



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Justas Petkus

Projekto autorius

Doc. Pranas Kuzas

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Justas Petkus

Projekto autorius

Doc. Pranas Kuzas

Vadovas

Doc. Darius Kybartas

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Justas Petkus

Artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Justas Petkus

Patvirtinta elektroniniu būdu

Petkus Justas. Artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Pranas Kuzas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: belusčiai radijo žymekliai, RFID.

Kaunas, 2025. 45 p.

Santrauka

Šiame baigiamajame magistro darbe nagrinėjami artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodai, daugiausia dėmesio skiriant belusčių RFID žymeklių projektavimui ant FR-4 dielektriko pagrindo. Darbo tikslas yra išanalizuoti skirtingų žymeklių dizainų spektrinius parašus ir įvertinti geometrijos pokyčių įtaką jiems. Apžvalginė dalis apima literatūros analizę, kurios metu nustatyta, kad belustės RFID žymės yra alternatyva brūkšniniam kodams ir gali būti naudojamos objektų sekimui, kur yra reikalingas mažas informacijos kiekis (keli bitai) ir nėra prieinamas tiesioginis matymas. Taip pat apžvelgti galimi žymeklių formavimo būdai, jų nuskaitymo metodai ir elektrinės charakteristikos, iš kurių pasirinkti trys dizainai tolimesnei analizei – „U“ formos, žiedo formos ir perskirto žiedo formos dizainai suformuoti ant 1,6 mm FR-4 substrato. Metodinėje dalyje naudojant „CST Studio Suite“ atliktas pasirinktiems dizainams po tris geometrinių variantų S parametrų modeliavimas dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 10 GHz siekiant nustatyti jų spektrinius parašus. Sekančiame etape pagaminti prototipai ant FR-4 ir atlikti eksperimentiniai S parametrų matavimai 1 – 6 GHz diapazone naudojant vektorinį tinklo analizatorių „LiteVNA 64“, patvirtinę žiedo formos žymeklių išskiriamumą. Atlikus pasirinktų žymeklių spektrinio parašo rezonansinių dažnių artinimą, geriausias rezultatas gautas žiedo formos žymekliui, suartinus dažnius į diapazoną nuo 3 GHz iki 5 GHz. Taip pat atliktas FR-4 substrato dielektrinės skvarbos variacijos per 10 % modeliavimas kuris parodė rezonansinių dažnių poslinkį iki 180 MHz.

Petkus Justas. Research of Near-field Radio Tag Design Methods in Gigahertz Range. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Pranas Kuzas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Science.

Keywords: chipless tag, RFID.

Kaunas, 2025. 45 p.

Summary

This master's thesis examines methods for the fabrication of passive near-field radio tags operating in the gigahertz range, with a particular focus on the design of chipless RFID tags on an FR-4 substrate. The aim of the work is to analyze the spectral signatures of various tag geometries and to assess how changes in geometry affect those signatures. The introductory review covers the state of the art in the literature, revealing that chipless RFID tags offer an alternative to barcodes for tracking items when only a small amount of information (a few bits) is required and a direct line of sight is unavailable. It also surveys possible tag fabrication techniques, reading methods, and electrical characteristics, from which three designs were selected for further study: U-shaped, ring-shaped, and split-ring geometries, all implemented on 1.6 mm-thick FR-4 substrate. In the methodological section, three geometric variants of each chosen design were modeled in CST Studio Suite to simulate their S-parameters over the 1 GHz to 10 GHz frequency range and thereby determine their spectral signatures. In the next phase, prototypes were fabricated on FR-4 and their S-parameters were measured experimentally from 1 GHz to 6 GHz using a LiteVNA 64 vector network analyzer, confirming that ring-shaped tags afford the greatest spectral distinguishability. After refining the resonant frequencies of the selected tags, the ring design yielded the best performance when its resonances were clustered in the 3 GHz to 5 GHz band. Finally, a $\pm 10\%$ variation in the dielectric constant of the FR-4 substrate was modeled, showing a corresponding resonant-frequency shift of up to 180 MHz.

Turinys

Santrumpų ir terminų sąrašas.....	7
Įvadas	8
1. Apžvalginė dalis.....	9
1.1. Objektų sekimo poreikis ir svarba	9
1.2. RFID technologija.....	10
1.3. Lusto nenaudojančios RFID žymės	12
1.4. Metamedžiagų pritaikymas belusčių žymių projektavime	14
1.5. Belusčių žymių rezonatorių dizainų tipai	15
2. Metodinė ir eksperimentinė dalis	20
2.1. Žymeklių charakteristikų modeliavimas	22
2.1.1. „U“ formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas	23
2.1.2. Žiedo formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas.....	25
2.1.3. Perskirta žiedo formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas.....	28
2.2. Žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas	31
2.2.1. Žiedo formos žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas	32
2.2.2. Perskirta žiedo formos žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas .	34
2.3. Žymeklių spektrinių parašų rezonansų artinimo galimybės	36
2.4. Substrato dielektrinės skvarbos nuokrypio įtaka pasirinktų dizainų žymeklių spektriniams parašams	39
2.5. Žiedo formos žymeklio tvirtinimo pagrindo įtaka spektriniam parašui	40
2.6. Metodinės dalies apibendrinimas.....	41
Išvados	42
Literatūros sąrašas.....	43
Priedai	45
1 priedas. TiFEC studentų mokslinės konferencijos dalyvavimo sertifikatas	45

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

RFID – radijo dažnio atpažinimo technologija (angl. *Radio Frequency Identification*);

ASIC – specifinio pritaikymo integrinis lustas (angl. *Application Specific Integrated Circuit*);

RF – radijo dažniai;

LF – žemi dažniai;

HF – aukšti dažniai;

UHF – ultra aukšti dažniai;

EM – elektromagnetinis;

QR – greito atsakymo kodas (angl. *Quick Response Code*).

Ivadas

Šiuolaikinėje ekonomikoje, tiekimo grandinių, logistikos, pramonės, mažmeninės prekybos, sveikatos apsaugos, gamybos ir kitose srityse efektyvus objektų sekimas yra būtinas. Augant prekių ir paslaugų srautams bet kurioje srityje, gebėjimas tiksliai žinoti objektų buvimo vietą ir būseną tampa kritiniu veiksmu siekiant užtikrinti efektyvų resursų valdymą ir operacijų sklandumą. Tikslus sekimas leidžia optimizuoti sandėliavimą, mažinti nuostolius ir greitai reaguoti į tiekimo sutrikimus.

RFID (angl. *Radio Frequency Identification*) yra technologija, leidžianti bevielio būdu identifikuoti ir sekti objektus, tokius kaip žmonės, gyvūnai, transporto priemonės ar kiti daiktai. Ši technologija plačiai naudojama pramonėje, logistikoje, tiekimo grandinės valdyme, sveikatos apsaugoje, apsaugos sistemose bei kitose srityse. RFID plėtra glaudžiai susijusi su naujausiomis pasaulinėmis tendencijomis, tokiomis kaip Pramonė 5.0 ir 6.0, kur automatizacija, daiktų internetas ir dirbtinis intelektas užtikrina efektyvesnį duomenų valdymą bei optimizuotas operacijas.

Egzistuoja keli RFID žymeklių tipai: aktyvūs, pusiau aktyvūs ir pasyvūs. Pasyvūs žymekliai neturi vidinio energijos šaltinio, o energiją gauna iš nuskaitymo įrenginio radijo bangų. Dėl to jie yra pigesni, kompaktiškesni ir lengviau integruojami į aplinką. Taip pat, atsižvelgiant į „Žaliojo kurso“ kryptis, pasyvūs žymekliai gali būti gaminami iš biologiškai skaidių medžiagų, taip prisidedant prie aplinkos tausojimo.

Belustės RFID technologijos plėtra kai kuriais atvejais leidžia sumažinti žymeklių kainą, kas svarbu masinei rinkai. Tokie žymekliai gali būti naudojami situacijose, kur informacijos kiekis žymėje yra minimalus ir užtenka vien identifikacijos, pavyzdžiui, logistikoje ar prekių tiekimo grandinėse. Lyginant su brūkšninių kodų ir QR kodų sistemomis, RFID siūlo spartesnę ir efektyvesnę duomenų nuskaitymą, nes nereikalauja tiesioginio matavimo ir gali identifikuoti kelis objektus vienu metu.

Šiame darbe nagrinėjami artimojo lauko gigahercinio diapazono pasyviųjų radijo žymeklių formavimo metodai, skiriant dėmesį RF struktūros projektavimui ant FR-4 dielektriko pagrindo. Analizuojamos formavimo metodų struktūros pritaikymo galimybės, elektrinės charakteristikos bei įvertinama geometrinių parametrų įtaka pritaikymui.

Darbo tikslas – ištirti artimojo lauko gigahercinio diapazono radijo žymeklių formavimo ant FR-4 dielektriko metodus ir žymės išskiriamumo elektrinius parametrus.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti inžinerinės-technologinės ir mokslinės literatūros analizę, įvertinant radijo žymeklių technologijas, parametrus ir realizavimo metodus;
2. nustatyti antenų ir žymeklių aukštadažnių sprendimų parametrus, atlikti jų modeliavimą „CST Studio Suite“ aplinkoje;
3. parengti eksperimentinę tyrimų bazę: nustatyti matavimo aparatūros galimybes, identifikuoti matuojamus parametrus, suprojektuoti ir pagaminti eksperimentinius objektus;
4. atlikti eksperimentinius tyrimus su paruoštais prototipais, surinkti matavimo duomenis, juos išanalizuoti naudojant specializuotą programinę įrangą („Matlab“ ir kt.);
5. įvertinti pasyviosios žymeklio dalies geometrinių parametrų įtaką spektriniam parašui.

1. Apžvalginė dalis

Šiuolaikinėse tiekimo, logistikos, sveikatos priežiūros ir gamybos srityse vis dažniau išryškėja poreikis efektyviam ir patikimam objektų sekimui. Viena pagrindinių tam naudojamų technologijų yra radijo dažnio atpažinimas (RFID), leidžiantis automatiškai identifikuoti objektus be tiesioginio kontakto ir regimojo lauko. Pastaruoju metu vis daugiau dėmesio skiriama belustėms RFID žymėms, kurios dėl žemos kainos ir paprastos konstrukcijos leidžia sekti itin plačius objektų kiekius.

Šiame skyriuje apžvelgiami objektų sekimo poreikio aspektai, RFID technologijos pagrindai, belustės RFID žymės, jų informacijos kodavimo metodai ir nuskaitymo principai, sudarant teorinį pagrindą tolimesnei darbo analizei.

1.1. Objektų sekimo poreikis ir svarba

Pastaraisiais dešimtmečiais globali logistika ir tiekimo grandinės tapo itin sudėtingos ir išskaidytos: Pasaulio prekybos organizacijos (PPO) duomenimis, 80 % pasaulinės prekybos apimtys šiandien sudaro tarpvalstybinės tiekimo grandinės [1]. Dėl šios priežasties kyla būtinybė realiu laiku stebėti prekių, žaliavų ir produktų judėjimą, siekiant užtikrinti sklandų tiekimą, optimizuoti atsargas bei sumažinti rizikas.

Tiekimo grandinių skaidrumas ir matomumas yra pripažįstami kaip vieni svarbiausių konkurencingos tiekimo grandinės atributų. Leidinyje „Digital Supply Chain Transformation: Emerging Technologies for Sustainable Growth (2022)“ pažymima, kad šių savybių trūkumas lemia ilgesnius procesų ciklus, mažesnį tiekimo grandinės lankstumą bei prastą prisitaikymą prie rinkos pokyčių [2]. Šią problemą atspindi ir naujausi tyrimai: remiantis IHL Group ataskaita, 2023 metais pasauliniai inventoriaus iškraipymai (dėl prekių trūkumo, perteklinių atsargų ir kitų netikslumų) mažmeninės prekybos sektoriuje pasiekė 1,77 trilijono JAV dolerių, o tai viršija visą Lotynų Amerikos mažmeninės prekybos BVP [3]. Tai pabrėžia, kad efektyvus objektų sekimas ir tiksli duomenų valdymo sistema yra būtina ne tik veiklos efektyvumui didinti, bet ir finansiniams nuostoliams mažinti.

Efektyvus objektų sekimas leidžia organizacijoms ne tik sumažinti finansinius nuostolius, bet ir greičiau prisitaikyti prie kintančių rinkos sąlygų bei augančių vartotojų lūkesčių. Automatizuotas ir patikimas sekimas realiuoju laiku tampa esminiu veiksnio diegiant pažangias logistikos, gamybos ir tiekimo grandinių valdymo sistemas. Be to, efektyvus duomenų apie prekių judėjimą rinkimas ir analizė suteikia galimybę prognozuoti paklausą, gerinti tiekimo planavimą, optimizuoti atsargas ir didinti bendrą tiekimo grandinių tvarumą.

Šiuolaikinėse sistemose vis dažniau diegiamos technologijos, leidžiančios automatizuoti identifikavimą ir stebėjimą be tiesioginio žmogaus įsikišimo. Tarp tokių sprendimų yra radijo dažnio identifikavimo (RFID) sistemos, brūkšniniai kodai, dvimačiai (QR) kodai. Belustės (angl. *Chipless*) RFID technologijos jau ilgą laiką yra laikomos patrauklia alternatyva siekiant ekonomiškai ir patikimai objektų sekimo. Pastaraisiais metais, tobulėjant gamybos technologijoms ir skaitymo įrenginiams, šios sistemos sulaukia vis didesnio dėmesio kaip realiai pritaikomas sprendimas. Jos leidžia pasiekti didesnę procesų efektyvumą, sumažinti klaidų tikimybę ir užtikrinti tikslią bei savalaikę informaciją apie objektų buvimą vietą, būklę ir judėjimą.

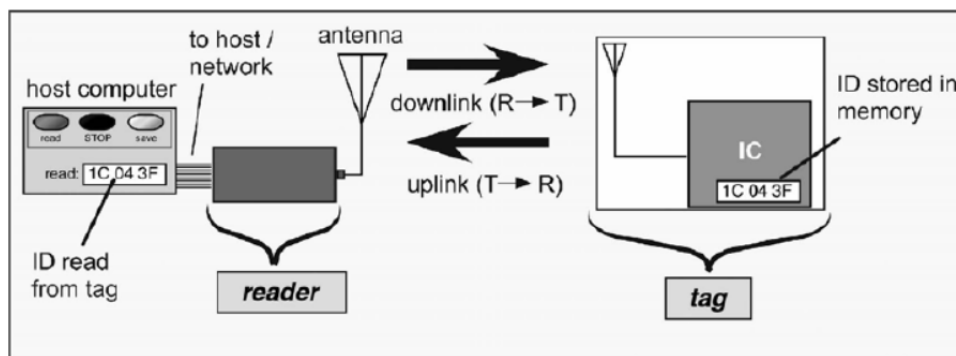
Atsižvelgiant į vis didėjantį poreikį sekti didelius objektų kiekius ekonomiškai efektyviai ir tvariai būdu yra būtina ieškoti inovatyvių sprendimų, galinčių patenkinti šiuos reikalavimus. Viena iš tokių galimų kryptų yra belusčių RFID technologijų plėtra ir taikymas, siekiant užtikrinti patikimą, pigų ir aplinkai draugišką objektų sekimą įvairiuose sektoriuose.

1.2. RFID technologija

RFID technologija turi galias istorines šaknis – pirmieji jos prototipai atsirado Antrojo pasaulinio karo metais, kai buvo naudojami aviacijoje prieš ir savų lėktuvams atpažinti. Vėliau RFID tobulėjo kartu su mikroelektronikos pažanga, o šiandien ji yra plačiai taikoma įvairiose srityse.

Be RFID, objektų žymėjimui ir sekimui naudojamos ir kitos technologijos, pavyzdžiui brūkšniniai kodai (angl. *barcode*) bei QR kodai. Brūkšniniai kodai yra viena seniausių automatizuotų identifikacijos sistemų, naudojama mažmeninėje prekyboje ir logistikoje. QR kodai yra patobulinta brūkšninių kodų versija, galinti saugoti daugiau informacijos ir būti nuskaityta įvairiais mobiliaisiais įrenginiais. Kai kuriose srityse šios technologijos naudojamos kartu – pavyzdžiui, prekybos centruose QR kodai gali suteikti išsamesnę informaciją apie produktą, o RFID leidžia greitai ir automatiškai atnaujinti inventORIZACIJOS duomenis.

RFID technologija leidžia identifikuoti įvairius objektus naudojant radijo bangas. Identifikuojamų objektų pobūdis gali būti įvairus – žmonės, gyvūnai, produktų įpakavimai, įrankiai, transporto priemonės ar kita. Šios sistemos susideda iš 2 pagrindinių dalių – skaitytuvo ir žymių, kurios tvirtinamos prie identifikuojamo objekto.



1 pav. RFID sistemos sudėtis [4]

RFID technologijos pranašumai apima didelį nuskaitymo greitį, galimybę identifikuoti kelis objektus vienu metu (angl. *bulk reading*), atsparumą nepalankioms aplinkos sąlygoms bei nebūtiną tiesioginį matomumą. Vis dėlto, RFID žymių kaina, ypač kai naudojami integriniai grandynai, išlieka pagrindiniu ribojančiu faktoriumi masinėje, mažos vertės produktų identifikacijoje. Taip pat iškyla duomenų saugumo, privatumo bei suderinamumo tarp skirtingų sistemų klausimai.

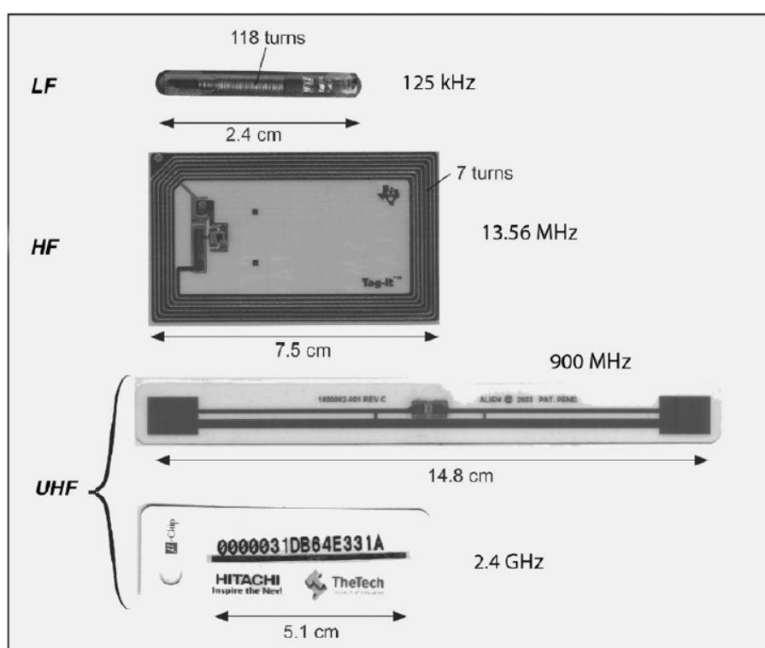
Svarbus RFID taikymo aspektas yra duomenų apsauga. Pasyviosios žymės su atvirais duomenimis gali būti naudojamos ten, kur nėra būtinas aukštas saugumo lygis, pavyzdžiui, bilietų sistemos, bibliotekos, mažmeninė prekyba. Tačiau kritinėse srityse, tokiose kaip medicininė įranga ar mokėjimo sistemos, taikomi papildomi šifravimo ir autentifikacijos metodai, užtikrinantys duomenų vientisumą ir apsaugą nuo neteisėtos prieigos.

Kai kurie objektai, pavyzdžiui, aukštos vertės daiktai arba asmeniniai duomenys, turi būti sekami be viešos prieigos galimybių, kad būtų išlaikytas konfidencialumas. Tokiu atveju brūkšninis kodas ar QR kodas nebūtų patikimi, nes šie kodai gali būti lengvai nuskaityti bet kurio asmens naudojant įprastus mobiliuosius įrenginius ar skaitytuvus. RFID technologija, savo ruožtu, suteikia galimybę užtikrinti tam tikrą duomenų apsaugos lygį per šifravimo metodus ir autentifikacijos protokolus. Pavyzdžiui, kai kurios RFID sistemos naudoja šifruotą ryšį tarp žymės ir skaitytuvo, taip apsaugodamos perduodamus duomenis nuo pašalinių stebėtojų. Be to, tam tikri RFID įrenginiai gali

būti aprūpinti skirtingais autentifikavimo metodais, kurie užtikrina, kad tik autorizuoti įrenginiai galėtų pasiekti ar modifikuoti duomenis.

Vis dėlto, belustė RFID technologija turi savo specifiką: kadangi tokios žymės nevaldo elektroninių komponentų (procesorių ar atminties), jos neturi vidinės apsaugos nuo neteisėtos prieigos. Dėl to jos negali naudoti šifravimo metodų ar autentifikacijos protokolų, kad užtikrintų duomenų apsaugą, ir jų spektriniai parašai taip pat gali būti lengvai nuskaityti su tinkama įranga. Dėl šios priežasties belustės RFID žymės paprastai naudojamos tose srityse, kur duomenų apsauga nėra kritinė, pavyzdžiui, prekių sekimui arba kitose mažos rizikos taikymo srityse.

Dėl skirtingų RFID technologijos tipų savybių, ją galima pritaikyti įvairioms sąlygoms – trumpo nuotolio (iki 10 cm), ilgo nuotolio (iki 15 m), labai ilgo nuotolio (iki 3 km), funkcionavimas įvairiose terpėse (pvz. skysčiuose), veikimas nereikalaujant tiesioginio matymo tarp skaitytuvo ir žymės, itin žema kaina (< 0,10 Eur), maži matmenys ir kitos savybės.



2 pav. RFID technologijos veikimo dažniai ir žymeklių pavyzdžiai [4]

Pagal veikimo dažnį RFID žymės skirstomos į:

- žemo dažnio: 30 – 300 kHz;
- aukšto dažnio: 3 – 30 MHz;
- ultraaukšto dažnio: 433 – 915 MHz;
- mikrobangų: > 1 GHz.

Žemo dažnio RFID technologija taikoma gyvūnų (naminių / laukinių gyvūnų, žuvų, paukščių) sekimui, dėl galimybės veikti įvairiose terpėse, įskaitant skysčius. Tokio tipo žymė yra apytikriai ryžio dydžio, nereikalauja papildomo energijos šaltinio ir gali veikti iki 10 cm atstumu [4].

Aukšto dažnio RFID technologija dažniausiai naudojama trumpo nuotolio (iki 10 cm) objektams identifikuoti. Šio dažnio žymės gali būti tvirtinamos ant įvairių paviršių, yra itin plonos, pasižymi

aukšta komunikacijos sparta bei turi gerai išstobulintus saugumo protokolus, todėl yra dažnai naudojamos įvairių objektų apskaitai sekti.

Ultraaukšto dažnio RFID žymės yra naudojamos didesnio veikimo atstumo (iki 15 m) reikalaujančiose sistemose, tokiose kaip realaus laiko inventoriaus stebėjimas, transporto priemonių atpažinimas, didelių gabaritų objektų sekimas (pvz. jūrinių konteinerių). Pasižymi itin didele duomenų perdavimo sparta, aukštu nuskaitymo greičiu, tačiau veikimo atstumą sąlygoja kliūtys ir žymių bei skaitytuvų kaina yra didesnė nei prieš tai minėtų technologijų [4].

Mikrobangų RFID technologija pritaikoma taip pat kur UHF, tačiau papildomai pasižymi didesniu veikimo atstumu, nuskaitymo greičiu bei didesniu saugumu. Ši technologija taikoma kelių mokesčio sistemose, traukinių krovinių stebėjimo sistemose, pavojingų aplinkų stebėjimo sistemose ir kt. [4] [5].

Didžioji dalis rinkoje esančių įvairių dažnių žymių yra sudarytos iš 2 komponentų – integrinio grandyno, atsakingo už komunikacijos apdorojimą ir antenos, atsakingos už radijo bangų pavertimą elektros srove. Dalis žymių yra pasyvios – nereikalaujančios papildomo maitinimo šaltinio. Tokio tipo žymės integrinio grandyno maitinimo srovę užtikrina iš radijo bangų energijos. Taip pat rinkoje prieinamos pusiau aktyvios ir aktyvios žymės, kurioms reikalingas papildomas maitinimo šaltinis [6].

RFID žymių didžiąją kainos dalį sudaro integrinis lustas, skirtas skaitytuvo ir žymės komunikacijos užtikrinimui. Sudarius galimybę veikti RFID žymei nenaudojant integrinio lusto, jos kaina gerokai sumažėja [7]. Būtent šios, lusto nenaudojančios (angl. *chipless*) žymės yra apžvelgiamos šiame darbe, išanalizuojami jų galimi dizainai, projektavimo būdai, įvertinamas gamybos sudėtingumas, kaina, atliekama jų charakteristikų modeliavimas bei charakteristikų išmatavimas realizuotiems dizainams.

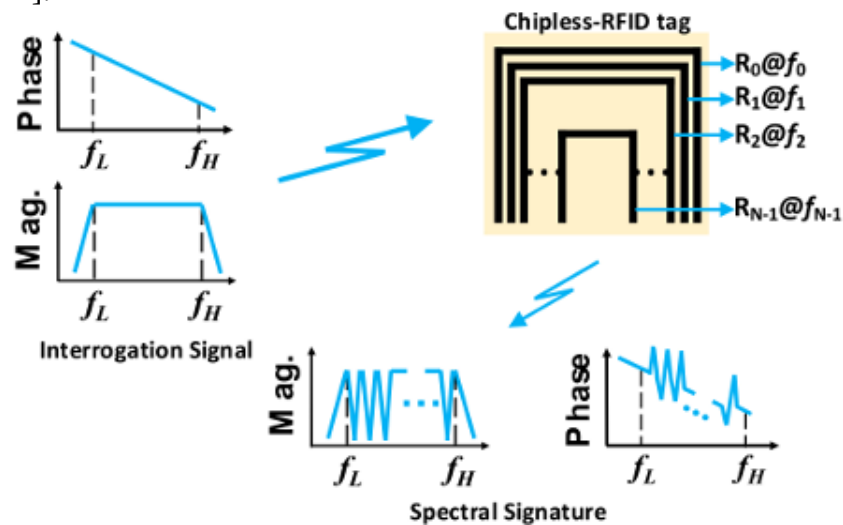
1.3. Lusto nenaudojančios RFID žymės

Skirtingai nuo lustą turinčių RFID žymių, kurios dažnai turi galimybę keisti arba įrašyti informaciją į pačią žymę, lusto nenaudojančios žymės neturi šios galimybės. Tačiau, panašiai kaip ir brūkšniniai kodai, įrašyta informacija tokiose žymėse negali būti keičiama, todėl jos tinkamos naudoti tam tikrose taikymo srityse, kur nereikia dinamiškai atnaujinti duomenų. Brūkšniniai kodai, nors ir vis dar yra plačiai naudojami, turi vieną pagrindinį trūkumą: jų nuskaitymas reikalauja tiesioginio matymo lauko ir tam tikro kampo, kad būtų galima gauti duomenis iš jų. Tokiu atveju belusčių RFID žymės turi pranašumą, nes jas galima nuskaityti nepriklausomai nuo skaitytuvo padėties [7]. Be to, nereikia tiesioginio matymo lauko tarp skaitytuvo ir žymės, todėl jos puikiai tinka įvairiems pritaikymams, pavyzdžiui, prekių sekimui ir logistikai, kur nėra galimybės pakreipti objektą tinkamu kampu nuskaitymui, arba nuskaitymas objektas yra jau įpakuotas [8][9]. Be to, belusčių RFID žymių gamybos kaina yra žema, todėl jos gali būti naudojamos sekant žemos vertės objektus, tokius kaip masinės gamybos produktai, pakuotės, ar prekės, nereikalaujančios duomenų apsaugos [10][11].

Belusčių RFID žymių informacijos (ar unikalios EM parašo) kodavimas gali būti atliekamas keliais būdais: laiko srityje arba dažnių srityje. Informacijos kodavimas laiko srityje yra paremtas akustinių bangų technologija [12]. Žymės antena priima elektromagnetinį impulsą, jį paverčia į akustinį signalą, kuris sklinda per substratą. Sklindant per substratą, akustinę bangą atspindi reflektoriai. Atspindėta akustinė banga atgal paverčiama į elektromagnetines bangas ir perduodama į skaitytuvą. Šis veikimo principas atitinka laiko srities reflektometrą (angl. *time domain reflectometer*). Tokios žymės unikalūs kodai sukuriami keičiant ant substrato suformuotus reflektorius [12]. Tačiau dėl akustinių

reflektorių realizavimo sudėtingumo šio tipo žymių kaina yra didesnė ir pritaikymas sudėtingesnis lyginant su informacijos kodavimo dažnių srityje metodais [7]. Panašų veikimo principą galima realizuoti naudojant suformuotas vėlinimo linijas ant substrato. Tačiau šiuo atveju, vėlinimo linijos turi būti itin ilgos arba skaitytuvo siunčiamas impulsas itin trumpas, siekiant išvengti siųstuvo ir žymės signalų persidengimo. Šį metodą realizuoti yra pakankamai sudėtinga, todėl jis yra retai naudojamas [12][13].

Dažnių srityje kodavimas atliekamas suformuojant ant substrato keletą skirtingų rezonatorių su savitais rezonansiniais dažniais. Šie dažniai turi patekti į skaitytuvo nuskaitymą dažnių ruožą. Kiekvienas rezonatorius atitinka vieną informacijos bitą – skaitytuvas gali aptikti priimamo signalo amplitudės ar fazės pasikeitimą tam tikrame dažnyje. Didžioji dalis tokio tipo žymių veikia atspindint priimtą signalą [14].



3 pav. Belusčio žymeklio įtaka siųstuvo signalui [12]

3 paveiksle pavaizduota kaip žymeklis įtakoja siųstuvo signalą sukurdamas iškraipymus dažnių spektro amplitudėje (matomi atitinkami šuoliai) ir fazinėje charakteristikoje. Kiekvienas rezonatorius sukuria savitą spektro pasikeitimą. Daugumoje mokslinių šaltinių yra nagrinėjamos žymės, kurių spektrinis parašas yra ruože nuo 1 GHz iki 6 GHz [12]. Žymės unikalumą užtikrina įvairių rezonatorių naudojimas, kurie rezonuoja skirtingais dažniais, taip sukuriant unikalų elektromagnetinį parašą (angl. *electromagnetic signature*).

Rezonatorius yra elektros grandinė, kurios impedansas sumažėja, kai per ją teka elektros srovė, veikianti tam tikru dažniu. Tai atsiranda dėl rezonanso reiškinių, kuomet talpiniai ir induktyviniai impedansai kompensuojasi ir taip pasiekiamas rezonansinis dažnis. Pavyzdžiui, naudojant dipolio tipo rezonatorių, šio rezonanso dažnį galima reguliuoti keičiant laidininko ilgį. Toks rezonatorius gali būti integruojamas į labai kompaktiškas RFID žymes. Suformavus skirtingų ilgių rezonatorius ant substrato (pvz. FR-4) yra gaunama primityvi belustė RFID žymė [15]. Skaitytuvui išsiunčiant kintančio (didėjančio) dažnio signalą, žymės rezonatoriai ties savitu rezonavimo dažniu rezonuoja ir išspinduliuoja energiją atgal į skaitytuvą. Skaitytuvo imtuvas priima šį signalą ir pagal jo dažnį gali identifikuoti žymę. Jei norima, kad žymė būtų kuo mažesnė, galima naudoti metamedžiagas, kurios leidžia mažinti rezonatoriaus dydį, neprarandant veikimo efektyvumo [16] [17].

1.4. Metamedžiagų pritaikymas belusčių žymių projektavime

Metamedžiagos – tai dirbtinai sukurtos medžiagos, kurių fizikinės savybės yra nulemtos ne tiek cheminės sudėties, kiek jų vidinės struktūros. Jos pasižymi savybėmis, kurių nėra gamtoje randamose medžiagose, pavyzdžiui, neigiamu lūžio rodikliu, neigiama dielektrine (ϵ) ar magnetine (μ) skvarba bei kitomis ypatingomis elektromagnetinėmis charakteristikomis [18]. Metamedžiagos dažniausiai kuriamos naudojant periodiškai pasikartojančias nanostruktūras ar mikrostruktūras, kurios leidžia manipuliuoti elektromagnetinėmis bangomis naujais būdais. Jos gali būti pritaikomos įvairiose srityse, įskaitant RFID technologijas – metamedžiagos leidžia sumažinti antenas, neprarandant rezonavimo efektyvumo, kas itin svarbu lusto neturinčioms RFID žymėms. Be to, jos atveria galimybes kurti kompaktiškus ir efektyvius rezonatorius, kurie gali veikti norimu dažniu net ir esant mažiems matmenims.

Metamedžiagos gali būti suskirstytos į kelis pagrindinius tipus, kurie pasižymi skirtingomis elektromagnetinėmis savybėmis:

- Elektrinės (angl. *Epsilon-Negative*) – šios medžiagos turi neigiamą dielektrinę skvarbą ($\epsilon < 0$), todėl jos gali efektyviai manipuliuoti elektromagnetinėmis bangomis ir sukurti neįprastas bangų plitimo savybes, tokias kaip visiškas bangų atspindėjimas ar tam tikrų dažnių slopinimas.
- Magnetinės (angl. *Mu-Negative*) – šios medžiagos pasižymi neigiamu magnetiniu atsaku ($\mu < 0$). Jos gali būti naudojamos norint sukurti struktūras, kurios stiprina magnetinio lauko reakciją ir padidina rezonavimo efektyvumą.
- Dviejų parametrų neigiamumo (angl. *Double Negative*) – tai metamedžiagos, kurios turi neigiamus tiek dielektrinius, tiek magnetinius parametrus. Tai lemia ypatingas jų savybes, kurios leidžia kurti labai efektyvius rezonatorius ir mikrostruktūras, optimizuojančias elektromagnetinių bangų perdavimą.
- Nulinio indekso metamedžiagos (angl. *Zero Index Metamaterials*) – šios medžiagos turi ypatingas savybes, kurios leidžia elektromagnetinėms bangoms sklirti be slopinimo. Jos gali būti naudingos, norint sukurti itin tiksliai veikiančius mažų matmenų įrenginius, tokius kaip itin mažos RFID žymės.

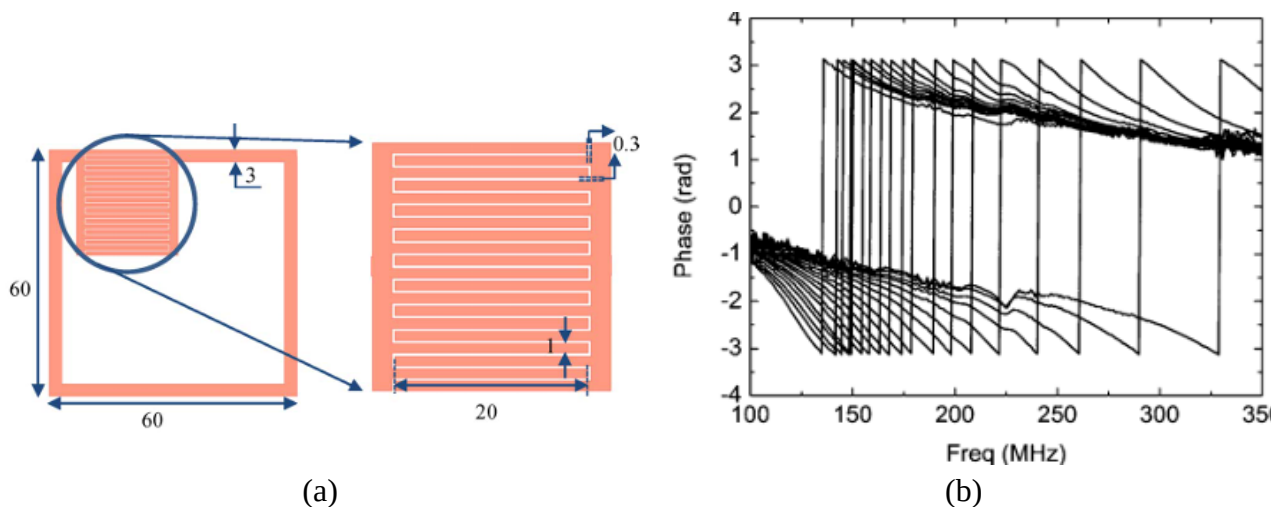
Metamedžiagos ne tik leidžia sumažinti RFID žymių matmenis, bet ir atveria galimybes pagerinti kai kurias esmines žymių savybes. Naudojant metamedžiagas, galima sukurti žymes, kurių nuskaitymo atstumas yra didesnis lyginant su įprastų struktūrų pritaikymu ant tokių pačių matmenų substratų. Dėl ypatingų metamedžiagų savybių, tokios žymės yra mažiau jautrios elektromagnetiniams trikdžiams ir gali veikti esant sudėtingoms aplinkos sąlygoms. Metamedžiagos taip pat leidžia sukurti žymes, kurios mažiau įtakoja viena kitą, kai keletas jų yra naudojama vienoje vietoje. Tai ypač svarbu intensyviai naudojamose sistemose, kaip logistikos sandėliai ar gamybos linijos, kur daugybė žymių turi veikti tuo pačiu metu.

Pritaikant metamedžiagas belusčių RFID žymių dizaine, galima sumažinti jų matmenis, tokiu būdu praplečiant pritaikymo galimybes. Pavyzdžiui, naudojant perskirtą žiedo rezonatoriaus tipą (angl. *Split-Ring Resonator*), galima sukurti belustes žymes, kurios veikia aukštesniuose dažniuose, tačiau išlieka mažų matmenų [19].

1.5. Belusčių žymių rezonatorių dizainų tipai

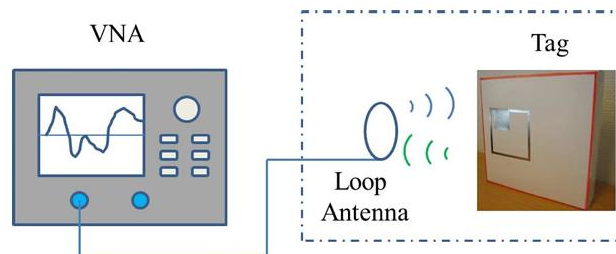
Siekiant suprojektuoti belustę žymę naudojant unikalų spektrinį parašą, reikia parinkti tinkamą rezonatoriaus dizainą bei substratą. Vienas iš žymės efektyvaus veikimo kriterijų yra tinkamas substrato parinkimas. Jis gali būti įvairus – popierius, polimerų plėvelės, stiklas, tekstilė, keramika, stiklotekstolitas ar kitos kompozicinės medžiagos. Toliau pateikiami įvairūs rezonatorių realizavimo būdai iš mokslinių šaltinių, jų parametrų bei projektavimo kriterijų palyginimas.

Šaltinyje [20] yra pristatomas belustės žymės šukų formos dizainas suformuotas ant popieriaus pagrindo. Rašaliniu spausdintuvu ant popieriaus atspausdinamas rezonatorius. Naudojamas laidus spausdintuvo rašalas, sudarytas iš 20 % sidabro dalelių siekiant užtikrinti pakankamą elektrinį laidumą. Šioje žymėje gali būti užkoduota 4 bitų informacija. Dėl galimybės naudoti popierių kaip substratą, sumažėjusi kaina leidžia šią žymę pritaikyti pigių objektų sekimui.



4 pav. Belustė žymė suformuota ant popieriaus pagrindo. (a) rezonatoriaus struktūra, (b) žymės spektrinis parašas [20]

Šio žymeklio rezonansiniai dažniai gauti nuo 130 MHz iki 325 MHz, o žymeklio matmenys 60 mm ilgio ir 60 mm pločio. Praktiniam S parametrų įvertinimui panaudota kilpinė antena atskirta nuo žymeklio oro tarpu. Pateiktas rezonansinių dažnių matavimo metodas paremtas skirtumu tarp S parametrų aplinkos be žymeklio ir su žymekliu.

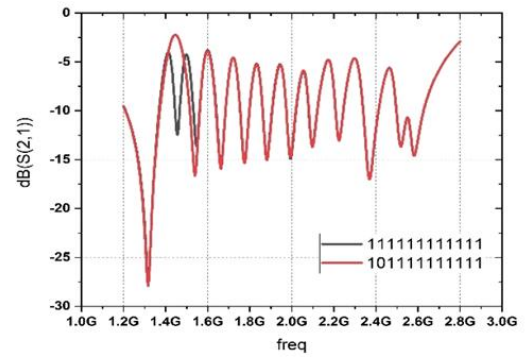


5 pav. Vienas iš belusčio žymeklio S parametrų matavimo metodų [20]

Rezonatoriai taip pat gali būti formuojami ant įprasto elektronikos spausdintinio montažo plokščių pagrindo – FR-4. Dėl didelio paplitimo šios medžiagos kaina yra maža, o didelis gamybos galimybių asortimentas leidžia pigiai realizuoti norimą dizainą. [21] šaltinio autoriai pristato 12 bitų belustės žymės dizainą, pritaikant stačiakampių formos mikrojuostelines ilgąsias linijas suformuotas ant FR-4 substrato.



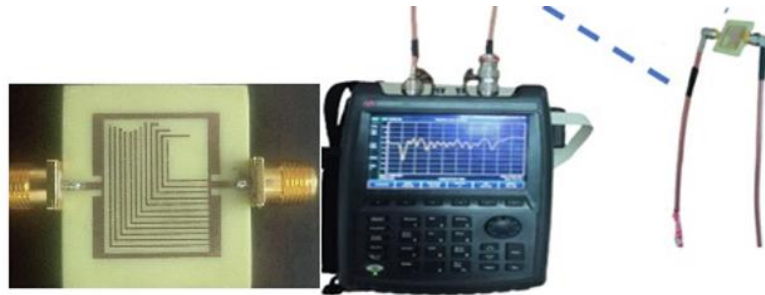
(a)



(b)

6 pav. Žymės suformuotos ant FR-4 substrato (a) geometrija ir (b) spektrinio parašo simuliacija [21]

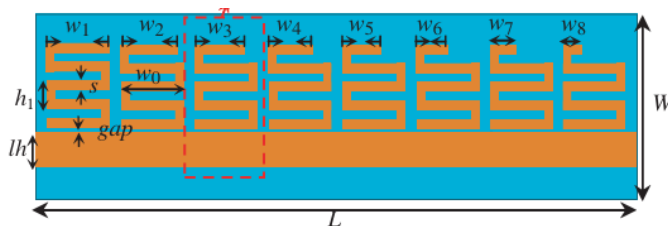
12 bitų rezonatoriaus substrato matmenys yra 20 mm ilgio ir 20 mm pločio. Kiekviena atskira juostelė atitinka vieną bitą, kuris turi savitą rezonansinį dažnį [21].



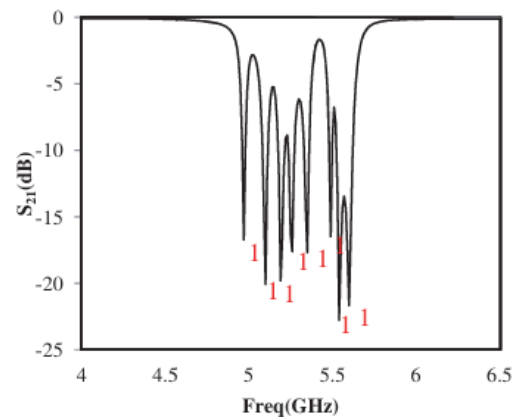
7 pav. Šaltinyje pateiktos žymeklio struktūros S parametų matavimo metodas [21]

Šio rezonatoriaus realus S parametų matavimas atliktas ne galvaniskai izoliuotu būdu, tačiau prijungiant matavimo sistemą tiesiogiai prie žymeklio struktūros. Gauti rezonansiniai dažniai yra nuo 1,2 GHz iki 2,8 GHz.

Siekiant išgauti geresnį žymės veikimą aukštesniuose dažniuose (> 5 GHz) gali būti naudojamas žemesnės dielektrinės skvarbos (lyginant su FR-4) substratas, pvz. *Taconic TLX-8*. Šio substrato dielektrinė skvarba $\epsilon = 2,55$. Taip pat šis substratas pasižymi pastovia dielektrine skvarba plačiame dažnių diapazone. Šaltinyje [22] pristatomas meandro formos rezonatoriaus dizainas suprojektuotas naudojant *Taconic TLX-8* substratą.



(a)

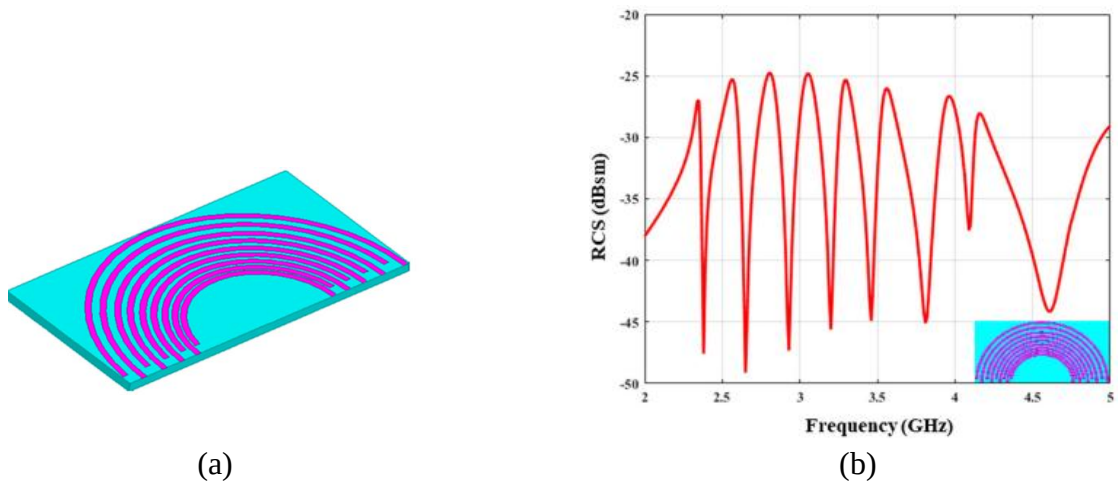


(b)

8 pav. Meandro formos rezonatorius suformuotas ant *Taconic TLX-8* substrato [22] (a) geometrija ir (b) spektrinis parašas

Šio žymeklio matmenys yra 49 mm ilgio ir 12 mm pločio. Ant substrato suformuoti 8 skirtingų ilgių rezonatoriai. Rezonansiniai dažniai gauti nuo 4,97 GHz iki 5,54 GHz. Praktinis S parametų vertinimas nėra pateikiamas.

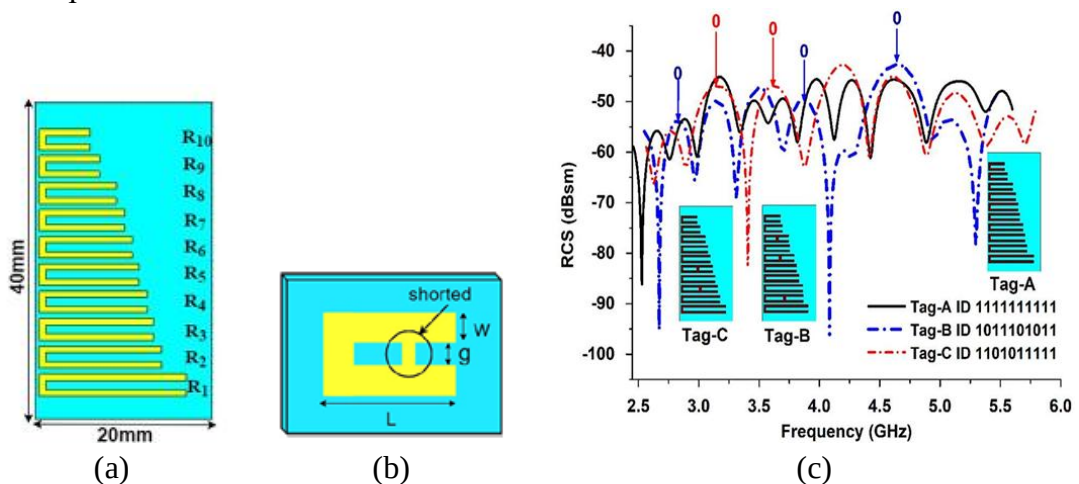
Žema dielektrinė skvarba taip pat būdinga RO4003 substratui, kuris taip pat yra naudojamas projektuojant mokslinėje literatūroje aprašomas belustes žymes. Jo kaina yra mažesnė lyginant su *Taconic TLX-8*, todėl galimas platesnis pritaikymas. Šis substratas naudojamas šaltinyje [23], kuriame pateikiamas žymės dizainas susidedantis iš puslankių, tokiu būdu leidžiant sumažinti žymės matmenis.



9 pav. Pyslankių formos rezonatorius suformuotas ant RO4003 substrato (a) geometrija ir (b) spektrinis parašas [23]

Žymeklio matmenys 30 mm ilgio ir 15 mm pločio. Rezonatorių veikimo diapazonas yra nuo 2,4 GHz iki 5 GHz. Praktiniai matavimai atlikti naudojant dvi raptorines antenas, iš kurių viena skirta žadinančio signalo išsiuntimui, kita – priėmimui.

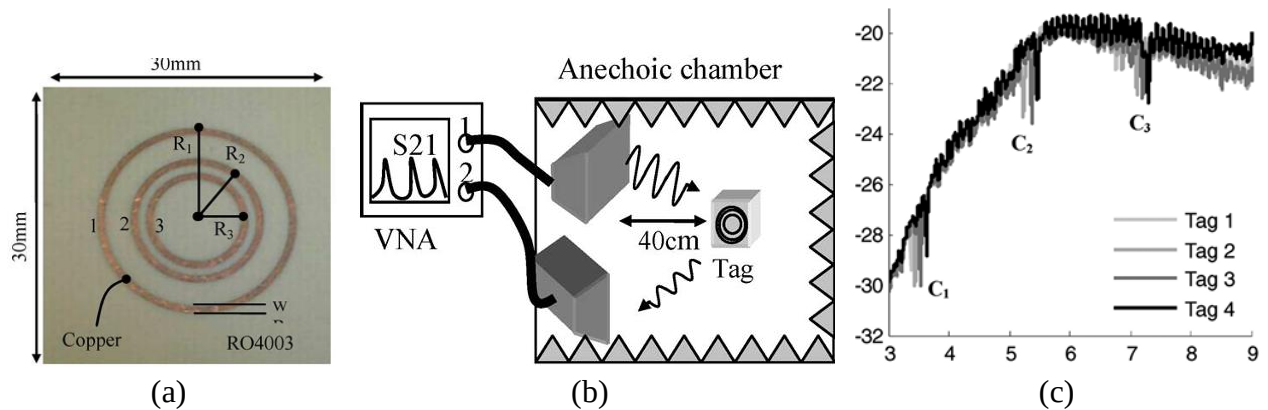
Šaltinio [24] autoriai pristato „C“ formos rezonatorių dizainą, suformuotą ant 0,8 mm storio FR-4 substrato. Toliau šiame darbe ši forma vadinama „U“ dizainu, siekiant aiškiau atskirti nuo perskirtų žiedo formos. Žymę sudaro 10 rezonatorių, todėl turima 10 bitų informacijos. Keičiant rezonatorių ilgį galima keisti jų rezonanso dažnį. Norint pakeisti žymės atitinkamo rezonatoriaus (bito) būseną, jis yra užtrumpinamas.



10 pav. „U“ formos rezonatoriaus (a) geometrija ir (b) užtrumpintas rezonatorius ir (c) žymės spektrinis parašas [24]

Žymeklio matmenys 40 mm ilgio ir 20 mm pločio. Ant vieno žymeklio yra suformuota 10 rezonatorių. Žymeklio rezonansinių dažnių diapazonas nuo 2,5 GHz iki 6 GHz. Informacijos apie eksperimentinius žymeklio S parametrų matavimus šaltinyje nėra pateikta [24].

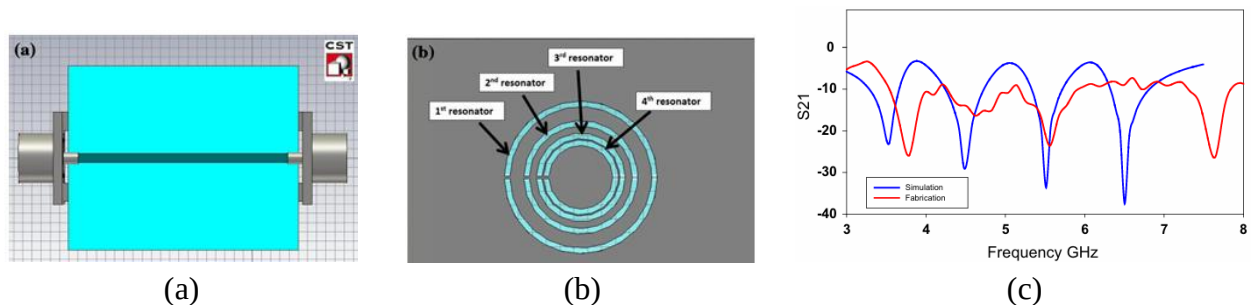
Žymekliai sudaryti iš žiedo formos rezonatorių pristatomi [25] šaltinyje. Jie išsiskiria galimybe juos nuskaityti nepriklausomai nuo nuskaitymo signalo poliarizacijos. Žymeklio substratas RO4003.



11 pav. Žymeklio struktūra naudojanti žiedo formos rezonatorius (a), matavimų metodas (b) ir matavimo rezultatai (c) [25]

Žymeklio matmenys 30 mm ilgio ir 30 mm pločio. Ant žymeklio yra suformuoti 3 rezonatoriai. Eksperimentiniai matavimai atlikti beaidėje kameroje naudojant dvi ruporines antenas, vieną signalo išsiuntimui, kitą – priėmimui. Eksperimentiniu būdu gautų rezonansinių dažnių diapazonas yra nuo 3,5 GHz iki 7,5 GHz.

Šaltinyje [26] yra pristatomi žymekliai naudojantys perskirtą žiedo rezonatorius, kurie pasižymi metamedžiagų savybėmis. Žymeklio substratas – polietileno tereftalatas (PET).



12 pav. Žymeklio naudojančio perskirtą žiedo rezonatorius galinė (a) ir priekinė (b) pusės, (c) modeliavimo ir eksperimentinių matavimų rezultatai [26]

Žymeklis sudarytas iš 4 perskirtą žiedo rezonatorių. Substrato matmenys 50 mm ilgio ir 25 mm pločio. Žymeklio rezonansinių dažnių diapazonas nuo 3,4 GHz iki 7,4 GHz. Eksperimentinis S parametrų matavimas atliktas naudojant kitoje žymeklio pusėje esančią 50 Ω perdavimo liniją. Eksperimentiniuose matavimuose išvelgiamas rezonansinių dažnių poslinkis link aukštesnių dažnių lyginant su modeliavimo rezultatais [26].

1 lentelė. Šaltiniuose pateiktų žymeklių tipai, substratai, dažnių diapazonai ir matavimo metodai

Rezonatoriai	Substratas	Dažnių diapazonas	Eksperimentinis S parametrų matavimo metodas
Šukų formos [20]	Popierius	130 MHz - 325 MHz	Kilpinė antena
Stačiakampių formos [21]	FR-4	1,2 GHz - 2,8 GHz.	Tiesioginis prijungimas
Meandro formos [22]	Taconic TLX-8	4,97 GHz - 5,54 GHz	Neatliktas
Perskirto žiedo puslankiai [23]	RO4003	2,4 GHz – 5 GHz	Ruporinės antenos
„U“ formos [24]	FR-4	2,5 GHz - 6 GHz	Neatliktas
Žiedo formos [25]	RO4003	3,5 GHz - 7,5 GHz	Ruporinės antenos
Perskirto žiedo formos [26]	PET	3,4 GHz - 7,4 GHz	Perdavimo linija žymeklio kitoje pusėje

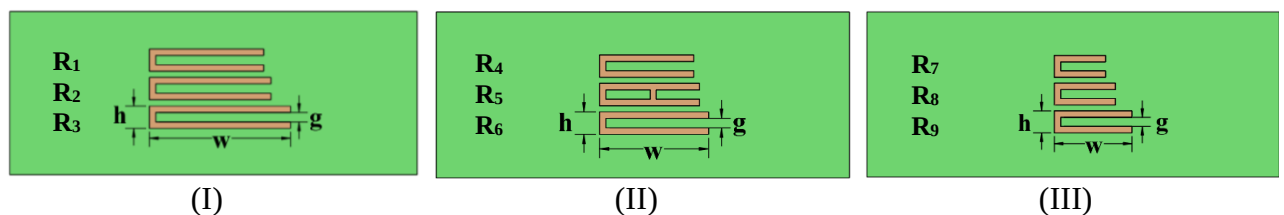
Visų apžvelgtų rezonatorių dizainai skiriasi savo geometrija, substrato tipu, veikimo dažnių diapazonu bei saugomu informacijos bitų kiekiu. Didžioji dalis šaltiniuose pateikiamų žymeklių veikia dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 7 GHz. Geometrijos naudojančios mažus atstumus tarp laidininkų yra sudėtingesnės pagaminti. Žemesnę dielektrinę skvarbą turintys substratai yra labiau tinkami aukštesnių (> 3 GHz) dažnių rezonatoriams, tuo tarpu įprastas FR-4 substratas pasižymi pastovia dielektrine skvarba tik žemesniuose dažniuose, tačiau yra kur kas pigesnis. Pasirinktų struktūrų modeliavimas bus atliekamas dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 10 GHz siekiant aptikti galimą rezonansų postūmį į didesnę dažnį. Eksperimentinis matavimas atliekamas nuo 1 GHz iki 6 GHz atsižvelgiant į prieinamo matavimo įrangos matavimo diapazoną. Dalyje šaltinių pristatomi įvairūs eksperimentiniai S parametrų matavimo metodai, vieni jų naudoja tiesioginį matavimo sistemos prijungimą prie žymeklio, kiti naudoja antenas – ruporines arba kilpines.

2. Metodinė ir eksperimentinė dalis

Apžvelgtoje literatūroje buvo pastebėta, kad ne visiems žymeklių tipams buvo atliktas eksperimentinis matavimas, taip pat dalis jų buvo realizuoti ne ant FR-4 substrato. Dalis pristatomų nuskaitymo būdų yra paremti galvanišškai neizoliuotais metodais, kuomet žadinantį signalą skleidžianti matavimo sistemos dalis yra suformuota ant pačio žymeklio. Šioje dalyje siekiama:

1. pritaikyti tris literatūros apžvalgoje pristatytus dizainus ant 1,6 mm storio FR-4 substrato, siekiant sudaryti vienodą substrato įtaką kiekvienai struktūrai. Parinkti po tris kiekvieno dizaino geometrijos variacijas siekiant nustatyti geometrijos pokyčio įtaką spektriniam parašui;
2. atlikti S parametrų modeliavimą dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 10 GHz naudojant „CST Studio Suite“ programinę įrangą siekiant nustatyti žymeklių spektrinius parašus. Palyginti spektrinių parašų modeliavimo rezultatus kintant kiekvieno dizaino geometrijai bei skirtumus tarp skirtingų dizainų;
3. atlikti eksperimentinį S parametrų matavimą pagamintiems žymeklių variantams naudojant vektorinį grandinių analizatorių ir „patch“ tipo antenas dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 6 GHz. Šiuo matavimu siekiama nustatyti žymeklių išskiriamumą naudojant minėtą matavimo sistemą ir palyginti eksperimentinių matavimo rezultatų gautus rezonansinius dažnius su modeliavimo rezultatais;
4. įvertinti pasirinktų žymeklių variantų spektrinio parašo rezonansinių dažnių artinimo galimybes, suformuojant juos dažnių diapazone nuo 3 GHz iki 5 GHz;
5. įvertinti substrato dielektrinės skvarbos nuokrypio įtaką pasirinktų žymeklių spektriniam parašams.

Pirmasis pasirinktas žymeklio dizainas – sudarytas iš „U“ formos rezonatorių. Šaltinio [24] autoriai pristatė šios struktūros modeliavimo rezultatus ant 0,8 mm storio FR-4 substrato, tačiau nepateikė eksperimentinių matavimų rezultatų. Šiuo atveju siekiama atkartoti modeliavimo rezultatus, įvertinti ar substrato storio pokytis įtakoja modeliavimo rezultatus, eksperimentiniu būdu išbandyti žymeklio nuskaitymo galimybes bei optimizuoti rezonatorių ilgius atsižvelgiant į gautus eksperimentinius matavimo rezultatus siekiant kokybiškesnio atpažinimo (stumdam rezonansinius dažnius). „U“ formos žymeklio struktūra ir matmenys parinkti pagal [24] šaltinyje pristatytą dizainą. Šiuo atveju parinktas kitoks substrato storis (1,6 mm vietoje 0,8 mm) ir rezonatoriai išskirti po 3 ant vieno žymeklio, tokiu būdu gaunant mažesnius žymeklio matmenis, tačiau sumažinant žymeklio skyrą. Vieno žymeklio matmenys 20 x 50 mm. Struktūros pateiktos 13 paveikslė.



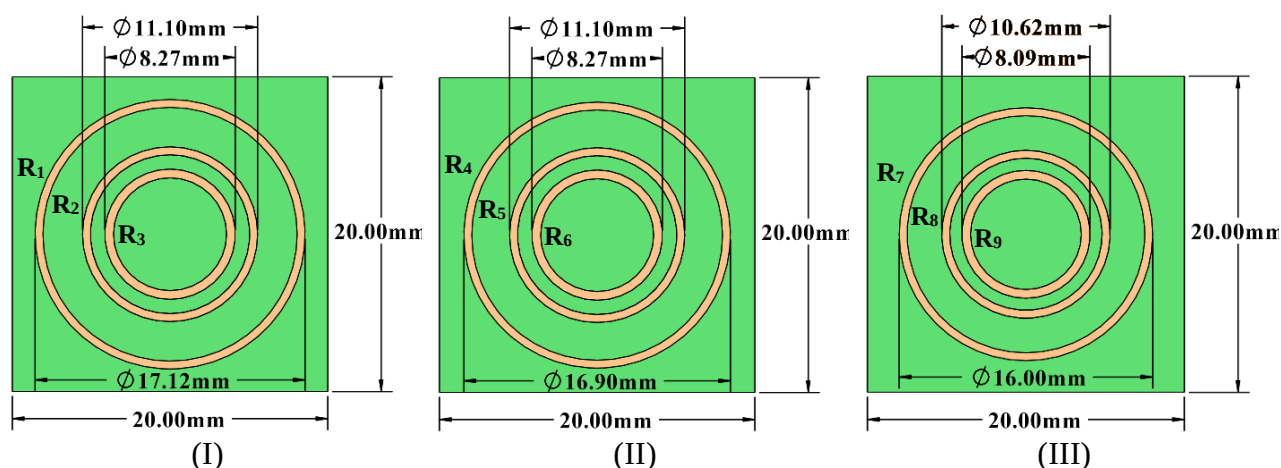
13 pav. „U“ formos žymeklių struktūros

Antrojo „U“ formos žymeklio varianto vidurinis rezonatorius yra užtrumpintas, taip kaip pateikia šaltinio autorius. Ši galimybė leidžia išjungti rezonatoriaus veikimą, tokiu būdu pašalinant šio rezonatoriaus spektrinio parašo rezonansą. Kiekvieno rezonatoriaus matmenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. „U“ formos žymeklių rezonatorių matmenys

(I)				(II)				(III)			
Nr.	Plotis, w, mm	Aukštis, h, mm	Tarpas g, mm	Nr.	Plotis, w, mm	Aukštis, h, mm	Tarpas g, mm	Nr.	Plotis, w, mm	Aukštis, h, mm	Tarpas g, mm
R1	14,0	2,71	1,15	R4	11,4	2,68	1,12	R7	6,2	2,64	1,08
R2	14,9	2,72	1,16	R5	12,1	2,69	1,13	R8	7,4	2,65	1,09
R3	17,3	2,73	1,17	R6	13,2	2,70	1,14	R9	9,4	2,66	1,10

Antrasis pasirinktas žymeklio dizainas – sudarytas iš žiedo formos rezonatorių [25]. Šaltinyje pateiktas žymeklis realizuotas ant RO4003 substrato. Šiuo atveju, ta pati struktūra pritaikoma FR-4 substratui. Dėl substratų dielektrinės skvarbos skirtumų, S parametų charakteristikos gali skirtis. Šaltinio autoriai pateikia eksperimentinius S parametų matavimus naudojant ruporines antenas, o dalis gautų rezonansinių dažnių (> 6 GHz) viršija šiame darbe nusistatytą dažnių diapazoną, todėl galimas ne visų rezonansinių dažnių aptikimas pasirinktame dažnių diapazone. Žiedo formos žymeklių struktūros ir matmenys pateikti 14 paveiksle ir 3 lentelėje.



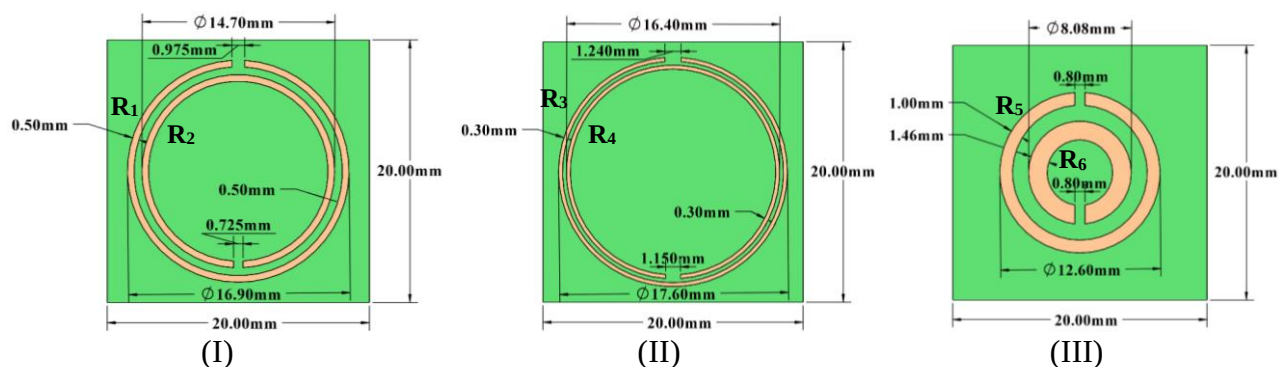
14 pav. Žiedo formos žymeklių struktūros

3 lentelė. Žiedo formos žymeklių rezonatorių matmenys

(I)			(II)			(III)		
Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm	Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm	Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm
R1	17,12	0,50	R4	16,90	0,50	R7	16,00	0,50
R2	11,10	0,50	R5	11,10	0,50	R8	10,62	0,50
R3	8,27	0,55	R6	8,27	0,55	R9	8,09	0,55

Trečiasis pasirinktas žymeklio dizainas – sudarytas iš perskirtų žiedo formos rezonatorių. Literatūros šaltinyje žymeklis yra suformuotas ant PET substrato, todėl pritaikius šią struktūrą ant FR-4 substrato galimas ženklus S parametų skirtumas nuo šaltinio autorių pateiktų eksperimentinių matavimų rezultatų. Skirtumas taip pat galimas dėl skirtingų matavimo metodų – šaltinyje naudojama perdavimo linija suformuota kitoje žymeklio pusėje, o šiame darbe naudojama „patch“ tipo antena

atskirta oro tarpu nuo žymeklio. Perskirto žiedo formos žymeklio struktūra ir matmenys pateikti 15 paveiksle ir 4 lentelėje.



15 pav. Perskirta žiedo formos žymeklių struktūros

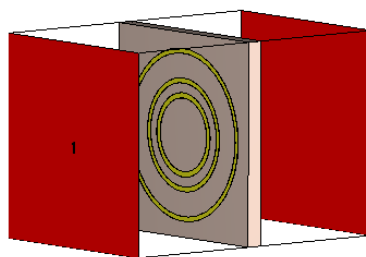
4 lentelė. Perskirta žiedo formos žymeklių rezonatorių matmenys

(I)				(II)				(III)			
Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm	Tarpas, mm	Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm	Tarpas, mm	Nr.	Skersmuo, mm	Plotis, mm	Tarpas, mm
R1	16,90	0,50	0,975	R3	17,60	0,30	1,240	R5	12,60	1,00	0,80
R2	14,70	0,50	0,725	R4	16,40	0,30	1,150	R6	8,08	1,46	0,80

Toliau šioje dalyje pateikiami dizainų modeliavimo metodai, modeliavimo rezultatai, žymeklių prototipų realizavimas, charakteristikų matavimo metodai ir matavimo rezultatai.

2.1. Žymeklių charakteristikų modeliavimas

Siekiant nustatyti skirtingų žymeklių rezonansinius dažnius (kurie sudaro unikalų spektrinį parašą), įvertinti veikimą skirtinguose dažnių diapazonuose ir nustatyti substrato įtaką šiems parametrams, buvo atliktas žymeklių charakteristikų modeliavimas naudojant „CST Studio Suite 2024“ programinę įrangą. Visų žymeklių modeliavimo dažnių diapazonas pasirinktas nuo 1 GHz iki 10 GHz. Substratas FR-4, kurio dielektrinė skvarba 4,3 ir storis 1,6 mm. Žymeklio rezonatoriaus pusėje yra pirmas S parametru modeliavimui skirtas žadinimo prievadas ir priešingoje pusėje – antras.

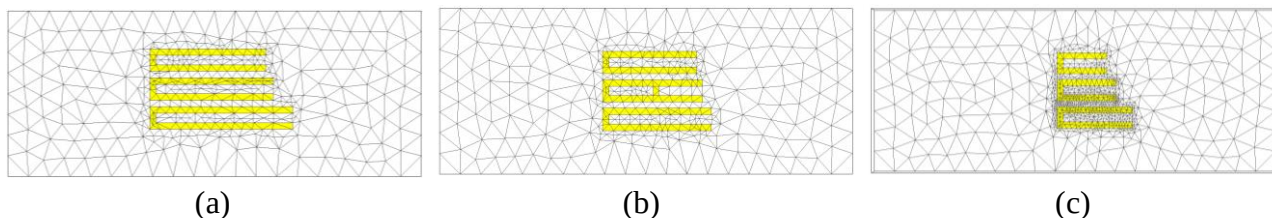


16 pav. S parametru žadinimo prievadų (angl. *ports*) išdėstymas „CST Studio Suite“ aplinkoje

Modeliavimo skaičiavimui pasirinktas dažnių srities metodas. Tinklelio sudarymas parinktas iš tetraedrinių elementų, kurių naudojama licencija leidžia naudoti iki 20000. Taip pat parinktas adaptyvaus tinklelio režimas, kuris kartoja smulkesnio tinklelio sudarymą po pirmųjų modeliavimo iteracijų.

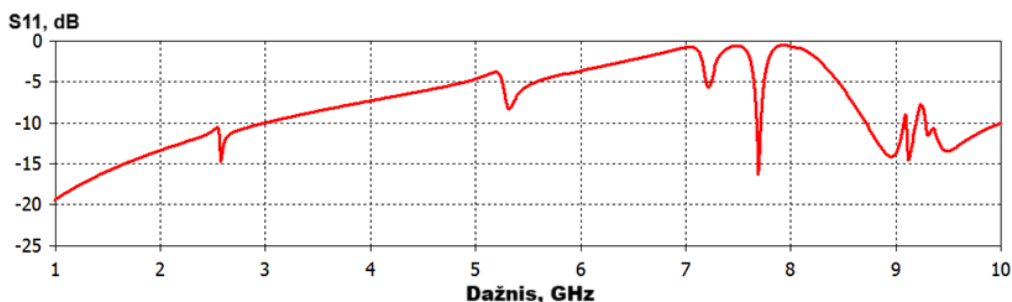
2.1.1. „U“ formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas

„U“ formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas atliekamas trimis struktūrų variantams, siekiant įvertinti rezonatorių geometrinių parametrų įtaką dažninėms charakteristikoms. Pirmojo varianto rezonatoriai ilgiausi, trečiojo – trumpiausi. Antrojo varianto vidurinis rezonatorius yra užtrumpintas siekiant panaikinti jo įtaką spektriniam parašui. Adaptivaus tinklėlio režimas sudaro smulkesnį tinklėlį aplink kiekvieną rezonatorių. Kiekvieno „U“ formos žymeklio varianto modelio tinklėliai „CST Studio Suite“ aplinkoje pateikti 17 paveiksle.

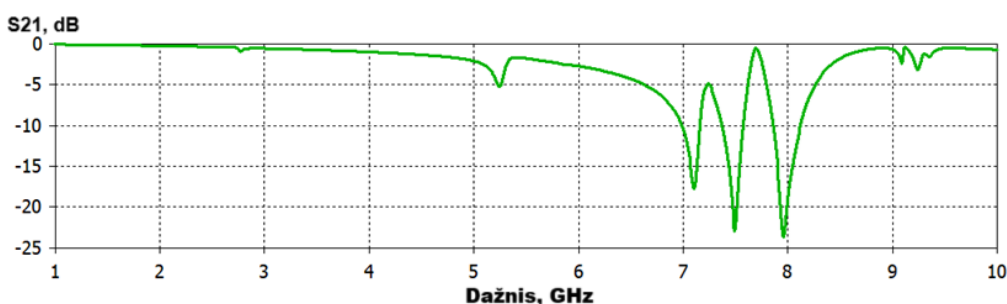


17 pav. „U“ formos žymeklio pirmojo (a), antrojo (b) ir trečiojo (c) variantų modelių tinklėliai „CST Studio Suite“ aplinkoje

„U“ formos žymeklio pirmojo varianto modelio baigtinių elementų kiekis – 12119, antrojo – 10398 ir trečiojo – 19659.



18 pav. „U“ formos žymeklio pirmojo varianto S11 parametrų modeliavimo rezultatai

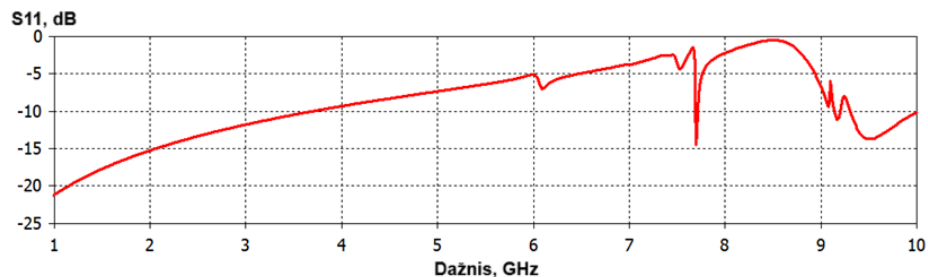


19 pav. „U“ formos žymeklio pirmojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

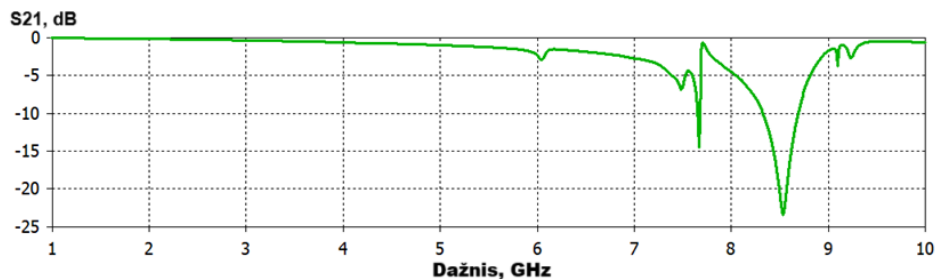
Kaip matyti iš „U“ formos žymeklio pirmojo varianto S11 diagramos pateiktos 18 paveiksle, rezonansų metu energija yra išspinduliuojama atgal į pirmąjį žadinimo prievadą ir matomas mažiausias slopinimas ties 7,1 GHz, 7,4 GHz ir 7,9 GHz. Šiuose dažniuose taip pat gaunamas didžiausias slopinimas į antrąjį žadinimo prievadą ir tai galima pastebėti 19 paveiksle, kuriame žemiausios amplitudės taškai yra būtent šiuose dažniuose. Ties 7,1 GHz gautas -17 dB amplitudės lygis, ties 7,4 GHz -23 dB amplitudės lygis ir ties 7,9 GHz -24 dB amplitudės lygis. Šiuo atveju

ilgiausias žymeklio rezonatorius turi žemiausią rezonansinį dažnį ties 7,1 GHz, vidurinis rezonatorius – ties 7,4 GHz ir viršutinis rezonuoja ties 7,9 GHz.

Antrasis „U“ formos žymeklio variantas išsiskiria užtrumpintu viduriniu rezonatoriumi, tokiu būdu nesukurdamas rezonanso žymeklio spektriniame paraše. „U“ formos žymeklio antrojo varianto modeliavimo rezultatai pateikti 20 ir 21 paveiksluose.

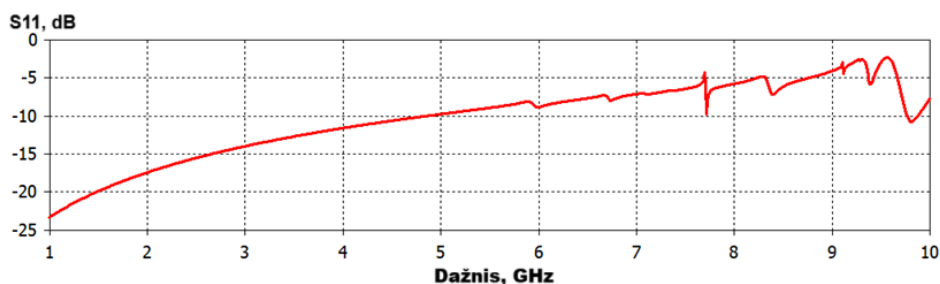


20 pav. „U“ formos žymeklio antrojo varianto S11 parametrų modeliavimo rezultatai

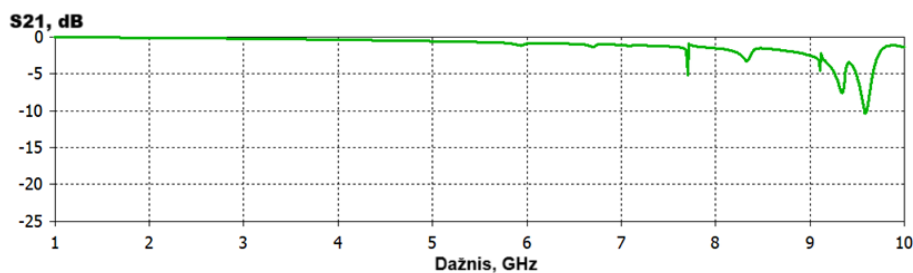


21 pav. „U“ formos žymeklio antrojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

„U“ formos žymeklio antrojo varianto S11 diagramoje (20 pav.) matomi du mažiausio slopinimo taškai, ties 7,6 GHz ir ties 8,5 GHz. Šiuose dažniuose taip pat matomas didžiausias slopinimas S21 diagramoje (21 pav.), tačiau rezonanso amplitudė gauta didesnė lyginant su pirmuoju variantu. Trečiojo rezonansinio dažnio nėra dėl užtrumpinto vidurinio rezonatoriaus.

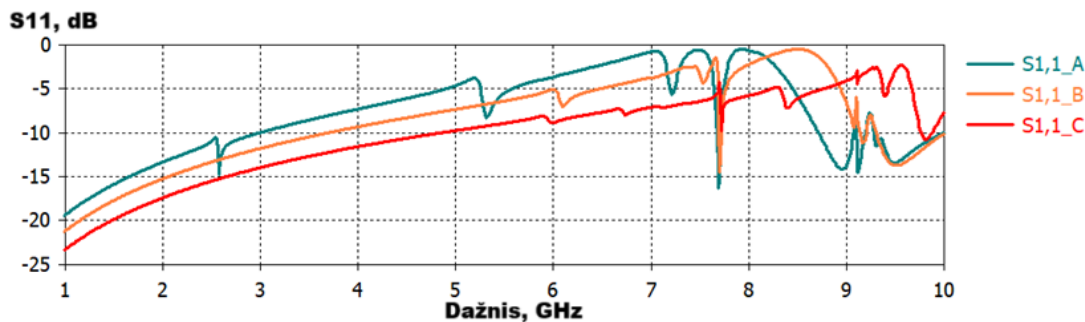


22 pav. „U“ formos žymeklio trečiojo varianto S11 parametrų modeliavimo rezultatai

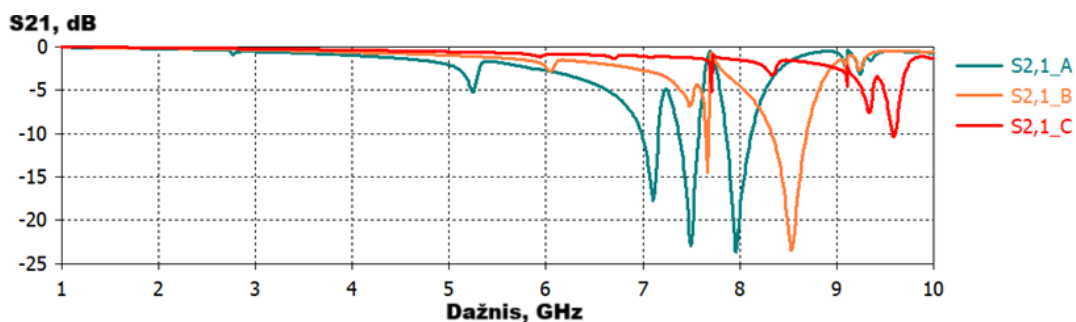


23 pav. „U“ formos žymeklio trečiojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Trečiojo varianto rezonatoriai yra trumpiausi. Adaptyvaus tinklelio režimas šiam variantui po keleto modeliavimo iteracijų viršijo leistiną maksimalų tinklelio elementų kiekį, todėl šiam variantui derinimas buvo atliekamas viena iteracija mažiau. Šio varianto S11 diagramoje (22 pav.) matomi tik du rezonansai – ties 9,2 GHz ir 9,6 GHz. Trečiasis rezonansas viršija užsibrėžtas modeliavimo dažnių diapazono ribas. Tai taip pat pastebima ir S21 diagramoje pateiktoje 23 paveiksle. Šiuo atveju S21 diagramoje gautos mažiausios rezonansų amplitudės lyginant su prieš tai nagrinėtais variantais.



24 pav. „U“ formos žymeklio visų variantų S11 parametrų modeliavimo rezultatai

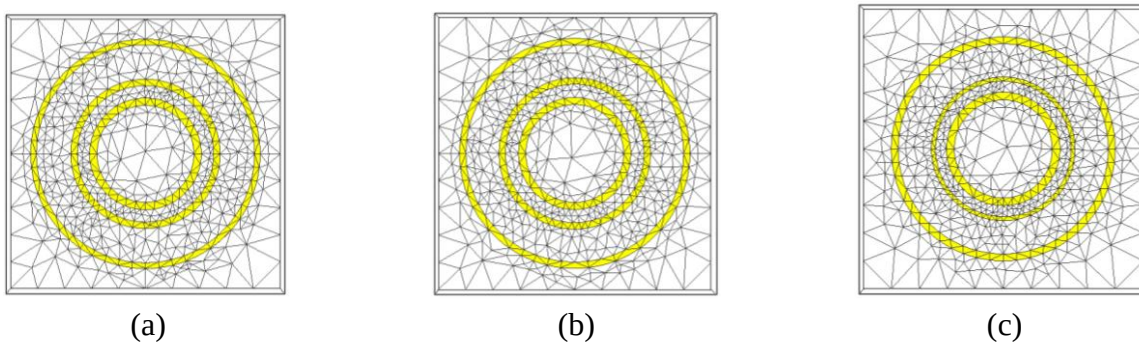


25 pav. „U“ formos žymeklio visų variantų S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Apžvelgiant visų „U“ formos žymeklio variantų S parametrų modeliavimo rezultatus, galima pastebėti jog šios struktūros šaltinyje pateikiamas veikimo dažnių diapazonas nuo 2,55 GHz iki 5,4 GHz naudojant 0,8 mm storio FR-4 substratą [24], tačiau šiuo atveju naudojant 1,6 mm storio FR-4 substratą gautas rezonansinių dažnių diapazonas nuo 7 GHz iki 10 GHz. „U“ formos žymeklio pirmojo varianto spektrinio parašo rezonansiniai dažniai yra 7,11 GHz, 7,49 GHz ir 7,96 GHz. Antrojo varianto 7,66 GHz ir 8,54 GHz. Trečiojo varianto 9,33 GHz, 9,59 GHz ir trečiasis rezonansas viršija pasirinktą modeliavimo dažnių diapazoną.

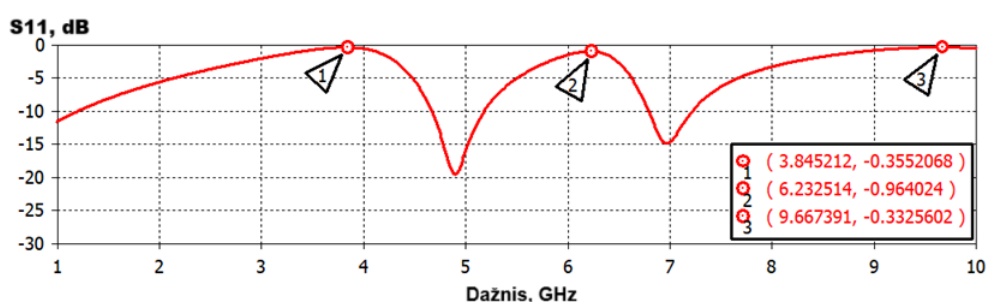
2.1.2. Žiedo formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas

Žiedo formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas atliekamas trimis struktūrų variantams, siekiant įvertinti rezonatorių geometrinių parametrų įtaką dažninėms charakteristikoms. Pirmojo varianto rezonatorių spinduliai didžiausi. Antrojo varianto sumažintas tik išorinio žiedo spindulys, tokiu būdu identifikuojant kurio dažnio rezonansas keičiasi. Taip pat išorinio žiedo spindulio sumažinimas leidžia nustatyti rezonansinio dažnio poslinkį dėl geometrinių variacijų. Trečiojo varianto visų žiedų spinduliai sumažinti. Adaptyvaus tinklelio režimas sudaro smulkesnį tinklelį plonesniuose žieduose. Žiedo formos žymeklių visų variantų modeliavimo tinkleliai pateikti 26 paveiksle.

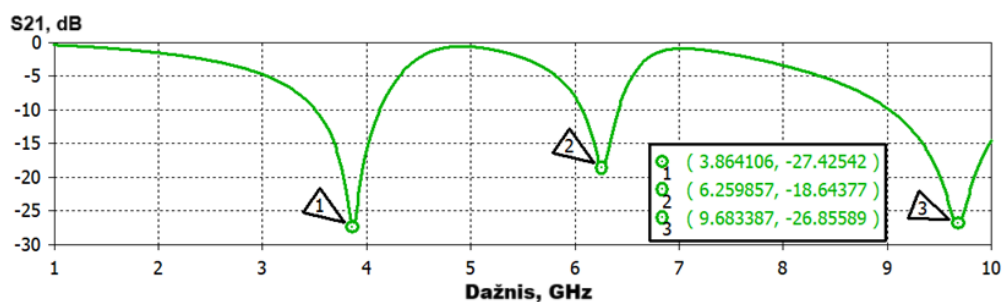


26 pav. Žiedo formos žymeklio (a) pirmojo, (b) antrojo ir (c) trečiojo varianto modelio tinklėlis

Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto modelio baigtinių elementų kiekis – 14928, antrojo – 14815 ir trečiojo – 15405.

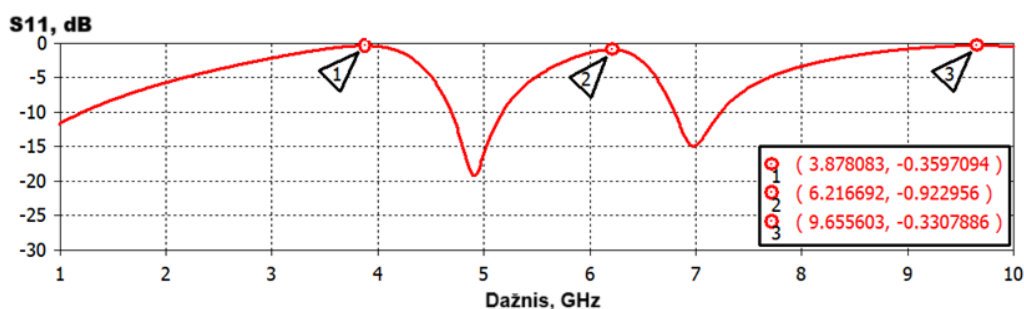


27 pav. Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S11 parametų modeliavimo rezultatai

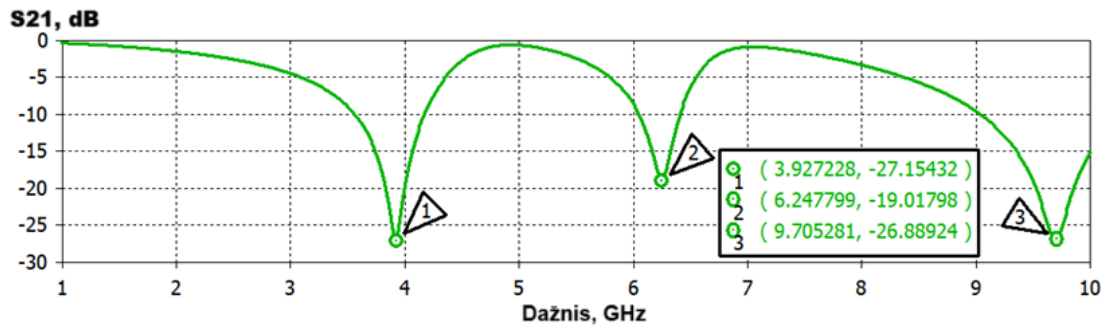


28 pav. Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S21 parametų modeliavimo rezultatai

Pirmojo varianto S parametų modeliavimo rezultatuose galima matyti mažiausius S11 parametų slopinimus (27 pav.) ties 3,9 GHz, 6,2 GHz ir 9,7 GHz. Ties šiais dažniais S21 parametruose pastebimas didžiausias slopinimas (28 pav.) atitinkamai siekiantis -27 dB, -18 dB ir -27 dB.

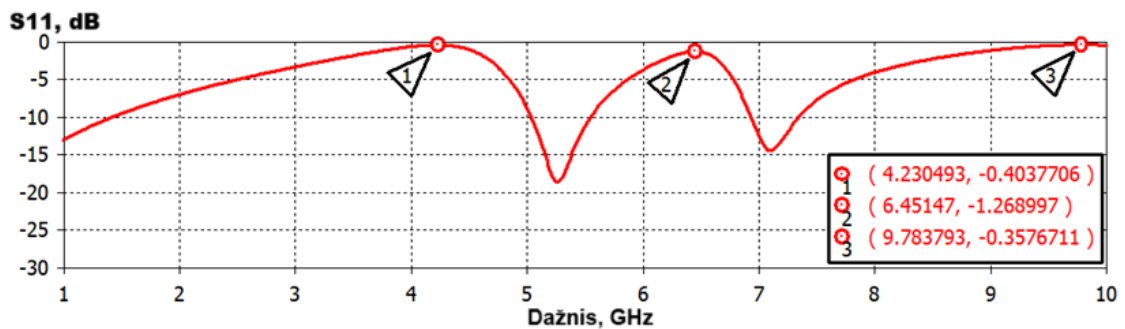


29 pav. Žiedo formos žymeklio antrojo varianto S11 parametų modeliavimo rezultatai

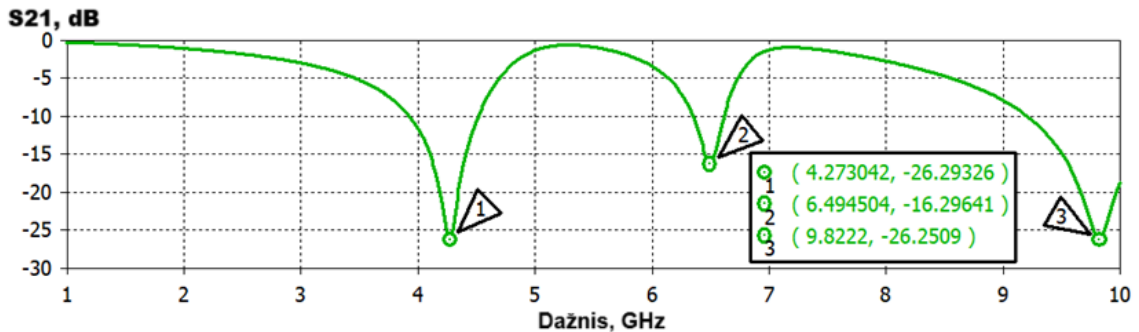


30 pav. Žiedo formos žymeklio antrojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Antrojo žiedo formos žymeklio varianto modeliavimo rezultatuose, S21 diagramoje (30 pav.) pastebimas tik pirmojo rezonansinio dažnio poslinkis link aukštesnio dažnio per 63 MHz. Šį pokytį lėmė išorinio žiedo spindulio sumažinimas per 0,11 mm.

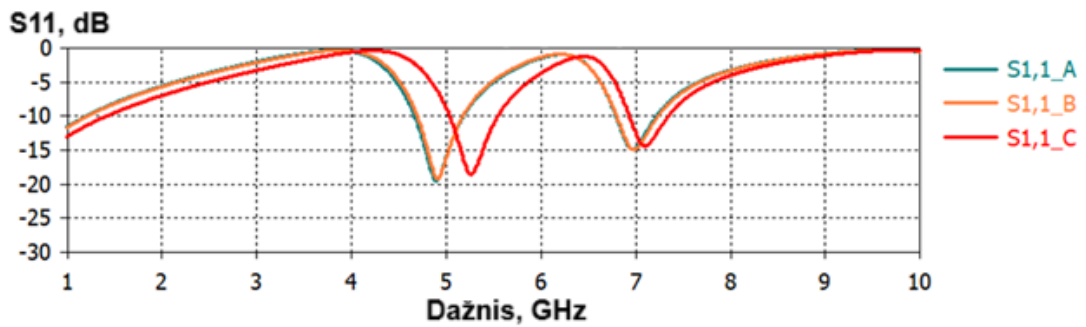


31 pav. Žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S11 parametrų modeliavimo rezultatai

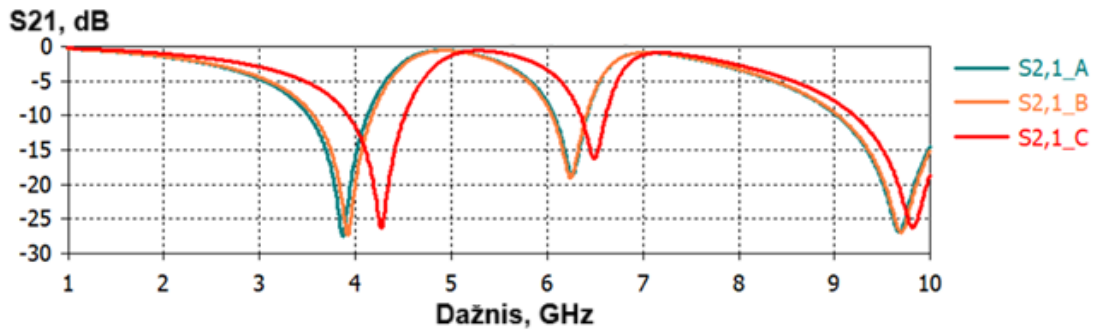


32 pav. Žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S parametrų modeliavimo rezultatuose (31 ir 32 pav.) pastebimas visų rezonansinių dažnių poslinkis link aukštesnio dažnio dėl visų trijų žiedų spindulių sumažinimo. Išorinio žiedo spindulys lyginant su pirmuoju variantu buvo sumažintas per 0,56 mm, todėl S21 parametruose pirmasis rezonansinis dažnis padidėjo per 409 MHz. Vidurinio žiedo spindulys lyginant su pirmuoju variantu buvo sumažintas per 0,24 mm, todėl S21 parametruose antrasis rezonansinis dažnis padidėjo per 235 MHz. Sumažinus vidinio žiedo spindulį per 0,09 mm, S21 parametrų trečiojo rezonanso dažnis padidėjo per 139 MHz. Bendras trijų variantų S11 parametrų palyginimas pateiktas 33 pav. ir S21 parametrų palyginimas 34 pav.



33 pav. Žiedo formos žymeklio visų variantų S11 parametrų modeliavimo rezultatai

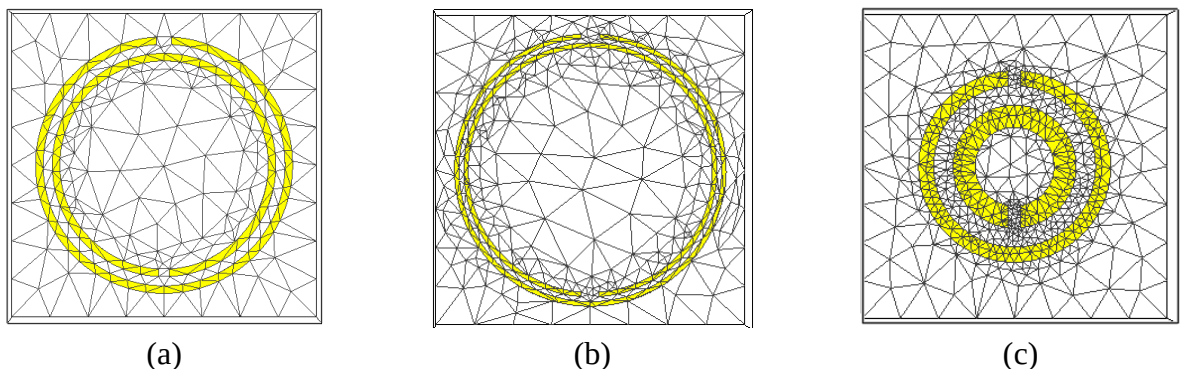


34 pav. Žiedo formos žymeklio visų variantų S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Iš gautų žiedo formos žymeklio trijų variantų S parametrų palyginimo grafikų, galima pastebėti jog žemiausias rezonansinis dažnis priklauso išoriniam – didžiausio spindulio – rezonatoriui, antrasis rezonansinis dažnis – viduriniam ir trečiasis – vidiniam žiedui. Mažinant kiekvieno rezonatoriaus spindulį jo rezonansinis dažnis didėja. Šios formos žymeklio šaltinyje pateiktuose matavimo rezultatuose rezonansiniai dažniai gauti ties 3,4 GHz, 5,2 GHz ir 7,2 GHz naudojant 0,5 mm storio RO4003 substratą [25]. Šiuo atveju pritaikius tokią pačią geometriją ant 1,6 mm storio FR-4 substrato gautas platesnis dažnių diapazonas nuo 3,9 GHz iki 9,8 GHz. Tolimesniam eksperimentiniam matavimui tinkamas tik pirmasis rezonansinis dažnis neviršijantis 6 GHz.

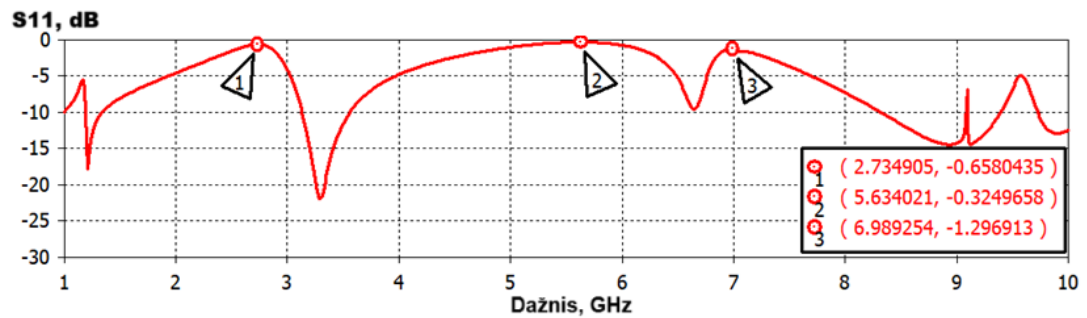
2.1.3. Perskirto žiedo formos žymeklio spektrinio parašo modeliavimas

Perskirto žiedo formos žymeklių S parametrų modeliavimas atliekamas trimis variantais, siekiant įvertinti geometrijos įtaką. Skirtingos geometrijos pasižymi žiedų spindulių skirtumais ir perskyrimo tarpo ilgiu. Modeliavimo programinės įrangos „CST Studio Suite“ adaptivaus tinklelio režimas trečiajam variantui parinko smulkius elementus ir didžiausią jų kiekį.

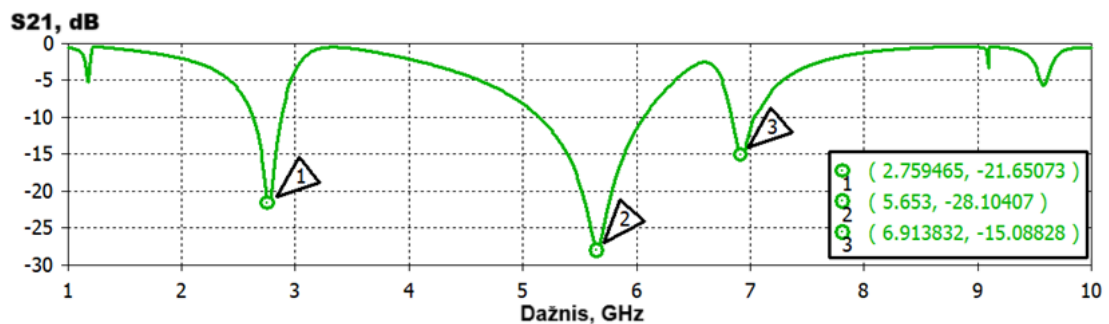


35 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio (a) pirmojo, (b) antrojo ir (c) trečiojo varianto modelio tinklelis

Perskirto žiedo formos žymeklio pirmojo varianto modelio baigtinių elementų kiekis – 5918, antrojo – 12342 ir trečiojo – 12806.

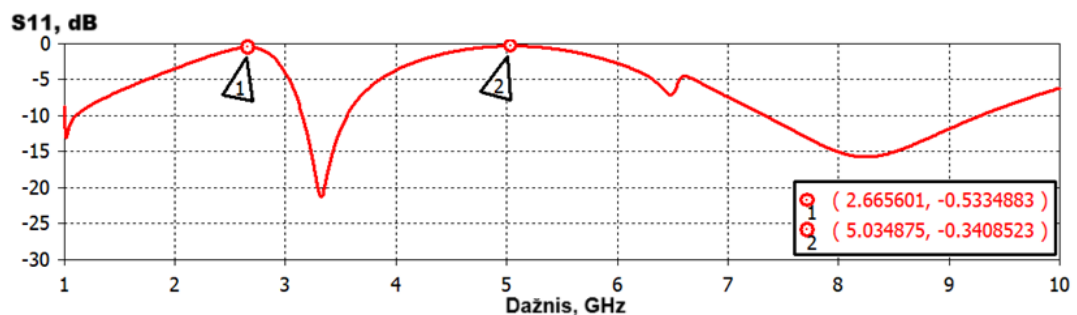


36 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S11 parametų modeliavimo rezultatai

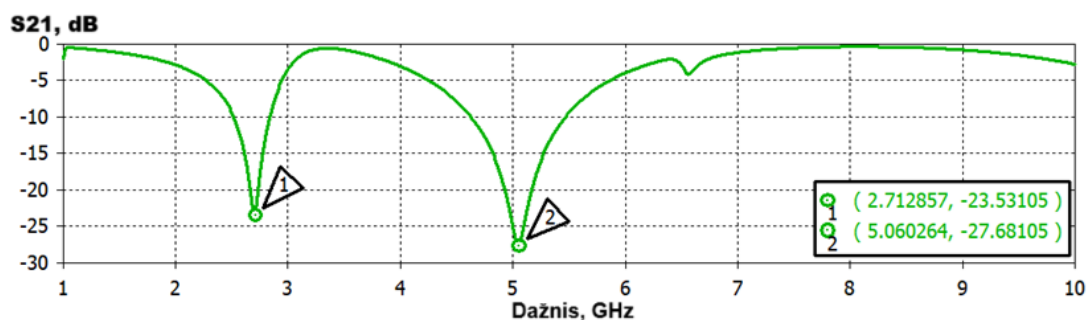


37 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S21 parametų modeliavimo rezultatai

Perskirto žiedo žymeklio pirmojo varianto S parametų modeliavimo rezultatuose (36 ir 37 pav.) gauti trys rezonansiniai dažniai – 2,7 GHz, 5,6 GHz ir 6,9 GHz. S11 parametruose šiuose dažniuose gaunamas mažiausias slopinimas (stipriausias atspindys) ir S21 parametruose gaunamas didžiausias slopinimas (prasčiausias energijos perdavimas iš pirmojo žadinimo prievado į antrąjį).



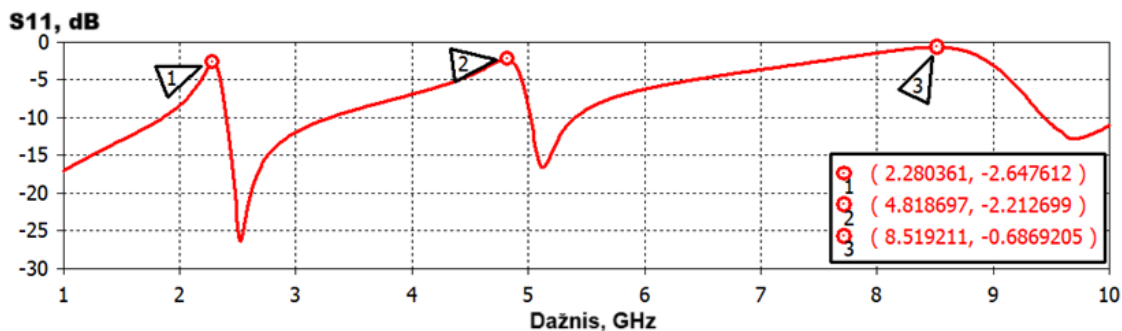
38 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio antrojo varianto S11 parametų modeliavimo rezultatai



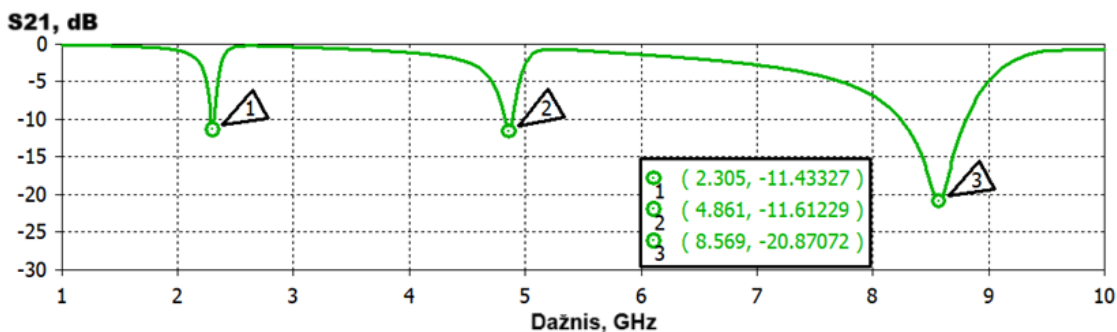
39 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio antrojo varianto S21 parametų modeliavimo rezultatai

Antrojo perskirta žiedo žymeklio varianto S parametrų modeliavimo rezultatai pateikti 38 ir 39 paveiksluose. Šiuo atveju rezonatorių geometrija buvo modifikuota padidinant abiejų žiedų spindulius, sumažinant jų plotį ir padidinant perskyrimo tarpus. Gautuose antrojo varianto S parametrų modeliavimo rezultatuose matyti du rezonansiniai dažniai – ties 2,7 GHz ir 5 GHz.

Trečiojo varianto žiedų spinduliai ir perskyrimo tarpai sumažinti lyginant su pirmuoju variantu. Taip pat padidintas žiedų plotis. S parametrų modeliavimo rezultatai pateikti 40 ir 41 paveiksluose.



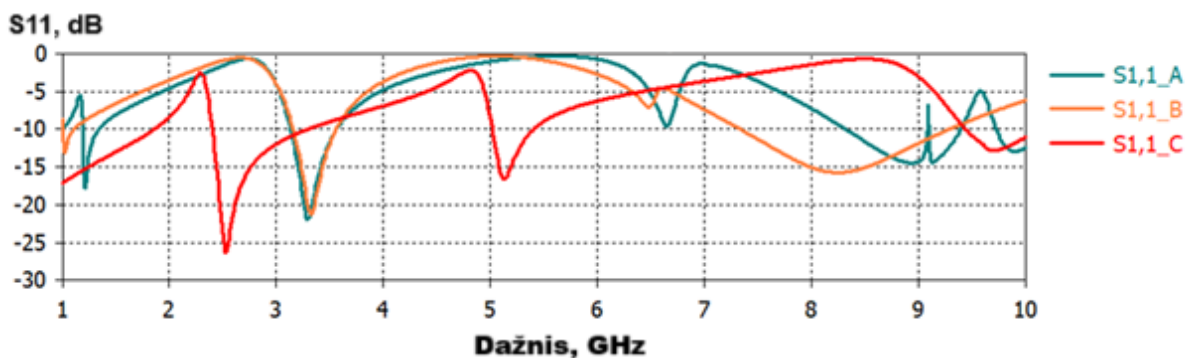
40 pav. Perskirta žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S11 parametrų modeliavimo rezultatai



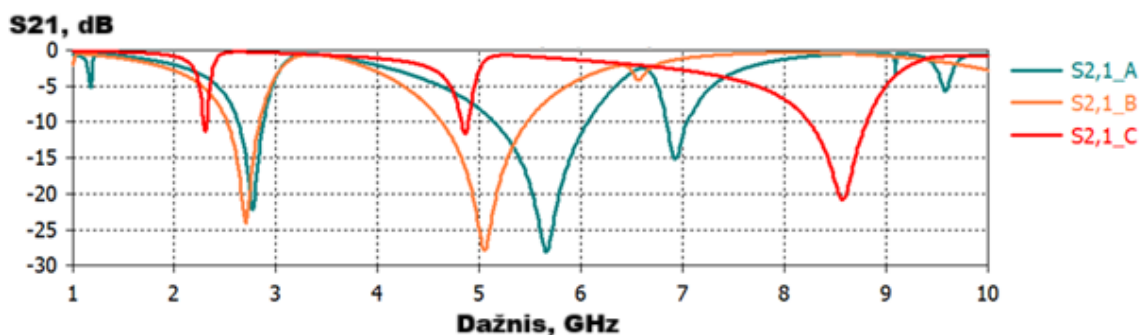
41 pav. Perskirta žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S21 parametrų modeliavimo rezultatai

Trečiojo varianto S parametrų modeliavimo rezultatuose matomi trys rezonansiniai dažniai – ties 2,3 GHz, 4,9 GHz ir 8,6 GHz. Šiuo atveju S21 diagramoje gautų rezonansinių dažnių amplitudės yra aukštesnės lyginant su kitais dviem variantais.

Perskirta žiedo žymeklių visų variantų bendras palyginamasis S parametrų grafikas pateiktas 42 ir 43 paveiksluose.



42 pav. Perskirta žiedo formos žymeklio visų variantų S11 parametrų modeliavimo rezultatai



43 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio visų variantų S21 parametrų modeliavimo rezultatai

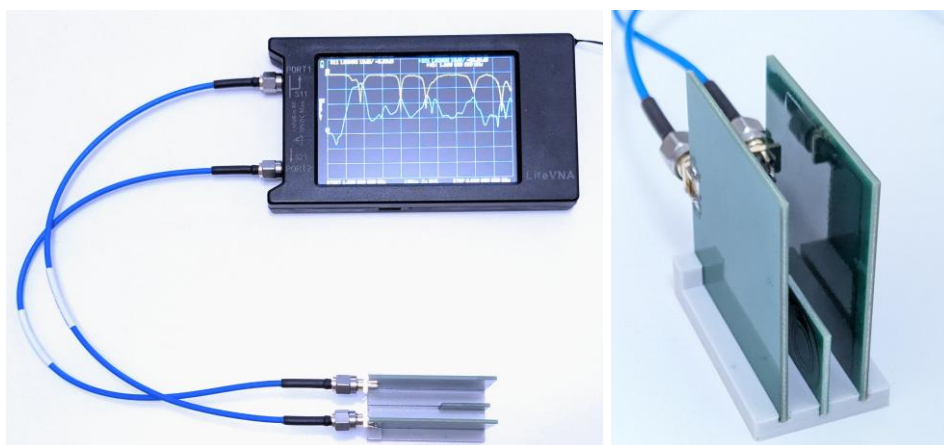
Iš gautų bendrų S parametrų diagramų galima pastebėti jog didesnio spindulio žiedus turintys rezonatoriai pasižymi labiau išskiriamais rezonansais. Tolimesniam eksperimentiniam matavimui perskirto žiedo žymeklių pirmieji du rezonansiniai dažniai turėtų būti aptinkami nes neviršija 6 GHz.

2.2. Žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas

Siekiant patikrinti realų žymeklių nuskaitymo efektyvumą, atliekamas eksperimentinis S parametrų matavimas toms pačioms žymeklių struktūroms. Gautuose „U“ formos žymeklių S parametrų modeliavimo rezultatuose matyti jog rezonansiniai dažniai viršija vektorinio tinklo analizatoriaus matavimo ribas, todėl eksperimentiniai matavimai šioms žymekliams nėra atliekami. Žymekliai pagaminti ant 1,6 mm storio FR-4 substrato. Šis matavimas parodo kokius rezonansinius dažnius įmanoma aptikti naudojant vektorinį tinklo analizatorių ir „patch“ tipo antenas.

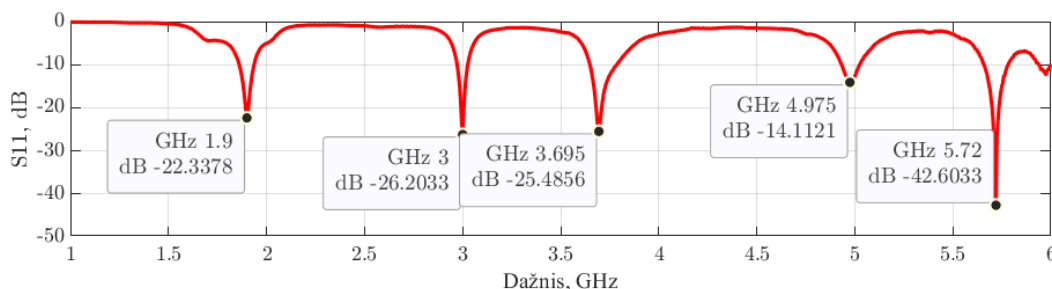
Žymeklių S parametrų matavimas atliekamas naudojant „LiteVNA 64“ vektorinį tinklo analizatorių, kurio dažnių diapazonas yra nuo 50 kHz iki 6,3 GHz. Dinaminis matavimo diapazonas 70 dB dažniams iki 3 GHz ir 50 dB dažniams virš 3 GHz. S11 parametrų triukšmo lygis neviršija -50 dB dažniams iki 3 GHz ir -40 dB dažniams virš 3 GHz. Nuskaitymo sparta 550 taškų per sekundę. Išmatuotų S parametrų rezultatai eksportuojami s2p formatu į atminties kortelę. Matavimų duomenys apdorojami MATLAB programinėje įrangoje naudojant „sparameters“ funkciją iš „RF Toolbox“ plėtinio.

Žadinimo signalo perdavimui žymekliams ir atspindžio priėmimui naudojamos 44,9 mm ilgio ir 34,6 mm pločio „patch“ tipo antenos suformuotos ant 50 mm ilgio ir 50 mm pločio 1,6 mm storio FR-4 substrato. Žymeklis įstatomas tarp dviejų antenų, 7 mm atstumu nuo jų.

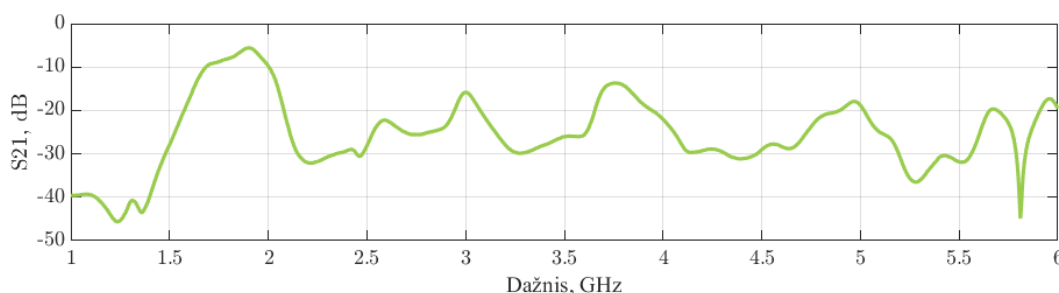


44 pav. Žymeklių S parametrų matavimo sistema

Vektorinio tinklo analizatoriui atliekamas kalibravimas atviro, trumpo ir $50\ \Omega$ apkrovos jungimo metodais. Kalibravimo ir tolimesnio matavimo eigai parinktas dažnių ruožas nuo 1 GHz iki 6 GHz ir imčių kiekis 1001. Matavimo eiga susideda iš atraminių S11 ir S21 parametrų išsaugojimo (be žymeklio), tuomet su žymekliu. Pateikiamas skirtumas matavimo su žymekliu ir atraminio matavimo.



45 pav. Eksperimentinio matavimo be žymeklio S11 parametrų rezultatai

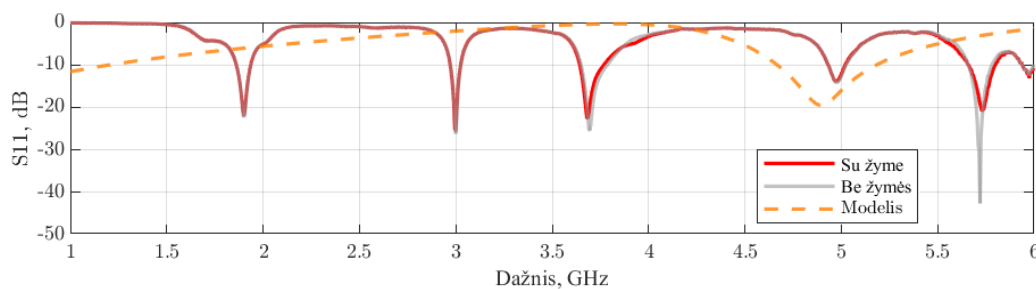


46 pav. Eksperimentinio matavimo be žymeklio S21 parametrų rezultatai

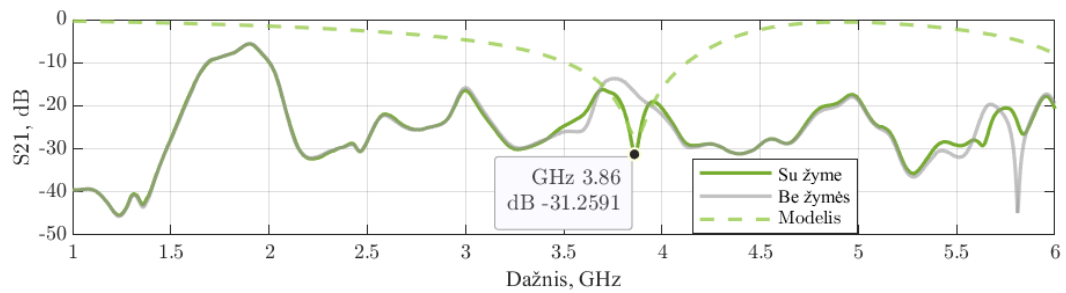
Atraminėse S parametrų diagramose be žymeklio galima pastebėti keletą dažnių kuriuose „patch“ tipo antenos efektyviausiai išspinduliuoja energiją (45 pav.) ir efektyviausiai perduoda energiją iš vektorinio tinklo analizatoriaus pirmojo prievado į antrąjį prievadą (46 pav.). Iš viso gauti 5 dažniai ties kuriais būtų efektyviausiai stebimi žymeklių rezonansai: 1,9 GHz, 3 GHz, 3,7 GHz, 5 GHz ir 5,7 GHz.

2.2.1. Žiedo formos žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas

Žiedo formos žymeklių S parametrų modeliavimo rezultatuose matoma jog iki 6 GHz dažnio (matavimo įrangos) galima aptikti tik pirmąjį rezonansą. Šios formos pirmojo varianto modeliavimo rezultatuose rezonansinis dažnis gautas ties 3,86 GHz. Gautuose pirmojo žiedo formos žymeklio varianto matavimo rezultatuose, S11 charakteristikoje (47 pav.) matomas mažas skirtumas tarp matavimo be žymeklio ir su žymekliu 3,86 GHz dažnyje. Skirtumas geriau matomas S21 charakteristikoje ties 3,86 GHz – matomas kreivės įdubimas tiksliai ties modeliavimo metu gautu rezonansiniu dažniu.

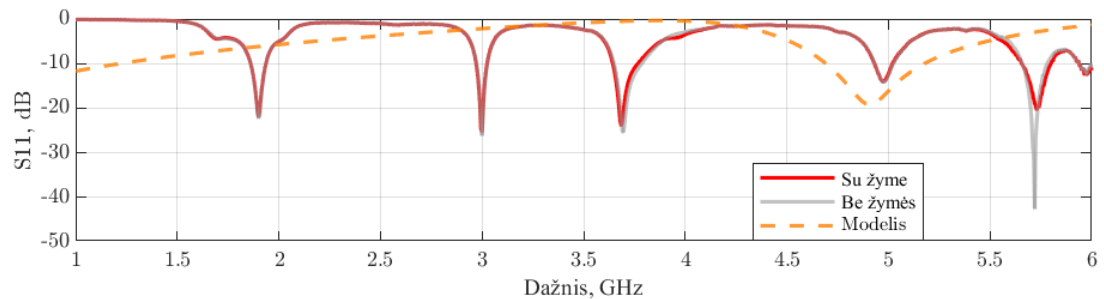


47 pav. Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

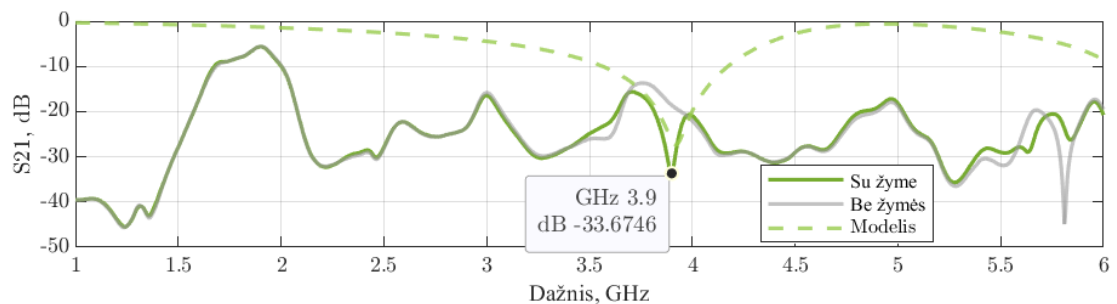


48 pav. Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

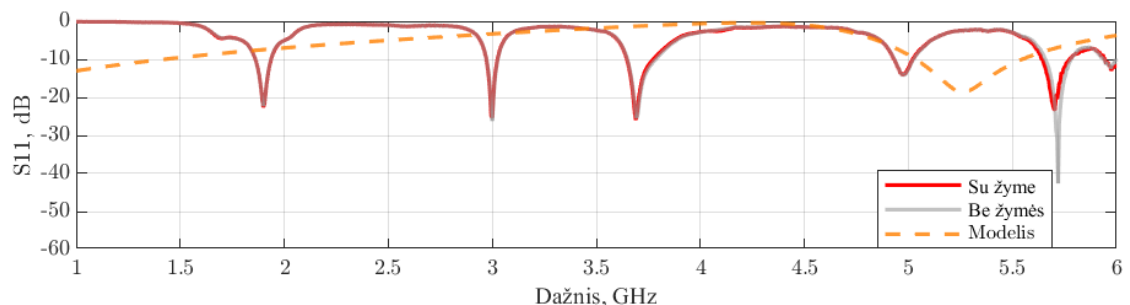
Antrojo varianto modeliavimo rezultatuose rezonansinis dažnis gautas ties 3,9 GHz. Gautuose antrojo žiedo formos žymeklio varianto matavimo rezultatuose, S11 charakteristikoje (49 pav.) nėra išvelgiama aiškiai išsiskiriančios žymeklio spektrinio parašo įtakos. Tačiau S21 charakteristikoje matoma žymeklio įtaka ties 3,9 GHz dažniu, kuriame modeliavimo rezultatai rodo rezonanso įtaką bei eksperimentinio matavimo rezultatai rodo skirtumą lyginant su matavimu be žymeklio.



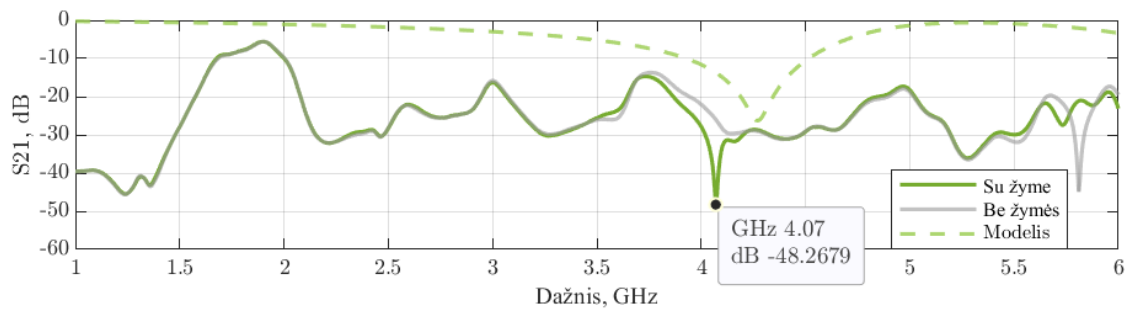
49 pav. Žiedo formos žymeklio antrojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai



50 pav. Žiedo formos žymeklio antrojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai



51 pav. Žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

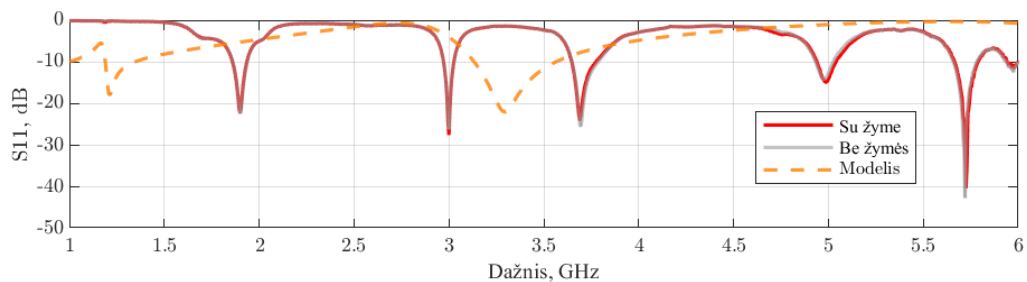


52 pav. Žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

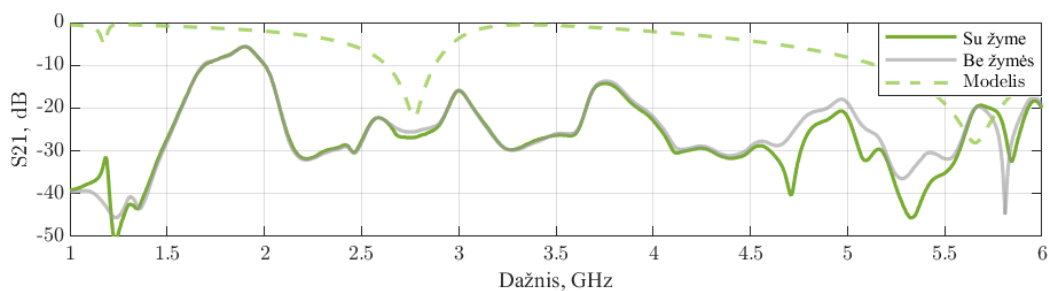
Trečiojo varianto modeliavimo rezultatuose rezonansinis dažnis gautas ties 4,273 GHz, tačiau gautuose matavimo rezultatuose, S11 charakteristikoje (51 pav.) nematyti skirtumo tarp matavimo be žymeklio ir su žymekliu aktualiame 4,3 GHz dažnyje. S21 charakteristikoje ties 4,07 GHz pastebimas aiškus išsiskyrimas tarp matavimo rezultatų su žymekliu ir be jo. Priešingai nei pirmųjų dviejų variantų matavimų rezultatuose, šiuo atveju pastebimas žymus dažnio skirtumas tarp modeliavimo rezultatų ir eksperimentiškai gauto žymeklio atsako – skirtumas 200 MHz.

2.2.2. Perskirtų žiedo formos žymeklių S parametrų charakteristikų eksperimentinis matavimas

Perskirtų žiedo formos žymeklių S parametrų modeliavimo rezultatuose iki 6 GHz dažnio aptinkami pirmieji du rezonansai, kurie taip pat turėtų būti matomi eksperimentiniuose rezultatuose.



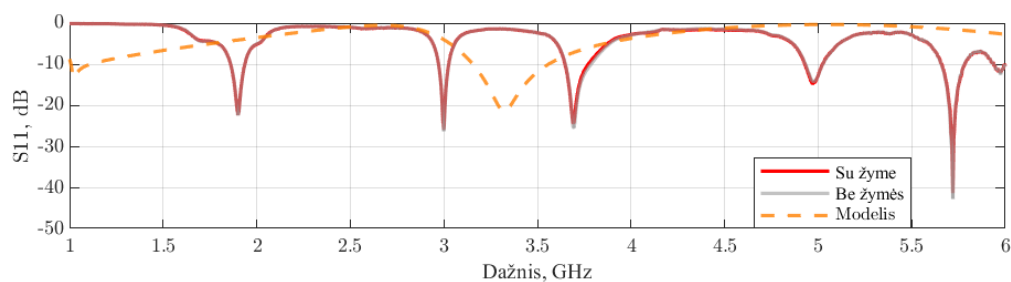
53 pav. Perskirtų žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai



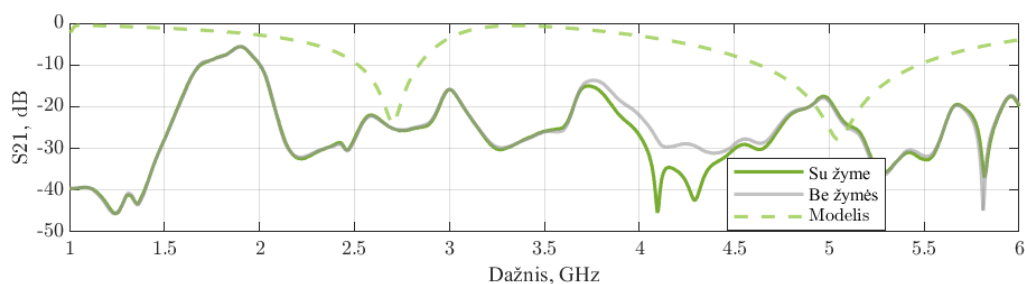
54 pav. Perskirtų žiedo formos žymeklio pirmojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

Perskirtų žiedo formos žymeklio pirmojo varianto modeliavimo rezultatuose pirmasis rezonansinis dažnis gautas ties 2,759 GHz, o antrasis ties 5,653 GHz. Gautuose matavimo rezultatuose, S11 charakteristikoje (53 pav.) nėra pastebimas skirtumas tarp matavimo be žymeklio ir su žymekliu.

Skirtumas matomas S21 charakteristikoje (54 pav.) ties 4,7 GHz – matomas kreivės įdubimas, nors modeliavimo rezultatuose antrasis rezonansas pasireiškia aukštesniame dažnyje.

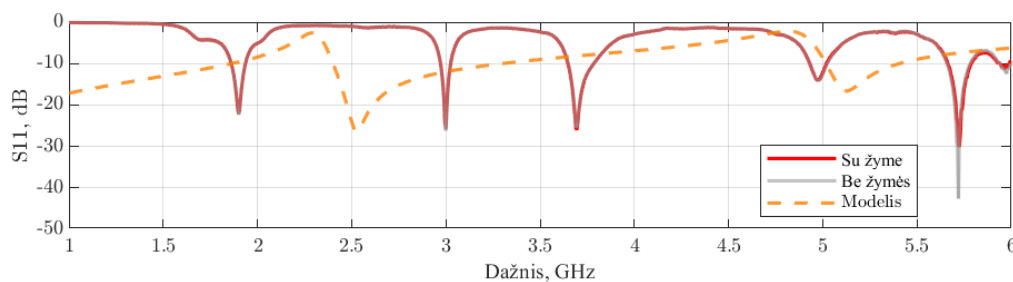


55 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio antrojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

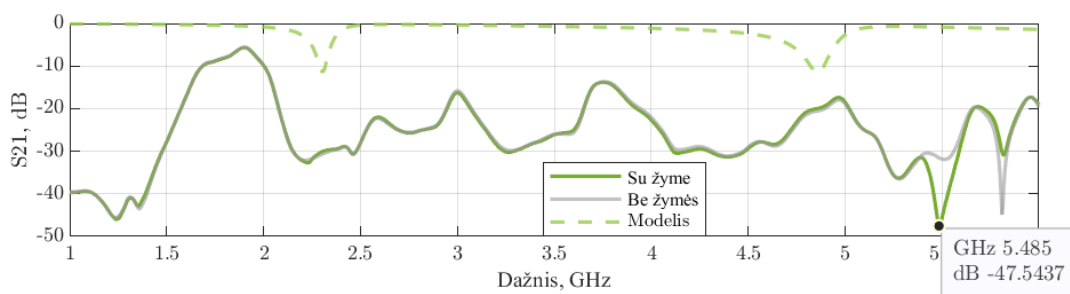


56 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio antrojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

Antrojo varianto eksperimentiniai matavimo rezultatai neatitinka modeliavimo rezultatų, tačiau pastebima antrojo rezonanso įtaka matavimuose su žymekliu, ypač dažnių ruože nuo 4,1 GHz iki 4,4 GHz.



57 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S11 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai



58 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio trečiojo varianto S21 parametrų eksperimentinio matavimo rezultatai

Trečiojo varianto modeliavimo rezultatuose rezonansai nėra aukštos amplitudės, todėl eksperimentiniuose matavimuose jie taip pat nėra aiškiai išsiskiriantys. Eksperimentinio matavimo rezultatų skirtumas su žymekliu ir be jo matomas tik ties 5,485 GHz dažniu.

Eksperimentiniai žymeklių S parametrų matavimai atlikti naudojant „LiteVNA 64“ vektorinį grandinių analizatorių ir specialiai suprojektuotas „patch“ antenas ant FR-4 substrato parodė, jog naudojant šią sistemą galima aptikti dalį žymeklių rezonansų dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 6 GHz S21 parametruose, tačiau S11 parametrų matavimo rezultatuose sudėtinga išvelgti pokyčius įstačius įvairių tipų žymeklius tarp antenų.

Matavimų rezultatai rodo, kad žiedo formos žymeklių rezonansinius dažnius galima aptikti, tačiau tik esant gerai išreikštomis charakteristikoms - pavyzdžiui, pirmojo varianto atveju 3,865 GHz dažnis buvo aiškiai matomas S21 charakteristikoje, beveik visiškai sutampant su modeliavimo rezultatais. Antrojo varianto atveju stebėtas nedidelis 27 MHz poslinkis, o trečiasis variantas parodė reikšmingą 200 MHz skirtumą tarp modeliavimo ir eksperimento, kas rodo šios struktūros jautrumą gamybos tikslumui.

Perskirtų žiedų atveju, nors modeliavimas numatė du rezonansus, eksperimentuose jie buvo pastebimi tik dalinai arba pasislinkę dažnių ašyje. Pavyzdžiui, pirmojo varianto antrasis rezonansas, kuris modeliavime buvo 5,653 GHz, eksperimente pasireiškė kaip įdubimas ties 4,7 GHz. Antrojo varianto atveju rezonansas buvo stebimas, tačiau ne tiksliai prognozuotoje vietoje, o trečiasis variantas rodė tik silpną požymį ties 5,5 GHz. Šie skirtumai gali atsirasti dėl žymeklių gamybos netikslumų, ypačiai dėl perskyrimo tarpelio pločio.

2.3. Žymeklių spektrinių parašų rezonansų artinimo galimybės

Realiomis sąlygomis žymeklių spektriniais parašams gali būti taikomi leistinos dažnių juostos apribojimai, pavyzdžiui dėl skaitytuvo įrangos matavimo diapazono ar siekiant išvengti kitų įrenginių spinduliuojamų elektromagnetinių bangų trikdžių. Dėl šios priežasties, žymeklių formavimas turi pasižymėti rezonansinių dažnių artinimo galimybėmis be neigiamo poveikio spektriniam parašui, tokio kaip rezonansinių dažnių susiliejimas. Rezonansinių dažnių artinimas taip pat leidžia suformuoti didesnę kiekį rezonatorių ant vieno žymeklio. Siekiant nustatyti pasirinktų žymeklių dizainų rezonansinių dažnių artinimo galimybes, „CST Studio Suite“ aplinkoje atliekama kiekvieno dizaino geometrijos modifikacija ir spektrinio parašo modeliavimas, su tikslu gauti spektrinį parašą dažnių diapazone nuo 3 GHz iki 5 GHz. „CST Studio Suite“ programinė įranga turi optimizavimo įrankį kuris pagal nustatytą tikslą keičia geometriją, tačiau studentiškoje licencijoje šis įrankis yra neprieinamas, todėl geometrijos modifikacijos atliekamos rankiniu būdu.

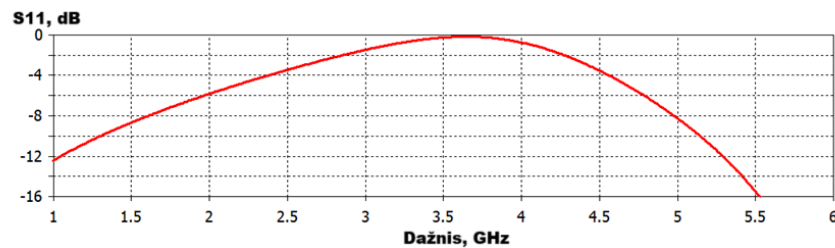
Spektrinio parašo rezonansinių dažnių ir geometrijos kriterijai:

1. dažnių diapazonas nuo 3 GHz iki 5 GHz;
2. substratas 1,6 mm FR-4;
3. minimalus takelio plotis 0,15 mm (atsižvelgiant į gamybos galimybes);
4. minimalus tarpas tarp takelių 0,15 mm (atsižvelgiant į gamybos galimybes);
5. substrato matmenys 20 mm ilgio ir 20 mm pločio.

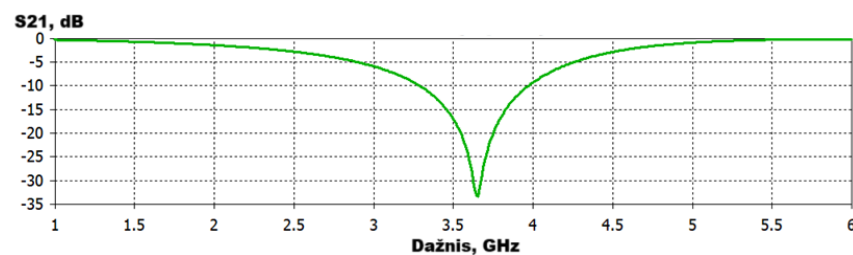
Pirmojo „U“ formos žymeklio dizaino geometrijos modifikacija buvo atliekama pradedant nuo vieno rezonatoriaus, kurio ilgis padidintas (lyginant su prieš tai atliktais modeliavimais) siekiant žemesnio rezonansinio dažnio. Parinktas struktūros ilgis (13 pav. matmuo „w“) 34,85 mm.



59 pav. „U“ formos žymeklio rezonatoriaus struktūra suformavus vieną (a) rezonatorių ir (b) du rezonatorius

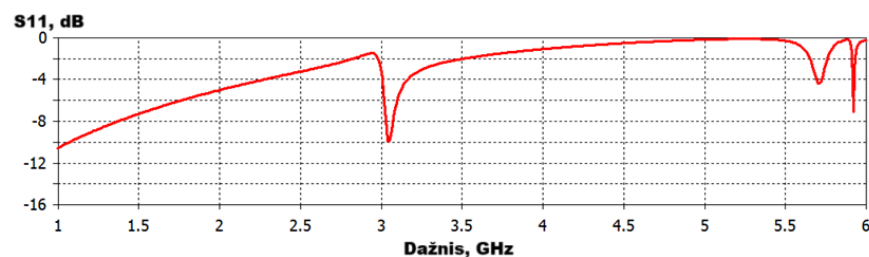


60 pav. „U“ formos žymeklio S11 parametų modeliavimo rezultatai suformavus vieną rezonatorių

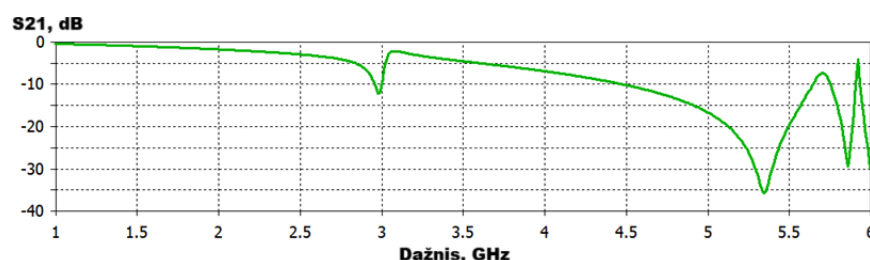


61 pav. „U“ formos žymeklio S21 parametų modeliavimo rezultatai suformavus vieną rezonatorių

Atlikus S parametų modeliavimą kuomet suformuotas tik vienas rezonatorius (59a pav.), gautas rezonansas ties 3,65 GHz. Sekantis rezonatorius formuojamas 7 mm atstumu nuo pirmojo ir jo ilgis sumažintas per 4 mm siekiant aukštesnio rezonanso.



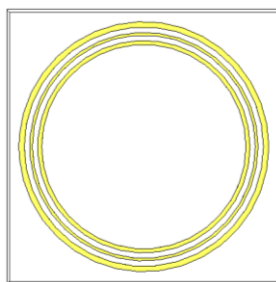
62 pav. „U“ formos žymeklio S11 parametų modeliavimo rezultatai suformavus du rezonatorius



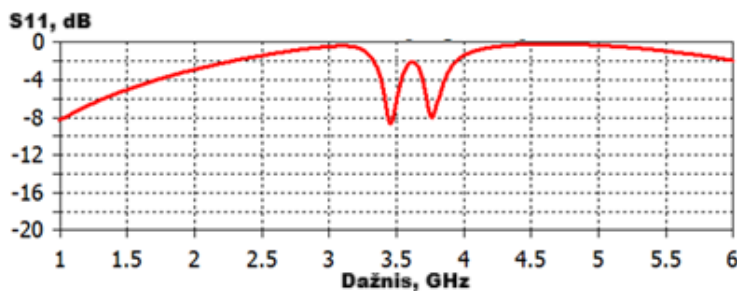
63 pav. „U“ formos žymeklio S21 parametų modeliavimo rezultatai suformavus du rezonatorius

Atlikus modeliavimą dviem suformuotiems rezonatoriams, pastebimas dažnių susiliejimas ir spektrinis parašas įgauna žymekliui nebūdingą charakteristiką. Pagal atliktus geometrijos modifikacijas ir gautus modeliavimo rezultatus galima teigti jog „U“ formos žymeklio spektrinio parašo koregavimas nėra paprastas procesas, tačiau galimai įmanomas naudojant automatinius optimizavimo įrankius, kurių „CST Studio Suite“ studentiškoje licencijoje nėra galimybės naudoti.

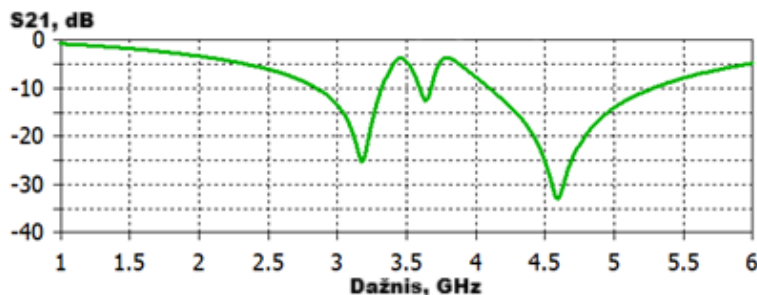
Žiedo formos žymeklio rezonansinių dažnių artinimas atliktas didinant žiedo spindulį, tokiu būdu mažėja jo rezonansinis dažnis ir atvirkščiai. Visų pirma padidinus išorinį žiedo spindulį iki 9,3 mm buvo gautas pirmasis rezonansinis dažnis ties 3,2 GHz. Atitinkamai priartinus vidurinį ir vidinį žiedus prie išorinio ir išlaikant gamybos minimalius atstumus buvo gautas antrasis rezonansinis dažnis ties 3,6 GHz ir trečiasis ties 4,6 GHz. Išorinio žiedo plotis parinktas 0,4 mm, vidurinio 0,2 mm ir vidinio 0,3 mm. Šios struktūros S parametrų modeliavimo rezultatai pateikti 65 ir 66 pav.



64 pav. Žiedo formos žymeklio geometrija po rezonansų artinimo



65 pav. Žiedo formos žymeklio S11 parametrų modeliavimo rezultatai po rezonansų artinimo



66 pav. Žiedo formos žymeklio S21 parametrų modeliavimo rezultatai po rezonansų artinimo

Atlikus žiedo formos žymeklio rezonansinių dažnių artinimą ir modeliavimą, S parametrų rezultatuose matomi trys rezonansai išsidėstę dažnių diapazone nuo 3,2 GHz iki 4,6 GHz. Kiekvieno rezonanso amplitudės S21 diagramoje atitinkamai siekia -25 dB, -13 dB ir -33 dB. Šios formos žymeklio spektrinio parašo siaurinimas nėra sudėtingas, nes rezonansiniai dažniai priklauso nuo žiedo spindulio. Atsižvelgiant į gautus modeliavimo rezultatus, rezonansiniai dažniai nesusilieja juos

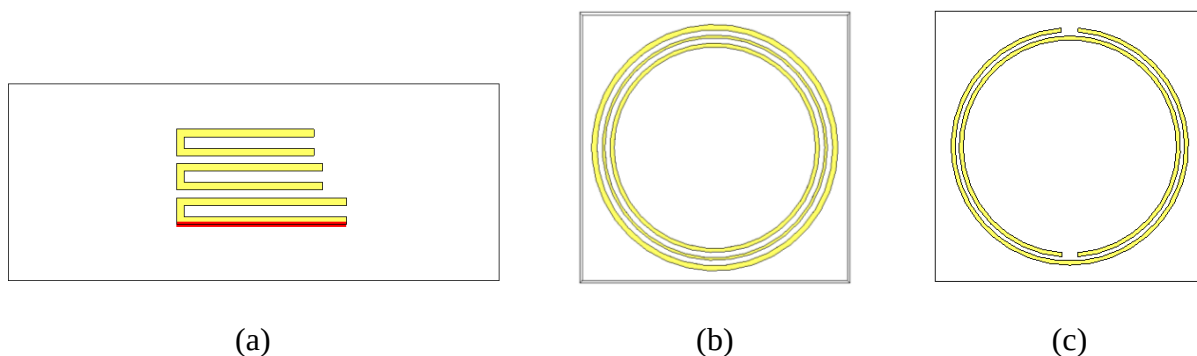
priartinus į dažnių diapazoną nuo 3 GHz iki 5 GHz, todėl šiems žymekliams taip pat gali būti didinamas rezonatorių kiekis tokiu būtu didinant žymeklio skyrą.

Perskirto žiedo formos žymeklio rezonansai prieš tai gautuose modeliavimo rezultatuose, ypač antrojo varianto, yra artimi dažnių diapazonui nuo 3 GHz iki 5 GHz. Šio dizaino žymeklis pasižymi dviem rezonansiniais dažniais, tačiau formuojant didesnę kiekį struktūrų ant žymeklio kaip nurodyta [26] šaltinyje, galima pasiekti didesnę skyrą.

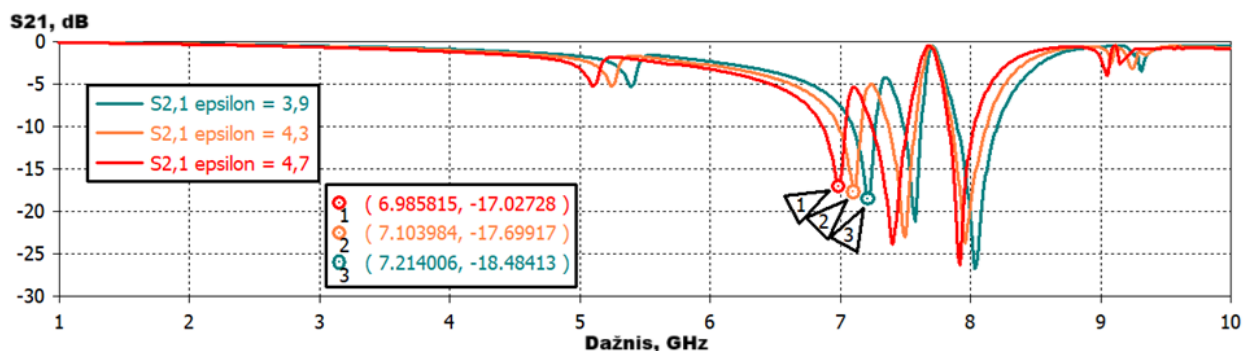
Iš trijų apžvelgtų dizainų, spektrinio parašo siaurinimas arba rezonansinių dažnių artinimas yra paprasčiausias žiedo formos žymekliui bei pasižymi atsparumu dažnių susiliejimui.

2.4. Substrato dielektrinės skvarbos nuokrypio įtaka pasirinktų dizainų žymeklių spektriniams parašams

Spausdintinio montažo plokščių gamybos procesuose kuomet yra naudojamas FR-4 substratas, galimi substrato dielektrinės skvarbos nuokrypiai. Šie nuokrypiai gali daryti įtaką žymeklio spektriniam parašui, todėl tokio žymeklio atpažinimas gali būti sudėtingesnis. Siekiant nustatyti substrato dielektrinės skvarbos nuokrypio įtaką pasirinktų dizainų žymeklių spektriniam parašui, atliekamas modeliavimas naudojant skirtingas FR-4 substrato dielektrinės skvarbos vertes. Parenkamos vertės nukrypusios nuo numatytosios $\varepsilon = 4,3$ vertės per 10 %, t. y. $\varepsilon = 3,9$ ir $\varepsilon = 4,7$. Pirmiausiai atliekamas modeliavimas „U“ formos žymekliui.



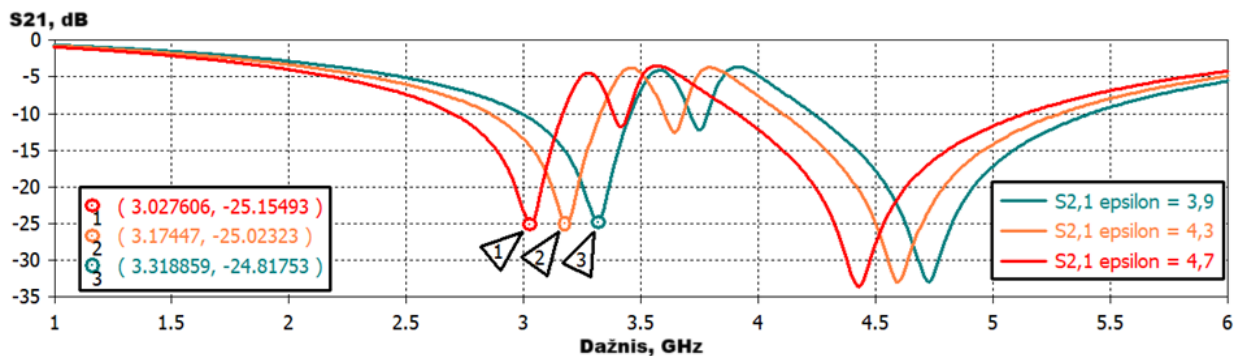
67 pav. Pasirinkti (a) „U“ formos, (b) žiedo ir (c) perskirto žiedo dizainai substrato dielektrinės skvarbos nuokrypio įtakai nustatyti



68 pav. „U“ formos žymeklio S_{21} parametrų modeliavimo rezultatai po substrato dielektrinės skvarbos keitimo

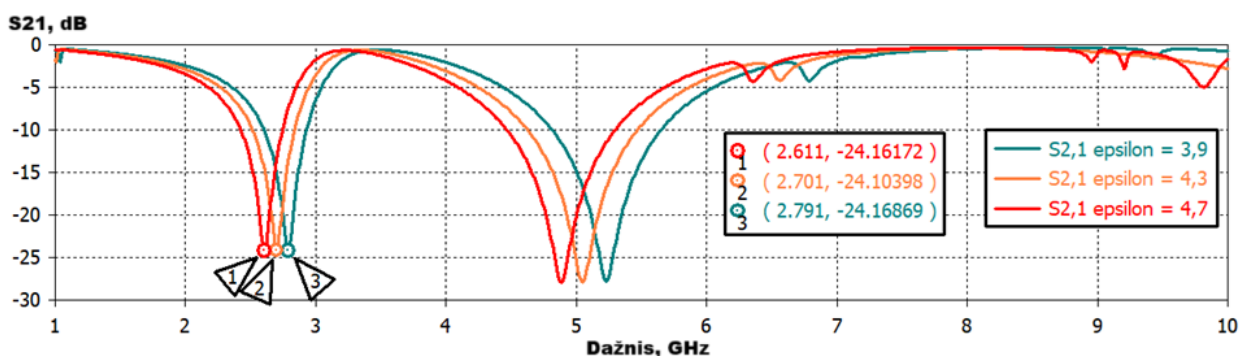
Iš gautų modeliavimo rezultatų galima pastebėti jog substrato dielektrinės skvarbos nuokrypis per 10 % nuo numatytosios vertės turi didelę įtaką žymeklio spektrinio parašo rezonansiniams dažniams.

Modeliavimo metu padidinus FR-4 substrato dielektrinę skvarbą „U“ formos žymekliui nuo 3,9 iki 4,3 gautas pirmojo rezonanso poslinkis į žemesnę dažnį per 110 MHz ir atitinkamai padidinus nuo 4,3 iki 4,7, pirmojo rezonanso poslinkis lygus 120 MHz.



69 pav. Žiedo formos žymeklio S21 parametrų modeliavimo rezultatai po substrato dielektrinės skvarbos keitimo

Modeliavimo metu žiedo formos žymekliui padidinus FR-4 substrato dielektrinę skvarbą nuo 3,9 iki 4,3 gautas pirmojo rezonanso poslinkis į žemesnę dažnį per 130 MHz ir atitinkamai padidinus nuo 4,3 iki 4,7, pirmojo rezonanso poslinkis lygus 180 MHz.



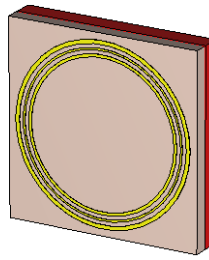
70 pav. Perskirto žiedo formos žymeklio S21 parametrų modeliavimo rezultatai po substrato dielektrinės skvarbos keitimo

Perskirto žiedo modeliavimo rezultatuose padidinus FR-4 substrato dielektrinę skvarbą nuo 3,9 iki 4,3 gautas pirmojo rezonanso poslinkis į žemesnę dažnį per 90 MHz ir atitinkamai padidinus nuo 4,3 iki 4,7, pirmojo rezonanso poslinkis taip pat lygus 90 MHz.

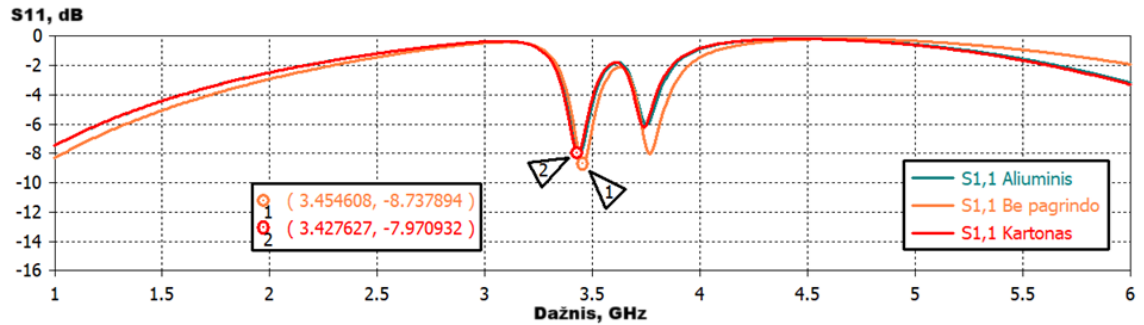
Iš šių rezultatų galima teigti jog substrato dielektrinė skvarba turi išlikti vienoda visiems pagamintiems žymekliams, priešingu atveju spektrinio parašo atpažinimas ir žymeklio identifikavimas gali tapti sudėtingas.

2.5. Žiedo formos žymeklio tvirtinimo pagrindo įtaka spektriniam parašui

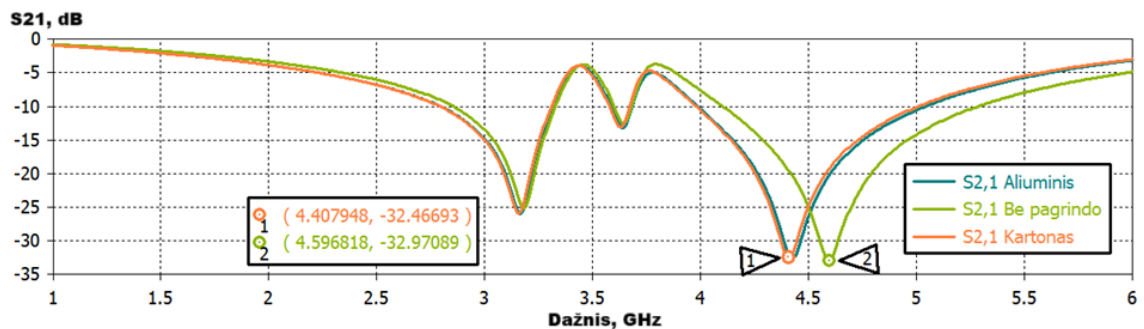
Pritaikant belusčius žymeklius objektų sekimui ar kitam panaudojimui, jie turi būti pritvirtinti prie sekamo objekto. Jeigu sekamas objektas yra pakuotė, tuomet būtina įvertinti pakuotės įtaką žymeklio spektriniam parašui. Tuo tikslu atliekamas žymeklio spektrinio parašo modeliavimas keičiant žymeklio tvirtinimo pagrindą. Parinktos dvi galimos pagrindo medžiagos: kartonas ir aliuminis iš „CST Studio Suite“ substratų bibliotekos. Kartono storis parinktas 2 mm ir dielektrinė skvarba 2,31. Aliuminio storis 0,3 mm ir dielektrinė skvarba 9,4.



71 pav. Suformuotas pagrindas kitoje žymeklio pusėje (raudona spalva)



72 pav. S11 parametrų modeliavimas be pagrindo ir pritaikius aliuminio ir kartono pagrindus



73 pav. S21 parametrų modeliavimas be pagrindo ir pritaikius aliuminio ir kartono pagrindus

Iš gautų modeliavimo rezultatų matomas S11 charakteristikoje aukštesnės amplitudės atsakas su pagrindu iki 4,5 GHz. S21 charakteristikoje trečiasis rezonansinis dažnis pritaikius pagrindą sumažėjo per 200 MHz, todėl galima teigti jog šių dizainų žymeklių pritvirtinimas ant 2 mm kartono ar 0,3 mm aliuminio pagrindo daro įtaką spektriniam parašui virš 3,5 GHz.

2.6. Metodinės dalies apibendrinimas

Atsižvelgiant į atliktus spektrinio parašo modeliavimo rezultatus trims dizainams ir kiekvienam iš jų trims geometrijos variantams, galima teigti jog belusčio žymeklio forma smarkiai įtakoja žymeklio spektrinį parašą, jo rezonansinius dažnius ir rezonansų amplitudes. Geometrijos variantų modeliavimo rezultatai rodo jog to pačio dizaino žymeklis gali turėti skirtingus spektrinius parašus, jeigu atskirų rezonatorių matmenys bent kiek skiriasi. Spektrinis parašas geriausiai atvaizduojamas S21 charakteristikose, ties žemiausiais (didžiausio slopinimo) taškais. S11 charakteristikoje spektrinio parašo rezonansiniai dažniai nėra aiškiai išreikšti ir užima plačią dažnių juostą, todėl yra sudėtinga nuskaityti naudojant matavimo įrangą. Taip pat aukštas žymeklių gamybos tikslumas privalo būti užtikrintas norint išgauti atsikartojančius spektrinius parašus. Siekiant detaliau ištirti šių žymeklių nuskaitymo ir identifikavimo galimybes, reikėtų atlikti belusčių žymeklių nuskaitymo metodų tyrimą.

Išvados

1. Atlikus mokslinės ir inžinerinės literatūros analizę, susijusią su belusčių žymių formavimo metodais ir principais, buvo nustatyta, kad belustės RFID žymės gali būti taikomos objektų sekimui kur nėra tiesioginio matymo ir yra reikalingas mažas informacijos kiekis. Pasirinkta tirti tris iš visų apžvelgtų dizainų tipų – „U“ formos, žiedo formos ir perskirta žiedo formos žymeklius veikiančius dažnių diapazone nuo 2,5 GHz iki 6 GHz ir turinčius du arba tris rezonansinius dažnius. Siekiant įvertinti geometrijos variacijos įtaką spektriniam parašui, parinkta po tris kiekvieno dizaino variantus. Jų geometrijos pritaikytos 1,6 mm storio FR-4 substratui, kurio matmenys „U“ formos žymekliui yra 20 mm ilgio, 40 mm pločio ir kitiems žymekliams 20 mm ilgio ir 20 mm pločio.
2. Siekiant nustatyti pasirinktų trijų tipų belusčių žymeklių spektrinius parašus, atliktas S11 ir S21 parametrų modeliavimas „CST Studio Suite“ aplinkoje, dažnių diapazone nuo 1 GHz iki 10 GHz, suformuojant žadinimo prievadus žymeklio rezonatoriaus pusėje ir priešingoje pusėje. Žymeklių spektriniai parašai aiškiausiai atsispindi S21 charakteristikose. „U“ formos žymeklio pirmojo geometrijos varianto aukščiausios amplitudės trys rezonansiniai dažniai gauti diapazone nuo 7 iki 8 GHz. Kitų „U“ formos variantų rezonatoriai trumpesni ir jų veikimo dažniai gauti iki 10 GHz. Žiedo formos žymeklių pirmasis rezonansas gautas 3,9 GHz dažnyje ir tarpai tarp rezonansų siekia 2 GHz. Keičiant žiedo formos žymeklio geometriją per 1 mm, gautas spektrinio parašo poslinkis per 400 MHz. Perskirta žiedo formos žymeklių spektriniai parašai gauti nuo 2 GHz iki 5 GHz ir aukščiausia rezonansų amplitudė didžiausio spindulio variantuose.
3. Atsižvelgiant į literatūros apžvalgoje susiformuotas belusčių žymeklių tyrimo kryptis ir į pirminių modeliavimo rezultatų „CST Studio Suite“ aplinkoje duomenis, buvo paruošta eksperimentų bazė apimanti tos pačios geometrijos žymeklių gamybą, „LiteVNA 64“ grandinių analizatoriaus matavimo įrangos pasirinkimą, „patch“ tipo antenų naudojimą kaip žadinimo prievadus ir jų tvirtinimą 7 mm atstumu nuo žymeklio. Parinktas matavimo dažnių diapazonas nuo 1 GHz iki 6 GHz su 1000 imčių ir S11 ir S21 parametrų dažnio – amplitudės charakteristikos analizavimas.
4. „U“ formos žymekliui eksperimentinis spektrinio parašo matavimas neatliktas dėl viršijamo matavimo įrangos dažnių diapazono. Žiedo formos žymeklio pirmojo varianto eksperimentinio matavimo rezultatai geriausiai atitiko modeliavimo rezultatus S21 charakteristikos 3,96 GHz dažnyje. Kitų žiedo formos variantų matavimo rezultatai taip pat rodo spektrinio parašo įtaką S21 charakteristikoje, tačiau lyginant su modeliavimo rezultatais, rezonansiniai dažniai skiriasi iki 200 MHz. Perskirta žiedo formos žymeklių eksperimentiniai S parametrų matavimo rezultatai rodo aiškią spektrinio parašo įtaką sprendžiant iš kritimų atsiradimo S21 charakteristikoje, tačiau lyginant su modeliavimo rezultatais, dažnių skirtumas siekia 1 GHz.
5. Siekiant suartinti žymeklių spektrinių parašų rezonansinius dažnius buvo keičiama dizainų rezonatorių geometrija. Keičiant „U“ formos žymeklio geometriją 3 GHz dažniui pastebėta jog suformavus antrąjį rezonatorių, rezonansai susilieja ir žymeklis praranda savo spektrinį parašą. Žiedo formos žymekliui geriausiai pavyko suartinti 3 rezonansinius dažnius į diapazoną nuo 3 GHz iki 5 GHz. Atlikus FR-4 substrato dielektrinės skvarbos variacijos per 10 % įtakos modeliavimą pastebėtas spektrinių parašų poslinkis visiems išbandytiems dizainams.

Literatūros sąrašas

- [1] World Trade Organization, “Global Value Chain Development Report 2023: Resilient and Sustainable GVCs in Turbulent Times,” 2023.
- [2] Y. Wang and S. Pettit, Eds., *Digital supply chain transformation: emerging technologies for sustainable growth*. Cardiff University Press, 2022. doi: 10.18573/book8.
- [3] IHL Group, “Retail Inventory Distortion: The Good, the Bad, the Ugly,” 2023.
- [4] D. M. Dobkin, *The RF in RFID*. Elsevier, 2008. doi: 10.1016/B978-0-7506-8209-1.X5001-3.
- [5] G. Xu, “The Research and Application of RFID Technologies in Highway’s Electronic Toll Collection System,” in *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, IEEE, Oct. 2008, pp. 1–4. doi: 10.1109/WiCom.2008.692.
- [6] K. Finkenzer, *RFID Handbook*. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9780470665121.
- [7] E. Perret, *Radio Frequency Identification and Sensors*. Wiley, 2014. doi: 10.1002/9781119054016.
- [8] F. Villa-Gonzalez, R. Bhattacharyya, T. Athauda, S. E. Sarma, and N. C. Karmakar, “Detecting Breaks in Cold Chain Integrity Using Chipless RFID Time–Temperature Sensors,” *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 18, pp. 17808–17818, Sep. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3194249.
- [9] T. Noor, A. Habib, Y. Amin, J. Loo, and H. Tenhunen, “High-density chipless RFID tag for temperature sensing,” *Electron Lett*, vol. 52, no. 8, pp. 620–622, Apr. 2016, doi: 10.1049/el.2015.4488.
- [10] Y. Feng, L. Xie, Q. Chen, and L.-R. Zheng, “Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging,” *IEEE Sens J*, vol. 15, no. 6, pp. 3201–3208, Jun. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2385154.
- [11] S. Preradovic, I. Balbin, N. C. Karmakar, and G. F. Swiegers, “Multiresonator-Based Chipless RFID System for Low-Cost Item Tracking,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 57, no. 5, pp. 1411–1419, May 2009, doi: 10.1109/TMTT.2009.2017323.
- [12] Herrojo, Paredes, Mata-Contreras, and Martín, “Chipless-RFID: A Review and Recent Developments,” *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3385, Aug. 2019, doi: 10.3390/s19153385.
- [13] M. Popperl, A. Parr, C. Mandel, R. Jakoby, and M. Vossiek, “Potential and Practical Limits of Time-Domain Reflectometry Chipless RFID,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 64, no. 9, pp. 2968–2976, Sep. 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2593722.
- [14] K. R. Brinker and R. Zoughi, “A Review of Chipless RFID Measurement Methods, Response Detection Approaches, and Decoding Techniques,” *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, vol. 1, pp. 1–31, 2022, doi: 10.1109/OJIM.2022.3196746.
- [15] G. Marchi, V. Mulloni, F. Acerbi, M. Donelli, and L. Lorenzelli, “Tailoring the Performance of a Nafion 117 Humidity Chipless RFID Sensor: The Choice of the Substrate,” *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1430, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23031430.
- [16] D. G. Fang, *Antenna Theory and Microstrip Antennas*. CRC Press, 2017. doi: 10.1201/b10302.
- [17] C. Mandel, B. Kubina, M. Schüßler, and R. Jakoby, “Metamaterial-inspired passive chipless radio-frequency identification and wireless sensing,” *annals of telecommunications - annales des télécommunications*, vol. 68, no. 7–8, pp. 385–399, Aug. 2013, doi: 10.1007/s12243-013-0372-9.
- [18] Yuandan Dong and T. Itoh, “Metamaterial-Based Antennas,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2271–2285, Jul. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2187631.

- [19] T. Athauda and N. C. Karmakar, "The Realization of Chipless RFID Resonator for Multiple Physical Parameter Sensing," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 3, pp. 5387–5396, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2901470.
- [20] B. Shao, Y. Amin, Q. Chen, R. Liu, and L.-R. Zheng, "Directly Printed Packaging-Paper-Based Chipless RFID Tag With Coplanar SLC Resonator," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 12, pp. 325–328, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2247556.
- [21] P. Prabavathi and S. Subha Rani, "Modified microstrip transmission line based chipless RFID tag with high bit encoding," *Measurement*, vol. 190, p. 110684, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110684.
- [22] J. Song, X. Li, and H. Zhu, "Multiresonator-based chipless RFID system for low-cost application," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, IEEE, Nov. 2017, pp. 543–547. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293197.
- [23] S. Tijeri-Mofrad, S. Mohammad-Ali-nezhad, and A. H. Zarif, "Low bandwidth chipless RFID tag using complementary split ring resonator," *J Electromagn Waves Appl*, vol. 35, no. 8, pp. 991–1007, May 2021, doi: 10.1080/09205071.2020.1865842.
- [24] M. Mumtaz, S. F. Amber, A. Ejaz, A. Habib, S. I. Jafri, and Y. Amin, "Design and analysis of C shaped chipless RFID tag," in *2017 International Symposium on Wireless Systems and Networks (ISWSN)*, IEEE, Nov. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISWSN.2017.8250009.
- [25] A. Vena, E. Perret, and S. Tedjini, "High-Capacity Chipless RFID Tag Insensitive to the Polarization," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 60, no. 10, pp. 4509–4515, Oct. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207347.
- [26] M. E. Jalil, M. K. A. Rahim, N. A. Samsuri, and R. Dewan, "Flexible printed chipless RFID tag using metamaterial–split ring resonator," *Applied Physics A*, vol. 122, no. 4, p. 348, Apr. 2016, doi: 10.1007/s00339-016-9865-5.

Priedai

1 priedas. TiFEC studentų mokslinės konferencijos dalyvavimo sertifikatas



Certificate

this is to certify that

Justas Petkus

took part at the

STUDENT SCIENTIFIC CONFERENCE
TiFEC 2025

on the topic:

**Chipless Split-Ring RFID Tag Design
on FR-4 Substrate**

Dean of the Faculty of Electrical and Electronics Engineering
Prof. Mindaugas Žilys

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'M' and 'Ž' followed by a flourish.

16 April 2025
Kaunas