Zhao, "Design of a pIN diode-based reconfigurable metasurface antenna for beam switching applications," *Int J Antennas Propag*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/7216324.
- [23] S. Chaimool, K. L. Chung, and P. Akkaraekthalin, "Bandwidth and gain enhancement of microstrip patch antennas using reflective metasurface," in *IEICE Transactions on Communications*, Institute of Electronics, Information and Communication, Engineers, IEICE, 2010, pp. 2496–2503. doi: 10.1587/transcom.E93.B.2496.
- [24] A. H. Naqvi and S. Lim, "A Beam-Steering Antenna with a Fluidically Programmable Metasurface," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 67, no. 6, pp. 3704–3711, Jun. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2905690.

Application of Metasurfaces to Radiation Control of Microwave Antennas

Summary

The use of metamaterials in the manufacture of antennas has number of advantages. With the help of metamaterials, we can reduce the dimensions of the antenna, also improve some parameters of antennas, such as gain, reflection, directivity, bandwidth, radiation direction. Metamaterials are artificially created composite materials, usually consisting of periodic sub-wavelength metallic and/or dielectric structures, which resonantly connect with the electric and magnetic fields of incident electromagnetic waves and acquire unusual electromagnetic properties not found in the natural environment. These materials due to their precise shape, geometry, size, orientation, and arrangement have special ability to manipulate electromagnetic waves: block, absorb, or bend.

The aim of this work is to theoretically and experimentally analyze the effect of the metasurface on the radiation and control of two microstrip antennas. Two metasurface antennas using photolithography method were fabricated and measurements have been performed. Measured results were compared with the theoretically calculated ones with CST Microwave Studio software.

The results of this work have shown that by increasing the width and length of the microstrip antenna increases the reflection of the antenna and shifts the resonant frequency towards the lower frequency range. This is due to the fact that increasing the dimensions of the antenna increases the length of the radiated waves, which is inversely proportional to the resonant frequency. Moreover, after analyzing how the resonant frequency and reflection of the antenna changes depending on the gap width of the slotted antenna, it was observed that as the gap narrows, a smaller antenna reflection is obtained, and the resonant frequency moves towards lower frequencies, these parameter variations are caused due to better antenna impedance matching. In addition, investigating how the resonant frequency and reflection change depending on the thickness of the antenna substrate, it was noticed that increasing the thickness in the case of both antennas the resonant frequency and the reflection increases. These changes are due to the increasing effective dielectric constant, which is inversely proportional to the resonant frequency. Also, after experimentally analyzing the dependence of the microstrip antenna gain on the distance to the metasurface, it is shown that when the metasurface is at a distance of 15 mm from the microstrip antenna, the gain is high and increases by 2.4 dB compared to the antenna without a metasurface. Furthermore, analyzing the directional dependences of the microstrip antenna controlled by water, it was found that when two channels are filled with water, the radiation direction of the antenna turns by 6 degrees. Direction change of microwaves radiated by the antenna occurs due to the interaction between water and the metasurface.