



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Radijo bangų neatspindinčių paviršių realizavimo,  
naudojant metamedžiagas, tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Simonas Satkūnas**

Projekto autorius

**Doc. Darius Kybartas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Radijo bangų neatspindinčių paviršių realizavimo, naudojant metamedžiagas, tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

---

**Simonas Satkūnas**

Projekto autorius

**Doc. Darius Kybartas**

Vadovas

**Lekt. Dr. Audrius Merfeldas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Simonas Satkūnas

## **Radijo bangų neatspindinčių paviršių realizavimo, naudojant metamedžiagas, 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.

Simonas Satkūnas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Satkūnas Simonas. Radijo bangų neatspindinčių paviršių realizavimo, naudojant metamedžiagas, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Darius Kybartas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Metamedžiagos, neatspindintys paviršiai, radijo bangos, neigiamas lūžio rodiklis.

Kaunas, 2023. 47 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe atliekama literatūrinė analizė, kurioje aptariami metamedžiagų veikimo principai, savybės, konstrukciniai ypatumai, bei jų pritaikymai įvairiose srityse. Sudaromas matematinis modelis, kuriuo remiantis atliekamas pavienių rezonatorių modeliavimas, tiriant jų parametru priklausomybes nuo orientacijos bangos atžvilgiu bei tarpusavio padėties. Modeliuojant neatspindintį paviršių sukuriama žiedinė struktūra, kurios viduje galima patalpinti objektą taip sudarant galimybę įvertinti struktūros veiksnumą. Sukonstravus struktūrą atliekami bangos pasiskirstymo erdvėje matavimai siekiant išsiaiškinti metastruktūros efektyvumą neatspindėti EM bangų.

Satkūnas Simonas. Investigation of Radio Waves Non-Reflecting Surfaces Using Metamaterials. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Darius Kybartas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Metamaterials, non-reflecting surfaces, radio waves, negative diffractive index.

Kaunas, 2023. 47 p.

### **Summary**

This paper presents a literature review of the principles, properties, design features and applications of metamaterials in various fields. A mathematical model is constructed, which is used to simulate individual resonators, investigating the dependence of their parameters on their orientation with respect to the EM wave and their position relative to each other. The modelling of a non-reflecting surface leads to the creation of an annular structure within which an object can be placed, thus enabling the performance of the structure to be assessed. Once the structure is constructed, measurements of the spatial distribution of the waves are made to investigate the effectiveness of the meta-structure in not reflecting EM waves.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas.....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas.....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Teorinė dalis.....</b>	<b>13</b>
1.1. Metamedžiagos.....	13
1.2. Metamedžiagų veikimo principas.....	13
1.3. Metamedžiagų panaudojimas ir realizavimas.....	15
<b>2. Metamedžiagos ir jo elementų tyrimo metodikos.....</b>	<b>19</b>
2.1. Matematinio modelio analizė .....	19
2.2. Modeliavimo metodikos sudarymas .....	20
2.2.1. Metamedžiagos struktūrinio elemento tyrimas bangolaidyje .....	21
2.2.2. Metamedžiagos struktūros tyrimas plokščiąja banga .....	22
2.3. Eksperimentinių tyrimų metodikos sudarymas .....	23
<b>3. Metamedžiagos elementų ir neatspindinčios struktūros modelių analizė.....</b>	<b>27</b>
3.1. Pavienių rezonatorių tyrimas .....	27
3.1.1. Poliarizacijos ir parametrų tyrimas.....	27
3.1.2. Rezonatorių grupių tyrimas .....	30
3.2. Metastruktūrų modeliavimas .....	32
3.2.1. Metastruktūros su tolydžiu parametrų gradientu modeliavimas.....	32
3.2.2. Metastruktūros modeliavimas naudojant žiedines rezonatorių struktūras.....	33
<b>4. Metastruktūros savybių eksperimentiniai tyrimai.....</b>	<b>37</b>
4.1. Eksperimentinė neatspindinti metastruktūra .....	37
4.2. Bandymų standas.....	37
4.3. Bangos frontų matavimų rezultatai.....	39
<b>Išvados .....</b>	<b>41</b>
<b>Rekomendacijos.....</b>	<b>42</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>43</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Modeliuojamo metamedžiagos elemento parametrai .....	21
<b>2 lentelė.</b> Metastruktūros sluoksnių magnetiniai parametrai.....	36
<b>3 lentelė.</b> Metastruktūros sluoksnių dielektriniai parametrai .....	36

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> a) Plonų metalinių vamzdelių struktūra – elektrinis laukas, lygiagretus šiems vamzdeliams, sukuria juose elektrinius momentus, b) SRR esant dažniams, aukštesniems, nei rezonansiniai, magnetinė skvarba yra neigiama [47].....	13
<b>2 pav.</b> Metamedžiagų struktūrų pavyzdžiai [7,47].....	16
<b>3 pav.</b> Komplementaraus SRR ekvivalentinė grandinė [45].....	16
<b>4 pav.</b> Fraktalinių rezonatorių pavyzdžiai [21] .....	17
<b>5 pav.</b> Metamedžiagos rezonatorių pavyzdžiai [45] .....	17
<b>6 pav.</b> EM bangų užlinkimas aplink objektą, padengtą metamedžiagomis [42].....	18
<b>7 pav.</b> SRR žiedinių struktūrų ekvivalentinių grandinių pavyzdžiai [17].....	19
<b>8 pav.</b> Aplinkos parametrų nustatymas <i>CST</i> aplinkoje .....	20
<b>9 pav.</b> Sumodeliuotas metamedžiagos elementas <i>CST</i> aplinkoje iš abiejų pusių .....	21
<b>10 pav.</b> Ribinių sąlygų nustatymas <i>CST</i> aplinkoje.....	22
<b>11 pav.</b> Medžiagos parametrų kitimo dėsnų aprašymas <i>COMSOL</i> aplinkoje a) naudojant teorines išraiškas, b) naudojant interpoliuotus duomenis.....	23
<b>12 pav.</b> Eksperimento struktūrinė schema .....	24
<b>13 pav.</b> Koaksialinio simetrizatoriaus tipo antena [4].....	24
<b>14 pav.</b> Antenos parametro $S_{11}$ dažninė charakteristika.....	25
<b>15 pav.</b> Sukonstruota simetrizuota koaksialinė antena .....	26
<b>16 pav.</b> Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a) $E$ laukas statmenas žiedams ir $H$ laukas lygiagretus metalinei juostelei, b) $H$ laukas statmenas žiedams ir $E$ laukas lygiagretus metalinei juostelei.....	27
<b>17 pav.</b> Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a) $H$ laukas statmenas žiedams ir $E$ laukas lygiagretus metalinei juostelei, b) $E$ laukas statmenas žiedams ir $H$ laukas lygiagretus metalinei juostelei .....	28
<b>18 pav.</b> Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a) $H$ laukas yra lygiagretus žiedams ir $E$ laukas lygiagretus metalinei juostelei, b) $E$ laukas yra lygiagretus žiedams ir $H$ laukas lygiagretus metalinei juostelei.....	28
<b>19 pav.</b> Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a) $H$ laukas yra lygiagretus žiedams ir $E$ laukas lygiagretus metalinei juostelei, b) $E$ laukas yra lygiagretus žiedams ir $H$ laukas lygiagretus metalinei juostelei .....	29
<b>20 pav.</b> Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a) $E$ laukas yra statmenas žiedams ir $H$ laukas statmenas metalinei juostelei, b) $H$ laukas yra statmenas žiedams ir $E$ laukas statmenas metalinei juostelei.....	29
<b>21 pav.</b> Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a) $E$ laukas yra statmenas žiedams ir $H$ laukas statmenas metalinei juostelei, b) $H$ laukas yra statmenas žiedams ir $E$ laukas statmenas metalinei juostelei .....	30
<b>22 pav.</b> a) Vertikaliai išdėliotų elementų masyvas bangolaidyje, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo .....	30
<b>23 pav.</b> a) Horizontaliai išdėliotų elementų masyvas bangolaidyje, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo .....	31
<b>24 pav.</b> a) Horizontaliai išdėliotų elementų, pasuktų $90^\circ$ aplink savo ašį, masyvas, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo .....	31
<b>25 pav.</b> Plokščiosios bangos sąveika su: a) variniu 60 mm diametro cilindru, b) idealių parametrų metastruktūra, kurios viduje yra 60 mm diametro varinis cilindras .....	33
<b>26 pav.</b> Struktūros, sudarytos iš pavienių elementų, pavyzdys.....	33



<b>27 pav.</b> Magnetinės skvarbos a) realiosios dalies bei b) menamosios dalies priklausomybės nuo sluoksnio spindulio .....	34
<b>28 pav.</b> Dielektrinės skvarbos a) realiosios dalies bei b) menamosios dalies priklausomybės nuo sluoksnio spindulio .....	34
<b>29 pav.</b> Lūžio rodiklio realiosios bei menamosios dalių priklausomybės nuo sluoksnio spindulio .	35
<b>30 pav.</b> Plokščiosios bangos sąveika su metamedžiagos struktūra, kurios pagrindas yra a) PTFE, b) FR-4 .....	35
<b>31 pav.</b> Rezonatorių pavyzdys projektavimo aplinkoje .....	37
<b>32 pav.</b> a) Pagaminti metapaviršiaus elementai, b) sukonstruotas metapaviršiaus masyvas .....	37
<b>33 pav.</b> Eksperimentinio tyrimo stendas nesant kliūčių; X pažymėtas metastruktūros centras .....	38
<b>34 pav.</b> Eksperimentinio tyrimo stendas a) su variniu 50 mm cilindru, b) su metastruktūra ir variniu cilindru joje.....	38
<b>35 pav.</b> Bangos fazės pasiskirstymas erdvėje a) nesant kliūčių, b) esant 50 mm variniam cilindriui	39
<b>36 pav.</b> Bangos fazės pasiskirstymas erdvėje, kai varinis cilindras patalpintas metastruktūroje a) nesuderinus dažnio, b) suderinus dažnį .....	40

### Santrumpų ir terminų sąrašas

EM	Elektromagnetinis
SRR	Skeltų žiedų rezonatorius (angl. <i>Split-Ring Resonator</i> )
CSRR	Komplementarus skeltų žiedų rezonatorius (angl. <i>Complementary Split Ring Resonator</i> )
MMPA	Tobulas metamedžiagos sugėriklis (angl. <i>Metamaterial Perfect Absorber</i> )
RF	Radijo dažniai (angl. <i>Radio Frequency</i> )
Balun	Balansuota–nesubalansuota (angl. <i>Balanced–unbalanced</i> )
PTFE	Politetrafluoroetenas (teflonas)

## Įvadas

Radio dažnių komunikacijos yra daugelio technologijų pagrindas. Daugybė elektronikos įrenginių, nuo išmaniųjų telefonų ir kompiuterių iki daiktų interneto įrenginių, yra sujungti įvairiais telekomunikaciniais tinklais ir keičiasi informacija. Taip pat, šie elektronikos prietaisai yra lengvai aptinkami specialia elektromagnetinį spinduliavimą registruojančia įranga. Aptikti galima tiek spinduliuojančius, tiek nespinduliuojančius įrenginius bei objektus. Pradėjusios vystytis dar prieš Antrąją pasaulinį karą, šios dvi taikymo kryptys virto radijo bangų pelengacijos bei radarų technikos ir metodų kryptimis telekomunikacijose. Šiuo metu ypatingai aktuali tapo karinė taikymo sritis, kurios pagrindas – varžybos tarp besinaudojančių telekomunikacijomis ir jas aptinkančių pusių. Nuo aptikimo slepiami tiek lėktuvai ar laivai, tiek atskiri telekomunikacijų įrenginiai.

XX a. antrojoje pusėje buvo kuriamos naujos technologijos apsaugoti objektus nuo jų vietos nustatymo arba spinduliavimo aptikimo elektromagnetinėmis bangomis. Šių technologijų pagrindas – medžiagos, leidžiančios sugerti, valdyti radijo bangas ir jomis manipuliuoti. Daugeliu atvejų tai išsivystė į sugeriančių paviršių ir juos sudarančių medžiagų kūrimą. Tačiau natūralių medžiagų ribotumas, susijęs su elektromagnetinėmis bangomis, paskatino ieškoti kitų analogų, vadinamų metamedžiagomis. Nors tokios medžiagos buvo teoriškai numatytos ir aprašytos apie 1965 m. sovietų fiziko V. G. Veselago [49], bet buvo pradėtos plėtoti tik dešimtojo dešimtmečio pabaigoje. XXI a. pradžioje mokslininkai, tokie kaip J. B. Pendry'is [32,34] ir D. R. Smith'as [44], pateikė pirmuosius veikiančius pavyzdžius ir nuo tada jau du dešimtmečius tęsiasi metamedžiagų kūrimo ir taikymų banga.

Metamedžiagos pasižymi ypatingomis savybėmis, kurių neturi natūralios medžiagos: neigiamas lūžio rodiklis, neigiama magnetinė ir dielektrinė skvarbos. Didžioji dalis metamedžiagų susideda iš trijų pagrindinių sudedamųjų dalių. Žiediniai rezonatoriai, veikiami išorinio magnetinio lauko, sukuria neigiamą magnetinę skvarbą, o ištisiniai metaliniai vamzdeliai, veikiami elektrinio lauko, sukuria neigiamą dielektrinę skvarbą. Dielektrinis sluoksnis, esantis tarp šių dviejų struktūros dalių, nustato elektromagnetinės bangos sugerties lygį. Konstruojant metapaviršius, t. y. paviršius, pagamintus iš metamedžiagų, galima pasiekti precedento neturinčias galimybes nepaprastai tiksliai valdyti elektromagnetines bangas, todėl galima išspręsti keletą svarbių problemų mokslo ir inžinerijos srityse.

Viena iš pagrindinių problemų, kurias gali išspręsti metapaviršiai, yra bangų frontų kontrolė. Tradiciniai paviršiai atspindi, išsklaido arba sugeria krintančias elektromagnetines bangas, todėl jie dažnai yra neefektyvūs ir taip gali būti prarandama informacija. Kita vertus, metapaviršiai gali būti sukurti taip, kad pakeistų įeinančių bangų fazę, amplitudę ar poliarizaciją, todėl galima tiksliai formuoti ir valdyti bangų frontus.

Pirmieji tyrimai buvo atliekami naudojant radijo bangų dažnius, tačiau dėl sparčios technologinės pažangos šiomis dienomis metamedžiagų plėtojimas yra aktualus tiek terahercinių bangų dažniuose, tiek optikoje. Viena iš sričių, kurioje yra aktyvus metamedžiagų tyrimų finansavimas, yra karo pramonė [29]. Pavyzdžiui, gynybos mokslinių tyrimų agentūra DARPA pastaruosius dešimt metų vykdo programą, kuria siekia geriau suprasti dvimačių ir trimačių struktūrizuotų medžiagų fiziką ir sukurti sistemingą elektromagnetinių bangų valdymo projektavimo metodą [55]. Taip pat, gynybos technologijų kompanija *Northrop Grumman* teigia, kad metamedžiagos gali būti pritaikytos tokioms sritims, kaip garso slopintuvai, sonaro bangų kreipikliai, infraraudonųjų spindulių skydai bei nematomumo apsiaustai [45].

Metapaviršiai siūlo veiksmingo šviesos sugėrimo ar atspindėjimo problemos sprendimą įvairiose mokslo ir komercinėse srityse. Kruopščiai pritaikant metamedžiagų struktūrines savybes,

metapaviršiai gali būti sukurti taip, kad pasižymėtų beveik tobulomis sugerties ar atspindžio savybėmis tam tikrame dažnių diapazone. Ši galimybė ypač vertinga norint padidinti efektyvumą saulės energijos surinkimo srityje, optoelektronikos srityje siekiant sumažinti atspindžius ir taip padidinti išgaunamos šviesos srautą, gerinant kontrastą bei skaitomumą ekranuose, taip pat kuriant slaptas technologijas, kurioms būtinas minimalus radaro bangų atspindėjimas.

### **Darbo tikslas**

Ištirti metamedžiagų pritaikymo galimybes realizuojant elektromagnetinių bangų neatspindinčius paviršius.

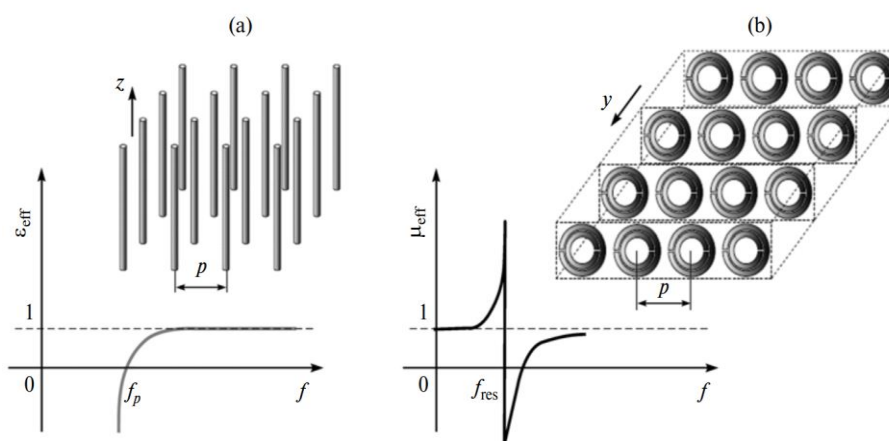
### **Darbo uždaviniai:**

- Išanalizuoti literatūrą, susijusią su metamedžiagomis, jų veikimo principais bei pritaikymais neatspindinčių paviršių realizavime;
- Atlikti kompiuterinių modelių analizę bei tyrimą;
- Sudaryti eksperimentinių tyrimų metodiką ir atlikti tyrimus;
- Išanalizuoti, įvertinti ir pateikti gautus rezultatus.

## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Metamedžiagos

Metamedžiagos – tai dirbtinės struktūros, kurios mokslininkų dėmesio sulaukė XX a. 9-ojo dešimtmečio pabaigoje ir 10-ojo dešimtmečio pradžioje. Jos sukurtos taip, kad pasižymėtų gamtoje nepasiekiamomis savybėmis, pavyzdžiui, neigiamu lūžio rodikliu [7,18,41,47], elektromagnetiniu būdu sukeltu skaidrumu [27], neigiamu Doplerio efektu [41], neigiama dielektrine ir magnetine skvarbomis [11,18,41,47]. Šių struktūrų sandara panaši į natūralių kristalų, nes susideda iš periodiškai išdėstytų vienetinių elementų, kurie nėra sudaryti iš fizinių atomų ar molekulių, o juose yra maži metaliniai rezonatoriai, kurie sąveikauja su išorine EM banga (žr. 1 pav.). Iš pradžių jos buvo pasiūlytos siekiant mesti iššūkį pagrindiniams dėsniams, o vėliau buvo panaudotos kaip universali platforma EM bangoms valdyti visame spektre, nes yra itin lengvai keičiamo dydžio [46]. Analitiniai ir eksperimentiniai metamedžiagų savybių tyrimai ir jų taikymas apima platų dažnių diapazoną nuo radijo bangų iki regimosios šviesos [15].



**1 pav.** a) Plonų metalinių vamzdelių struktūra – elektrinis laukas, lygiagretus šiems vamzdeliams, sukuria juose elektrinius momentus, b) SRR esant dažniams, aukštesniems, nei rezonansiniai, magnetinė skvarba yra neigiama [48]

Metapaviršiai yra dvimačiai metamedžiagų analogai, apibrėžiami kaip plonos ir tankios dvimatės metamedžiagų struktūros, turinčios neįprastų ir naudingų savybių, kurias suteikia jų sudedamieji elementai. Daugelis toliau aprašytų metapaviršių funkcijų gali būti įgyvendintos naudojant tūrinių metamedžiagų sluoksnius, tačiau jie turi keletą trūkumų, dėl kurių labiau vertėtų naudoti metapaviršius [7].

Pirma, tūrinius periodinius masyvus sunku įgyvendinti, ypač optinio diapazono operacijoms, kai tūrinės metamedžiagos yra daugiasluoksnės nanostruktūros [27]. Antra, metamedžiagų veikimas priklauso nuo bangų sklaidimo dideliais atstumais, todėl jas riboja būdingi dideli nuostoliai dėl rezonansų. Stipri sugertis per tūrines metamedžiagas apriboja daugelį jų siūlomų praktinių taikymų, pavyzdžiui, tobulą lęšiavimą [18]. Dėl mažesnės sugerties metapaviršiai yra gerokai naudingesni formuojant šviesos srautus, nei tūrinės metamedžiagos. Kadangi metapaviršiai yra ploni sluoksniai, jie plačiai taikomi gaminant optinius prietaisus, o mikrobangų dažnių ruože – naujoms antenos konstrukcijoms [7].

### 1.2. Metamedžiagų veikimo principas

Yra įrodyta, kad neigiama magnetinė skvarba gali pakeisti priimančiojo pagrindo skvarbą dėl laidžių nemagnetinių žiedų masyvo [34]. Kai medžiagos pavieniai elementai yra rezonansiniai, galima

pastebėti staigų magnetinės skvarbos išaugimą netoli rezonansinio dažnio ir staigų kritimą į priešingą pusę už jo. Į homogeninę terpę įterpus periodiškai išdėstytus metalinius cilindrus, kai išilgai jų veikia elektrinis laukas, galima pastebėti neigiamą efektyviąją dielektrinę skvarbą [33,35].

Elektronų judėjimas cilindre priklauso nuo vidutinio elektronų tankio, bei efektyviosios elektronų masės:

$$n_{eff} = \frac{n\pi r^2}{a^2} \quad (1)$$

čia:  $n$  – elektronų tankis viename laidininke,  
 $a$  – atstumas tarp laidininkų, m,  
 $r$  – laidininko spindulys, m.

Magnetinio lauko priklausomybė nuo atstumo iki laidininko  $H(R)$  gali būti išreikšta šia formule:

$$H(R) = \frac{I}{2\pi R} = \frac{r^2 n v e}{2R} \quad (2)$$

čia:  $I$  – srovės stipris, A,  
 $R$  – atstumas iki laidininko, m,  
 $v$  – vidutinis elektronų greitis,  $\frac{m}{s}$ .

Vieno elektrono efektinė masė išreiškiama:

$$m_{eff} = \frac{\mu_0 e^2 r^2 n}{2} \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad (3)$$

čia:  $e$  – elektrono krūvis, C,

Iš (3) formulės pastebima, kad kuo didesnis laidininko spindulys, tuo didesnė efektyvioji elektrono masė. Šis dydis gali būti panaudojamas apskaičiuojant medžiagos plazminį dažnį  $\omega_p$ , kuris yra apibūdinamas kaip elektronų tankio svyravimo dažnis laidžiose terpėse:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{eff} e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (4)$$

čia:  $c_0$  – šviesos greitis vakuume.

Vadinasi didesnis plazminis dažnis pasiekiamas, kai efektyvioji elektrono masė yra maža. Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad norint išlaikyti cilindų masyvą kaip vienalytę terpę, jų spindulys turi būti pakankamai mažas palyginus su atstumu tarp jų. Metaluose neįvertinant nuostolių efektyviosios elektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio  $\epsilon_{eff}(\omega)$  pateikiama šia formule:

$$\epsilon_{eff}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (5)$$

Neigiamą efektyviąją elektrinę skvarbą galima pasiekti, kai bangos dažnis yra mažesnis už medžiagos plazminį dažnį.

Veikiant magnetiniam laukui  $H$ , kuris yra statmenas žiedo plokštumai, žiede indukuojasi elektros srovės [34]. Efektyviosios magnetinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio  $\mu_{eff}(\omega)$  gali būti aprašyta taip:

$$\mu_{eff}(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + j\omega\sigma} \quad (6)$$

čia:  $\sigma$  – slopinimo koeficientas dėl metalo nuostolių,  
 $F$  – medžiagos dalis, kurią užima žiedas,  
 $\omega_{0m}$  – žiedo rezonansinis dažnis, Hz.

$$F = \pi \left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad (7)$$

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3a}{\pi \ln\left(\frac{2wr^3}{d}\right)}} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{2a\rho}{r\mu_0} \quad (9)$$

čia:  $w$  – žiedo storis, m,  
 $\rho$  – savitoji metalo varža,  $\frac{\Omega}{m}$   
 $d$  – tarpas tarp vidinio ir išorinio žiedo, m,  
 $r$  – vidinio žiedo spindulys, m.

Rezonansinių dažnių srityje magnetiniai dipoliniai momentai yra didesni už išorėje veikiančių magnetinį lauką, todėl atsiranda realioji neigiamos efektyviosios magnetinės skvarbos dalis. Atmetant nuostolius neigiamą skvarbą užtikrinantis rezonansinio dažnio diapazonas yra toks:

$$\omega_{0m} < \omega < \omega_p \quad (10)$$

čia:  $\omega_p = \frac{\omega_{0b}}{\sqrt{1-F}}$  – žiedo plazminis dažnis, Hz.

Vadinasi, terpėje magnetinės skvarbos smarkus verčių pokytis ties rezonansiniu dažniu atsiranda tarp  $\omega_{0m}$  ir  $\omega_p$ .

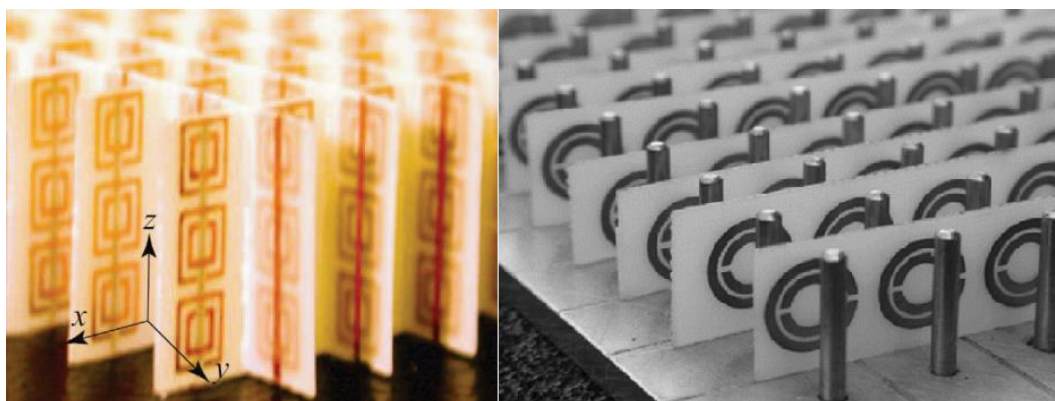
Magnetinio poveikio sustiprinimas gali būti pasiekiamas panaudojant talpinius elementus žieduose padarant įpjuovas. Susidariusi talpa tarp dviejų koncentrinų žiedų padeda tekėti srovei išilgai žiedo kontūro. Magnetinės skvarbos dažninė charakteristika turi rezonansinę formą dėl žiede susidariusios talpos ir induktyvumo [2].

### 1.3. Metamedžiagų panaudojimas ir realizavimas

Metamedžiagose SRR atlieka natūralių medžiagų atomų vaidmenį ir veikia kaip elektringos mažos rezonansinės dalelės, kurios suteikia neigiamą magnetinę. Čia variniai cilindrai (žr. 2 pav.) suteikia neigiamą dielektrinę skvarbą [36]. Taip pat yra sukurta medžiagų su įtvirtintomis talpinės apkrovos juostelėmis ir kvadratiniais SRR [20]. Be to, atsižvelgiant, ar yra panaudojami SRR, metamedžiagos yra įvairių formų [22,46]. Taigi, dėl unikalių savybių ir struktūrų, metamedžiagos gali būti naudojamos įvairiose srityse, pavyzdžiui, jutikliuose [8], superlęšiuose [9,46], antenose [1,24], superlaidininkuose [3], absorbentuose [11], bei kaupiant energiją [30].

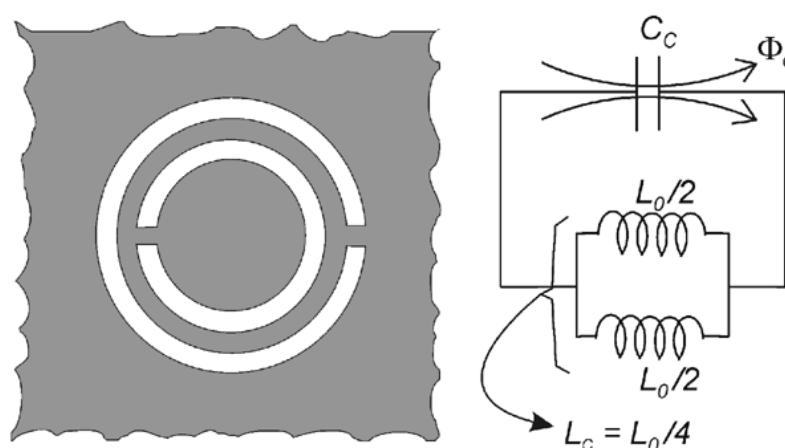
Hilberto kreivėmis pagrįstos rezonatorių struktūros pavaizduotos 4 pav. Naudojant elektrinių grandynų modelius galima pastebėti, kad teoriškai spiralinės konfigūracijos efektyvioji talpa yra keturis kartus didesnė už SRR, todėl spiralės gali sumažinti rezonansinį dažnį du kartus. Siūlomos struktūros sujungia idėją naudoti spiralinę konfigūraciją ir fraktalinę Hilberto kreivę, kad būtų galima

sukurti mažesnio dydžio intarpus. Naudojant ketvirtos eilės fraktalinę Hilberto kreivę galima realizuoti intarpus, kurių dydis siekia 0,014 bangos ilgio. Šis dydis sudaro 63% spiralinių intarpų dydžio ir 32% SRR dydžio [21].



**2 pav.** Metamedžiagų struktūrų pavyzdžiai [7,48]

Komplementarus SRR (CSRR) yra priešpriešinis SRR atvaizdas, kuris pasižymi neigiama dielektrine skvarba tam tikroje dažnių juostoje. Skirtumas tarp CSRR ir SRR yra tai, kad SRR žiedai yra padaryti iš varinio sluoksnio esančio ant dielektriko sluoksnio, o CSRR yra išgraviruotas dielektriko plokštumoje, kai žiedai suformuojami palikus varinį sluoksnį aplink (žr. 3 pav.). Tokios struktūros pasižymi išskirtinėmis savybėmis dažnių juostoje ir už jos ribų. CSRR plokštumoje  $E$  laukas taikomas lygiagrečiai CSRR plokštumai, siekiant sukurti stiprų elektrinį dipolį, kuris turi įtakos CSRR rezonansiniam dažniui. Tiek SRR, tiek CSRR dėl bendrų matmenų pasižymi panašiu rezonansiniu dažniu [14,46].



**3 pav.** Komplementaraus SRR ekvivalentinė grandinė [46]

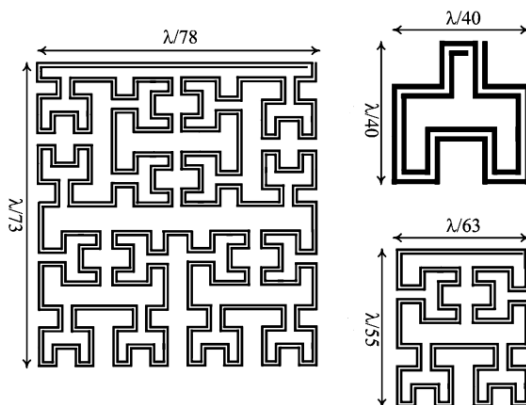
Daugumą metamedžiagų pagrindo sugeriamųjų medžiagų (MMPA) sudaro trys sluoksniai:

- periodiškai išdėstytų metalinių struktūrų sluoksnis;
- dielektriko sluoksnis;
- ištisinis metalinis sluoksnis.

Kad būtų pasiekta visiška sugertis, neturėtų būti atspindžio ir perdavimo. Perdavimą galima sumažinti trečiuoju ištisine metalinės plokštelės sluoksniu, kuris blokuoja visas krintančias EM bangas. Pagrindinė dielektriko sluoksnio paskirtis – suteikti erdvę krintančiai EM bangai užsilikti ir būti sugertai. Nors sugertis gali atsirasti ir metalinėje srityje, jei sugertį lemia vyraujantys dielektriniai nuostoliai, šis vaidmuo yra ypač svarbus [12]. Paprastai manoma, kad tam, jog dielektrinis sluoksnis

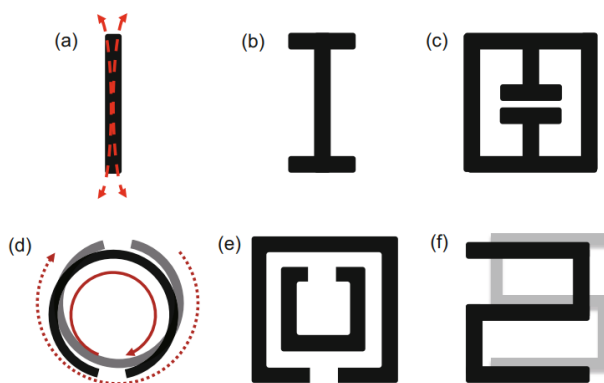


suteiktų pakankamai erdvės krintančiai EM bangai, pageidautina naudoti medžiagą su dideliu lūžio rodikliu, nes tai sumažina tikrąjį dielektrinio sluoksnio storį. Krintančios EM bangos kelias turėtų būti išreikštas  $n \cdot d$ , kur  $n$  – lūžio rodiklis, o  $d$  – dielektriko storis. Nors paprastai tai yra tiesa, nebūtina turėti didelį storį, kad būtų tenkinama, pavyzdžiui, ketvirčio bangos ilgio sąlyga, kuri yra būtina neatspindinčiai dangai arba Solsberio ekranui [27]. Dielektrinės medžiagos paprastai turi labai mažą menamąją dielektrinės skvarbos dalį, kuri yra pakankama, kad visos krintančios EM bangos būtų sugertos. Priimama, kad Solsberio ekrane dielektriko sluoksnis yra be nuostolių, kad įvyktų destruktvyioji interferencija [16,38].



4 pav. Fraktalinių rezonatorių pavyzdžiai [21]

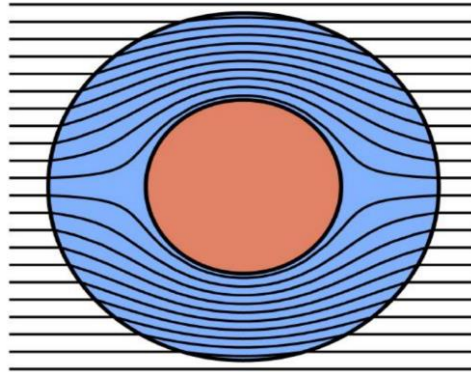
Metamedžiaginiai sugėrikliai paprastai gaminami iš periodinio rašto metalo sluoksnio, dielektrinio sluoksnio ir įžeminimo plokštumos. Šios struktūros vienetinio elemento sugėriklį sudaro du metaliniai elementai – elektrinis rezonatorius ir plonas metalinis cilindras, veikiantis kaip įžeminimo plokštuma. Šiuos metalinius elementus skiria dielektrinis sluoksnis [12]. Struktūros elektrinį atsaką galima keisti derinant struktūros matmenis ir jos dydį, o magnetinį atsaką – derinant dielektrinio pagrindo storį [26].



5 pav. Metamedžiagos rezonatorių pavyzdžiai [46]

Naudojant anizotropinius sklaidytuvus metaplėvelei sudaryti, galima pasiekti daug naudingų rezultatų, kurių neįmanoma pasiekti naudojant izotropinius metapaviršius [8]. Vienas iš įdomesnių tūrinių metamedžiagų aspektų yra galimybė sukurti anizotropinę elgseną [13,18]. Maskuojamosios medžiagos koncepcija – suprojektuoti specifinę anizotropinę elgseną metamedžiagoje taip, kad EM energija sklistų arba užlinktų aplink ją padengtą objektą [25,27]. Jei anizotropinės medžiagos yra tinkamai suprojektuotos, padengtas objektas energijos nei išsklaido, nei sugeria, todėl EM laukų atžvilgiu jis atrodo taip, tarsi objekto nebūtų. Taigi iš esmės galima sukurti objektą, kuris atrodo nematomas EM bangoms bet kuriame pageidaujama dažnių ruože [42].

Šią koncepciją taip pat būtų galima taikyti ir metapaviršiams. Tokioje konstrukcijoje metapaviršių sudarantys sklaidytuvai būtų parenkami ir keičiami visame paviršiuje, kad būtų pasiektas pageidaujamas paviršiaus elgesys [28] (žr. 6 pav.). Pavyzdžiui, metapaviršių galima suprojektuoti taip, kad jis fokusuotų EM plokščiąją bangą į norimą erdvės sritį, panašiai kaip fokusuojančių antenų masyvas. Jei metapaviršiaus sklaidytuvai būtų suprojektuoti taip, kad juos būtų galima keisti savo nuožiūra, būtų galima sukurti metapaviršių, galintį keisti kryptį ir dažnį, į kurį sutelkiama energija, t. y. dažniui ir erdvei imlų paviršių [9,28].



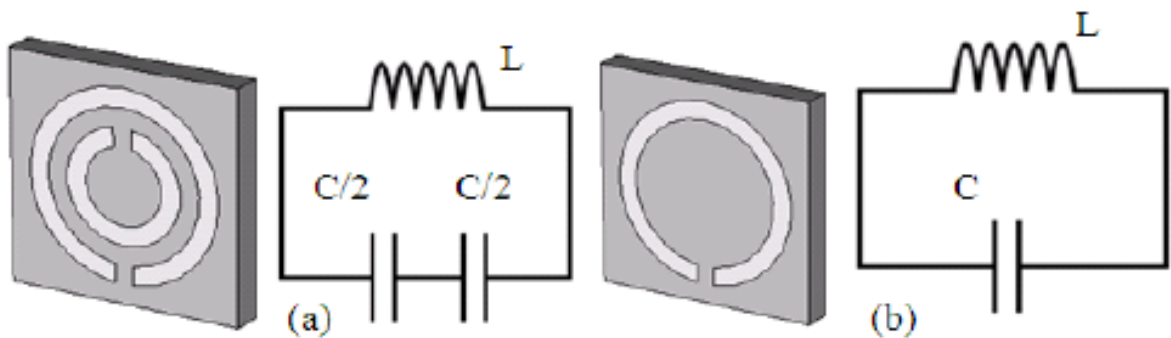
**6 pav.** EM bangų užlinkimas aplink objektą, padengtą metamedžiagomis [43]

## 2. Metamedžiagos ir jo elementų tyrimo metodikos

Siekiant ištirti radijo bangų neatspindintį paviršių yra reikalinga sudaryti tyrimo metodologiją. Matematinio modeliu aprašomos teorinės rezonatorių parametrų priklausomybės nuo matmenų bei struktūros ypatumų. Remiantis matematinio modeliu sudaroma modeliavimo metodika teoriniams rezultams gauti tiriant pavienius rezonatorius ir jų masyvus bei struktūras. Eksperimentinėje metodikoje aprašomas sukonstruotos metastruktūros parametrų bei charakteristikų gavimas realiomis sąlygomis.

### 2.1. Matematinio modelio analizė

Metamedžiagos rūšis, kuri bus tirama, yra dviejų žiedų ir juostelės kombinacija. Ši struktūra pasirinkta dėl to, kad būtų veikiami tiek elektrinis, tiek magnetinis laukai. Šiuo atveju žemiau pateiktas žiedų išdėstymas gali būti paverčiamas į ekvivalentinį rezonansinį kontūrą. Kontūro induktyvumas ir talpumas priklauso nuo žiedų matmenų, geometrijos ir jų skaičiaus [52].



7 pav. SRR žiedinių struktūrų ekvivalentinių grandinių pavyzdžiai [17]

Dviejų žiedų struktūros metamedžiagos ekvivalentinė talpa  $C_{eq}$  apskaičiuojama pagal šią formulę [37,39]:

$$C_{eq} = \frac{(\pi r_0 - s)C_{pul}}{2} + \frac{\epsilon_0 w g}{2s} \quad (11)$$

čia:  $r_0$  – vidinio žiedo spindulys, m,  
 $s$  – žiedų išpjovų ilgis, m,  
 $\epsilon_0$  – dielektrinė konstanta,  
 $w$  – žiedų plotis, m,  
 $g$  – atstumas tarp žiedų, m,  
 $C_{pul}$  – talpa tarp žiedų ilgio vienetui, F:

$$C_{pul} = \frac{\sqrt{\epsilon_e}}{c_0 Z_0} \quad (12)$$

čia:  $\epsilon_e$  – efektinė tarpės elektrinė skvarba,  
 $c_0$  – šviesos greitis vakuume,  
 $Z_0$  – tarpės banginė varža,  $\Omega$ .

Ekvivalentinis induktyvumas  $L_{eq}$  apskaičiuojamas pagal šią formulę [5,39]:

$$L_{eq} = 0.00508l \left( 2.303 \log \left( \frac{4l}{w} \right) - \theta \right) \quad (13)$$

čia:  $l$  – žiedo ilgis, m,  
 $\theta$  – konstanta, priklausanti nuo struktūros geometrijos; šiuo atveju, kai žiedai yra apvalūs,  $\theta = 2.451$ .

Norint surasti terpės skvarbos parametrus reikia žinoti struktūros  $S$  parametrus. Juos panaudojant galima surasti terpės kompleksinį lūžio rodiklį  $n$  ir banginę varžą  $z$  [36]:

$$n = \frac{1}{kd} \arccos \left( \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right) \quad (14)$$

čia:  $k$  – bangos numeris,

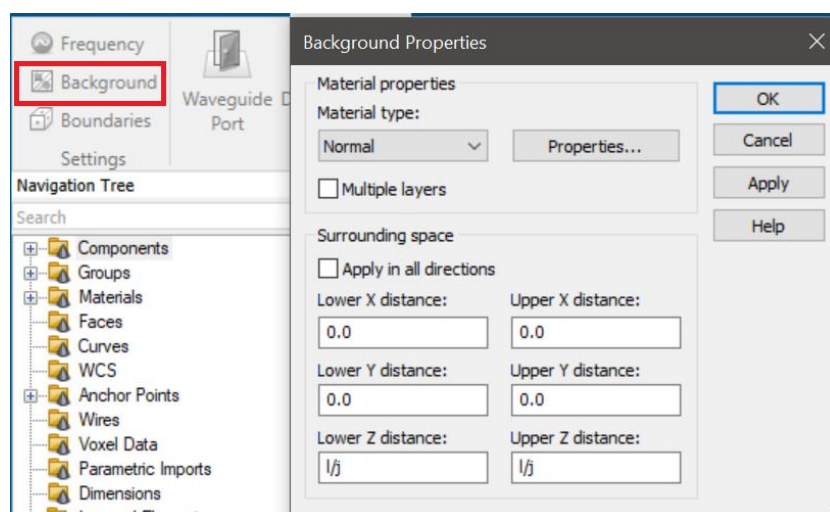
$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (15)$$

Toliau galima apskaičiuoti metamedžiagos efektinę dielektrinę ir magnetinę skvarbas [36]:

$$\varepsilon = \frac{n}{z}, \mu = nz \quad (16)$$

## 2.2. Modeliavimo metodikos sudarymas

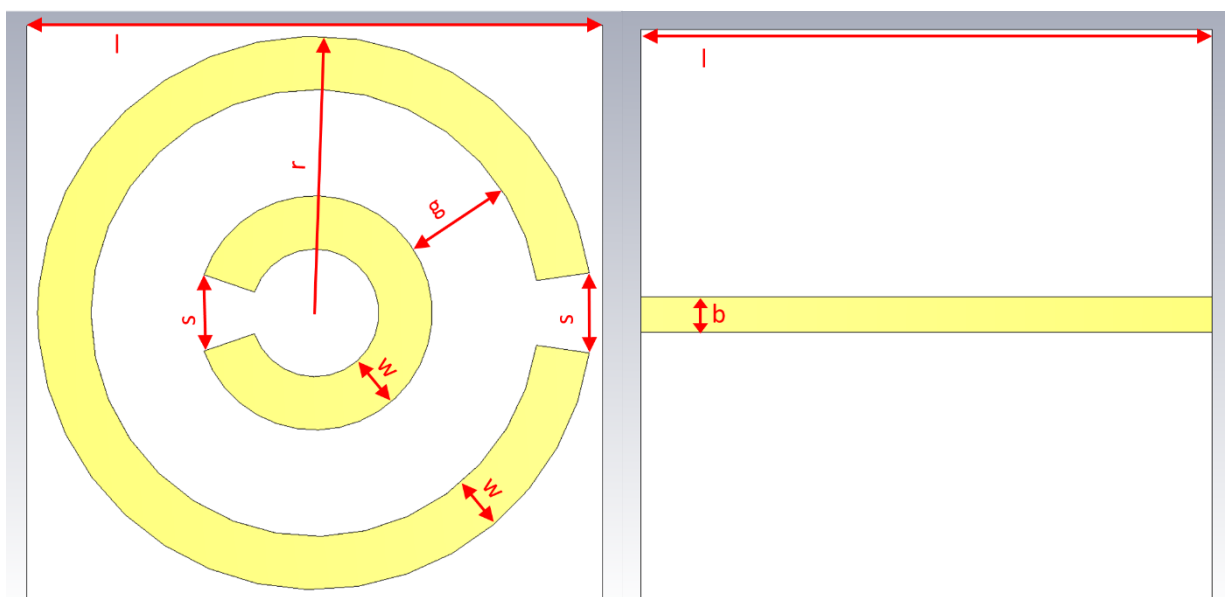
Šiame tyrime pasirinkta naudoti modeliavimo programinį paketą *CST Microwave Studio*, skirtą viso EM spektro skaičiavimams. Šia įranga galima atlikti hibridinį modeliavimą, todėl galima lanksčiau ir paprasčiau analizuoti ištisas sistemas, sudarytas iš kelių komponentų. Nagrinėjimas neapsiriboja vien tik EM bangomis, bet gali apimti ir šiluminį bei mechaninį poveikį ir grandinių atkūrimą. Ši įranga suteikia didelių pranašumų, nes padeda sutrumpinti kūrimo ciklus ir sumažinti jų sąnaudas. Simuliacija leidžia naudoti virtualų prototipų kūrimą [54]. Galima optimizuoti prietaiso veikimą, nustatyti ir sumažinti galimas atitikties problemas ankstyvuoju projektavimo proceso etapu, sumažinti reikalingų fizinių prototipų skaičių, sumažinti bandymų nesėkmių ir atšaukimo riziką. Taip pat viena svarbiausių šios įrangos pasirinkimo priežasčių yra nemokamos studentinės versijos prieinamumas.



8 pav. Aplinkos parametrų nustatymas *CST* aplinkoje

Papildomiems tyrimams, kuriuos yra sudėtinga atlikti naudojantis *CST Microwave Studio*, yra naudojamas programinis paketas *COMSOL Multiphysics*. Tai yra komercinis baigtinių elementų analizės programinės įrangos paketas, skirtas fizikinėms problemoms modeliuoti ir imituoti. Jis

leidžia inžinieriams ir mokslininkams kurti sudėtingus daugiafizinis modelius, vienoje modeliavimo aplinkoje derinant įvairias fizikos sritis, pavyzdžiui, elektromagnetiką, struktūrinę mechaniką, skysčių dinamiką, akustiką ir šilumos perdavimą [53].



9 pav. Sumodeliuotas metamedžiagos elementas CST aplinkoje iš abiejų pusių

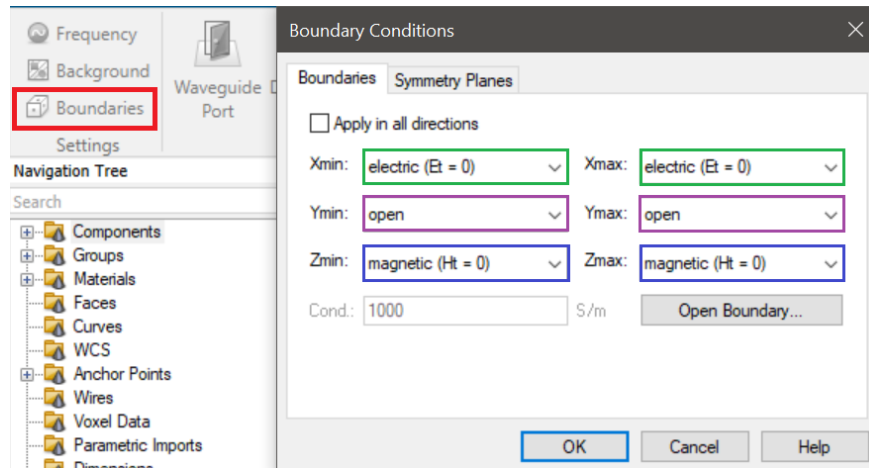
1 lentelė. Modeliuojamo metamedžiagos elemento parametrai

Parametro pavadinimas	Parametro vertė
Substrato dielektrinė skvarba $\epsilon$	4,3
Substrato kraštinės ilgis $l$ , mm	10,8
Substrato storis $h$ , mm	1,6
Varinio sluoksnio storis $t$ , $\mu\text{m}$	35
Išorinio žiedo spindulys $r$ , mm	5
Žiedų plotis $w$ , mm	1,2
Atstumas tarp žiedų $g$ , mm	1,97
Žiedų išpjovų ilgis $s$ , mm	3
Juostelės plotis $b$ , mm	0,84

### 2.2.1. Metamedžiagos struktūrinio elemento tyrimas bangolaidyje

Norint padaryti elemento modelį pirmiausia yra nubraižomas stačiakampio gretasienio formos pagrindas. Braižant figūras galima joms priskirti medžiagas iš jau esančių bibliotekoje arba galima sukurti medžiagą aprašant jos fizikinius parametrus. Vienoje pagrindo pusėje yra nubraižomi daliniai žiedai, o kitoje – žiedų išpjovoms lygiagreti juostelė. Figūrų matmenis galima aprašyti skaitine forma arba formulėmis, priklausančiomis nuo apsiraišytų parametru.

Tyrimas bangolaidyje susideda iš metamedžiagos elemento patalpavimo tarp dviejų bangolaidžio angų. Bangolaidžio angų dydis aprašomas nustatant aplinkos sąlygas (žr. 8 pav.), o ribinėse sąlygose nurodoma kaip elementas bus išdėstytas pagal bangos poliarizaciją (žr. 10 pav.). Atlikus modeliavimą gaunami elemento  $S$  parametrai, iš kurių naudojant aukščiau aprašytą matematinę modelį išskaičiuojamos magnetinės bei dielektrinės skvarbų ir lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio.



10 pav. Ribinių sąlygų nustatymas CST aplinkoje

### 2.2.2. Metamedžiagos struktūros tyrimas plokščiaja banga

Tiriant metamedžiagos saveiką su plokščiaja banga pasirinkta naudoti *COMSOL Multiphysics* paketą, nes *CST* neleidžia aprašyti parametru kitimo dėsnį tam tikromis ašimis arba nuo kitų parametru.

Norint efektyviau patikrinti metamedžiagos gebėjimą neatspindėti bangų ir taip maskuoti tam tikrus objektus buvo pasirinkta žiedinė struktūra. Tokios struktūros didžiausias privalumas tai, kad viduje esantis objektas dvimatėje erdvėje yra apgaubiamas iš visų pusių, o iš žiedinių segmentų konstruojant sferą būtų galima pasiekti maskavimą trimatėje erdvėje [50,51].

$$\varepsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2, \quad \mu_r = \left(\frac{r-a}{r}\right)^2, \quad \mu_\theta = 1 \quad (17)$$

Pirmiausia yra reikalinga atlikti radialinės koordinatės transformaciją, kadangi tiriama metastruktūra turi ermtę viduje, todėl cilindrinės koordinatės nėra tinkamos.

$$0 < r < b \rightarrow a < r' < b \quad (18)$$

čia:  $r$  – radialinė koordinatė prieš transformaciją,  
 $r'$  – radialinė koordinatė po transformacijos,  
 $a$  – struktūros vidinis spindulys, m,  
 $b$  – struktūros išorinis spindulys, m.

Paprastas transformacijos būdas šiam tikslui pasiekti yra toks:

$$r' = \frac{b-a}{b}r + a, \quad \theta' = \theta, \quad z' = z \quad (19)$$

čia:  $\theta$  – kampinė koordinatė prieš transformaciją,  
 $z$  – vertikaloji koordinatė prieš transformaciją,  
 $\theta'$  – kampinė koordinatė po transformacijos,  
 $z'$  – vertikaloji koordinatė po transformacijos.

Po šios transformacijos gaunamos tokios dielektrinės bei magnetinės skvarbų komponentių išraiškos:

$$\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r-a}{r}, \quad \varepsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r-a}, \quad \varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{r-a}{r} \quad (20)$$

Galima pastebėti, kad visos komponentės gali būti išreikštos kaip funkcijos, priklausančios nuo spindulio, o tai reiškia, kad metamedžiagos konstrukcija yra sudėtinga. Tačiau tyrimo metu laukas poliarizuotas išilgai cilindro ašies, todėl galima pasinaudoti supaprastinimu, kadangi svarbūs parametrai yra tik  $\epsilon_z$ ,  $\mu_r$  ir  $\mu_\theta$ . Norint parodyti bangos trajektoriją, kurią lemia tik dispersija, struktūros viduje, įgyjama lankstumo renkantis skvarbų funkcines išraiškas [6,40]. Pavyzdžiui, (20) formulėje pateiktos išraiškos turi tokią pačią dispersiją kaip ir formulėje (17), o tai reiškia, kad bangos terpėje turės tokią pačią laukų kitimo dinamiką.

Abiem atvejais banga terpėje sklis ta pačia trajektorija, todėl lūžio kampai į terpę arba iš jos taip pat bus tie patys. Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad supaprastintu atveju negalima pasiekti nulinio atspindžio [10]. Kadangi *COMSOL* aplinka nepalaiko išraiškų cilindrinėje koordinatinių sistemoje yra reikalinga atlikti papildomą transformaciją į stačiakampę sistemą (žr. 11 pav.).

Variables a)		Variables b)	
Name	Expression	Name	Expression
r	$\sqrt{x^2+y^2}$	r	$\sqrt{x^2+y^2}$
th	$\text{atan2}(y,x)$	th	$\text{atan2}(y,x)$
nr	$(r-a)/r$	nr	$\mu_r \text{PTFE}(r) + j * \mu_i \text{PTFE}(r)$
nth	$r/(r-a)$	nth	1
nz	$(b/(b-a))^2 * (r-a)/r$	nz	$\epsilon_r \text{PTFE}(r) + j * \epsilon_i \text{PTFE}(r)$
nxx	$nr * \cos(\text{th})^2 + nth * \sin(\text{th})^2$	nxx	$nr * \cos(\text{th})^2 + nth * \sin(\text{th})^2$
nxy	$(nr - nth) * \sin(\text{th}) * \cos(\text{th})$	nxy	$(nr - nth) * \sin(\text{th}) * \cos(\text{th})$
nyy	$nth * \cos(\text{th})^2 + nr * \sin(\text{th})^2$	nyy	$nth * \cos(\text{th})^2 + nr * \sin(\text{th})^2$

**11 pav.** Medžiagos parametų kitimo dėsnų aprašymas *COMSOL* aplinkoje a) naudojant teorines išraiškas, b) naudojant interpoliuotus duomenis

Sudarius metamedžiagos struktūrą iš atskirų elementų toliau tyrimas vykdomas naudojant plokščiąją EM bangą. Erdvė, kurioje bus patalpinta struktūra, yra aprašoma aplinkos ir ribinėmis sąlygomis. Modeliuojama struktūra nėra sudaryta iš pavienių elementų, o yra laikoma vientisa nusakant parametų kitimo dėsniais formulėmis arba naudojant interpoliaciją iš duomenų. Pasirinkus tikslų dažnį ir atlikus modeliavimą gaunamas elektrinio bei magnetinio laukų pasiskirstymas aprašytoje erdvėje, kur galima matyti struktūros sąveiką su užsiduotų parametų plokščiąją banga, ir taip įvertinti gebėjimą paslėpti viduje struktūros esantį objektą.

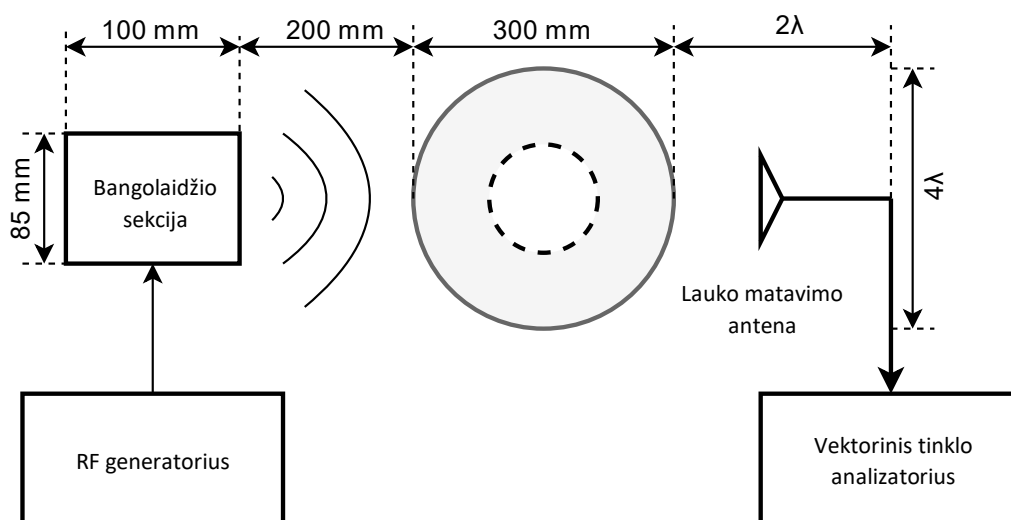
### 2.3. Eksperimentinių tyrimų metodikos sudarymas

Eksperimentinis tyrimas bus vykdomas naudojant RF generatorių, spinduliuojančią bangolaidžio sekciją, vektorinį tinklo analizatorių ir lauko matavimo anteną, kurios parametrai yra taip pat parinkti pagal tiriamojo objekto rezonansinį dažnį. Bangolaidis yra parinktas pagal tiriamojo objekto modeliavimo rezonansinį dažnį, kad bangolaidžio kritinis dažnis būtų žemesnis už eksperimento dažnį. Naudojamoje sistemoje panaudotas stačiakampis 48 mm ilgio ir 24 mm pločio vidinio skerspjuvio bangolaidis.

Sistema bus patalpinta ant sužymėtos plokštumos, kai tarp bangolaidžio sekcijos ir lauko matavimo antenos nėra tiriamojo objekto ir kai jis yra patalpintas tarp jų. Kiekviename sužymėtame žingsnyje bus matuojama bangos fazė. Turint tikslias antenos pozicijas  $x$  ir  $y$  ašyse ir jose išmatuotas fazes bus galima pateikti bangos sklidimo grafikus.

Tyrimo matavimams atlikti pasirinkta naudoti spektro analizatorių *Keysight FieldFox N9916A*. Jis pasirinktas dėl tyrimui tinkamo 14 GHz darbinio dažnių ruožo bei galimybės atlikti vektorinę tinklo

analizę nenaudojant atskiro generatoriaus [56]. Analizatoriaus išėjimo išvadas prijungtas prie bangolaidžio, o įėjimo išvadas – prie antenos.



12 pav. Eksperimento struktūrinė schema

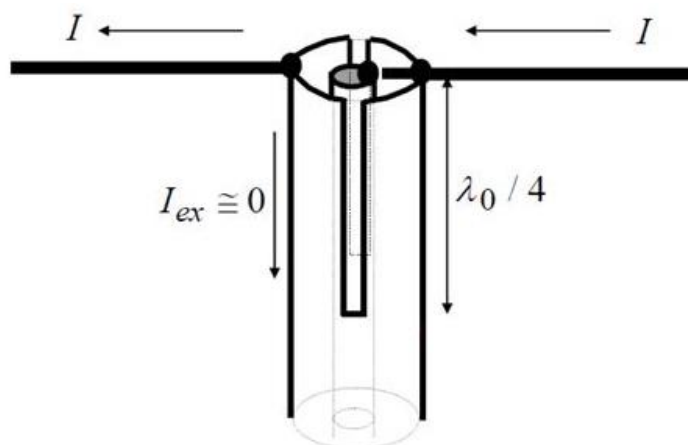
Atliekant tyrimą reikia tinkamai parinkti atstumą nuo bangolaidžio iki tiriamojo objekto. Tam reikia apskaičiuoti tolimosios zonos pradžia, kuri apibrėžia maksimaliąją leistiną fazinę paklaidą. Ši paklaida ne didesnė kaip  $\frac{1}{16}$  periodo, kai tolimosios zonos atstumas atitinka [31]:

$$r \geq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (21)$$

čia:  $L$  – didžiausias antenos linijinis matmuo, m,  
 $\lambda$  – bangos ilgis, m,

Tolimoji zona dar vadinama Frauhferio difrakcijos zona. Banga čia yra sferinio pobūdžio, tad jos laukų amplitudės tolydžiai mažėja  $\frac{1}{r}$ , o Pointingo vektorius –  $\frac{1}{r^2}$  dėsnio. Kadangi sferos spindulys yra didelis, tai stebėjimo taške banga laikoma lokališkai plokščia [31].

Prijungiant anteną prie perdavimo linijos svarbu efektyviai išnaudoti visą turimą siųstuvo galią perdavimo atveju ir antenos galią priėmimo atveju. Yra du pagrindiniai aspektai: antenos ir perdavimo linijos impedanso atitikimas ir srovės pasiskirstymo antenoje sužadinimas [4].



13 pav. Koaksialinio simetrizatoriaus tipo antena [4]

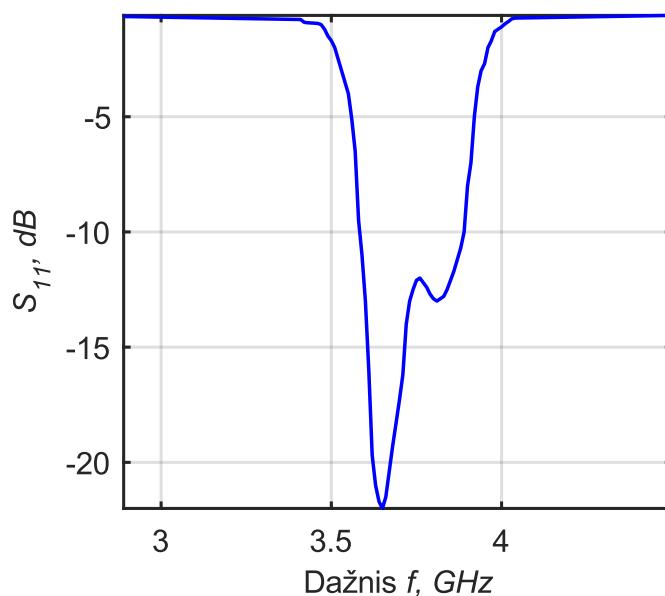


Siekiant maksimaliai pagerinti signalo perdavimą iš antenos į imtuvą, antenos varža turi būti suderinta su jungiamosios perdavimo linijos bangine varža. Paprastai tai įgyvendinama tarp antenos ir perdavimo linijos dedant impedanso derinimo grandinę. Šiam tikslui galima naudoti įvairių konfigūracijų grandynus. Idealią suderinimą tam tikru dažniu galima pasiekti panaudojant tam tikro ilgio trumpai arba atvirai sujungtas laidininko atšakas tarp perdavimo linijos ir antenos elemento jungties [23]. Kitas būdas, kurį galima naudoti antenai suderinti su perdavimo linija, yra naudoti ketvirčio bangos ilgio transformatorių, kurio impedansas  $Z_{TR}$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Z_{TR} = \sqrt{Z_{IN}Z_{OUT}} \quad (22)$$

čia:  $Z_{IN}$  – perdavimo linijos impedansas,  $\Omega$ ,  
 $Z_{OUT}$  – antenos įėjimo impedansas,  $\Omega$ .

Jei antena jungiama dviejų laidų simetrine perdavimo linija, ji sudaro subalansuotą sistemą. Tačiau šiuo atveju bus naudojama koaksialinė linija, kurios vidinis ir išorinis laidininkai nėra simetriškai sujungti su simetrinėmis dipolio atšakomis. Toks jungimas sukuria disbalansą, kai išorinio laidininko paviršiuje sužadinama srovė, daranti nepageidaujamą poveikį antenos spinduliuotei ir impedansui. Srovės, tekančios išorinio laidininko paviršiumi, dydį lemia impedansas tarp ekrano ir įžeminimo. Keičiant šį impedansą galima sumažinti srovę išorinio laidininko paviršiuje ir taip sumažinti nepageidaujamus ir neprognozuojamus poveikius [19]. Įrenginys, kurį galima naudoti sistemos subalansavimui, sumažinant arba visai panaikinant išorinę srovę, vadinamas simetrizatoriumi (*balun*) [4].

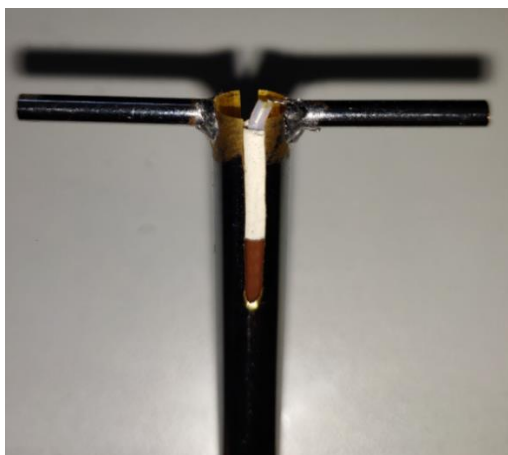


**14 pav.** Antenos parametro  $S_{11}$  dažninė charakteristika

Vienas iš simetrizatoriaus tipų yra koaksialinis (žr. 13 pav.). Mechanškai jis įgyvendinamas išpjaunant išorinio metalinio laidininko dalį priešingose pusėse. Likusios priešingos išorinio laidininko dalys yra dvi sutrumpintos ketvirčio bangos ilgio lygiagrečios perdavimo linijos. Šių linijų atviro galo įėjimo varža yra didelė, o idealiu atveju būtų begalinė. Taigi, srovė yra slopinama arba visiškai pašalinama ir sistema tampa subalansuota [4].

Tyrimui atlikti pagaminta priėmimo antena su perpjautu koaksialiniu simetrizatoriumi. Taip pasirinkta dėl 5G aktualumo šiomis dienomis – šis dažnis patenka į vieną iš plačiausiai naudojamų šio ryšio juostų. Antena pagaminta iš nikeliuoto žalvario vamzdelių (žr. 15 pav.). Įpjovų ilgis parinktas lygus ketvirčio bangos ilgiui, o dipolio atšakos – artimos šiam dydžiui. Šios antenos

atspindžio koeficiento pikas gautas -22 dB ties 3,65 GHz. Nustatyta, kad dažnių ruožas -10 dB atskaitos lygyje yra 3,58–3,89 GHz, o -3 dB lygyje – 3,53–3,94 GHz (žr. 14 pav.).



**15 pav.** Sukonstruota simetrizuota koaksialinė antena

### 3. Metamedžiagos elementų ir neatspindinčios struktūros modelių analizė

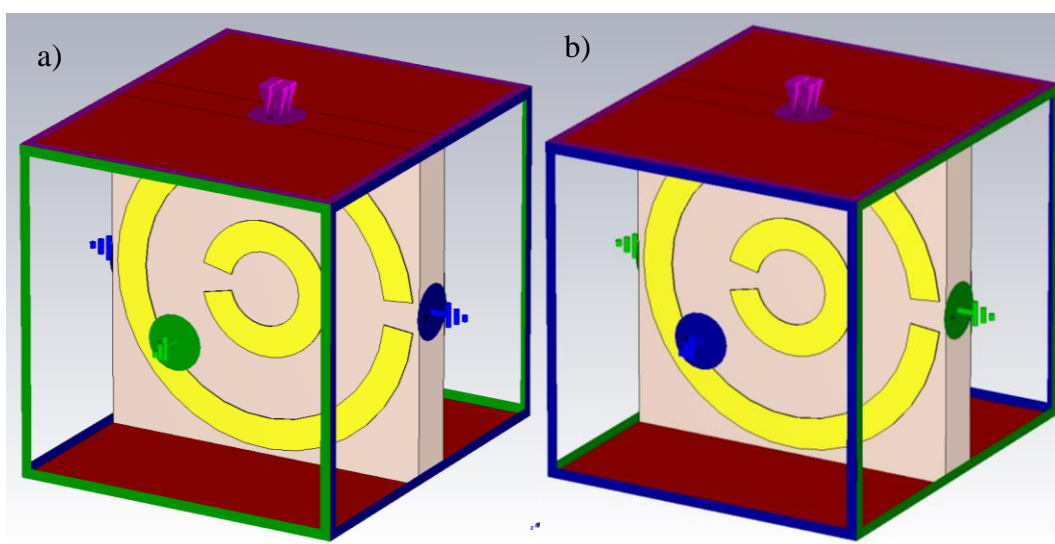
Naudojantis *CST Studio* programine įranga buvo sumodeliuotas metamedžiagos struktūrinis vienetas, kurio matmenys pateikti 1 lent. Vienoje pusėje sumodeliuoti du žiedai su išpjovomis priešingose pusėse, o kitoje pusėje sumodeliuota juostelė, lygiagreti žiedų išpjovoms.

#### 3.1. Pavienių rezonatorių tyrimas

Nusistačius struktūrinio vieneto matmenis jie perkeliama į modeliavimo aplinką tolimesniems skaičiavimams. Keičiant orientaciją bangolaidyje bei bangos poliarizaciją apskaičiuojami  $S$  parametrai, iš kurių galima nustatyti magnetinės bei elektrinės skvarbų, ir lūžio rodiklio priklausomybes nuo dažnio. Gavus efektyviausią orientaciją modeliuojami nedideli jų masyvai keičiant jų tarpusavio padėtį bei atstumą taip siekiant surasti efektyviausią vienetų išdėstymą tarpusavyje.

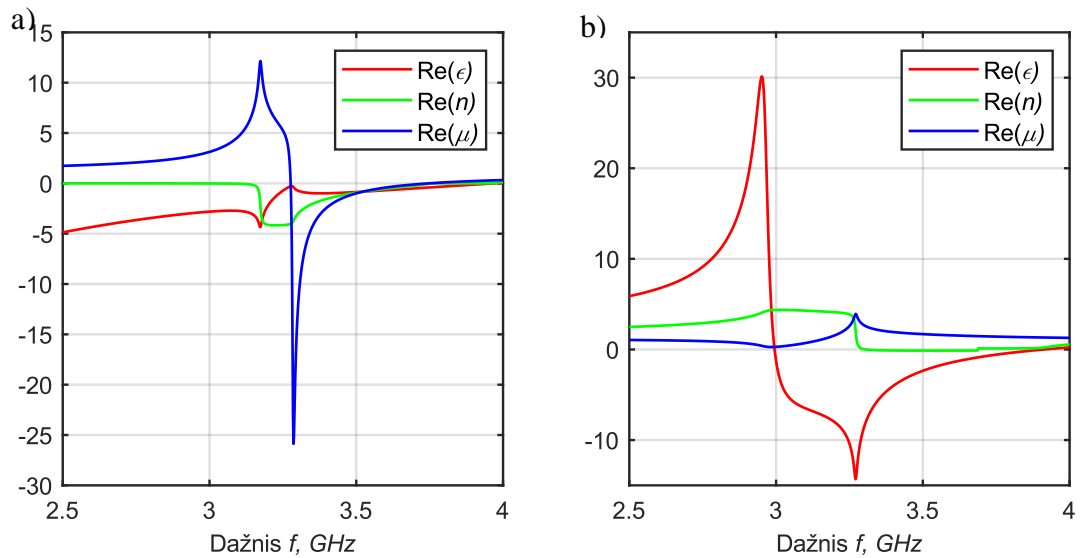
##### 3.1.1. Poliarizacijos ir parametrų tyrimas

Pirmiausia pasirinkta orientaciją, kai magnetinis laukas statmenai kerta žiedus, elektrinis laukas yra lygiagretus juostelei, o bangolaidžio angos išdėliotos metamedžiagos elemento kraštuose (žr. 16 pav. b). Pagal užduotus matmenis sumodeliavus gautas rezonansinis dažnis yra 3,3 GHz.



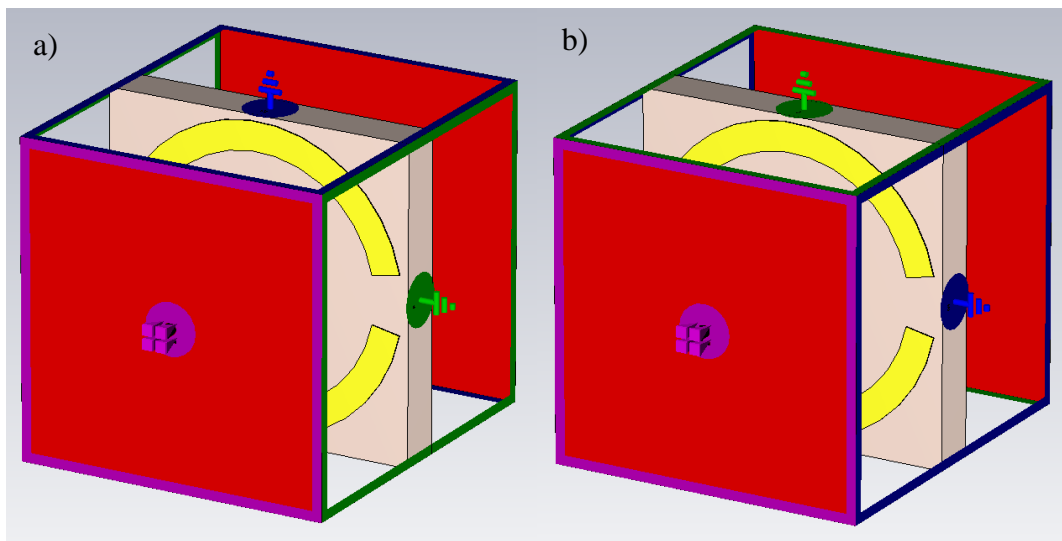
**16 pav.** Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a)  $E$  laukas statmenas žiedams ir  $H$  laukas lygiagretus metalinei juostelei, b)  $H$  laukas statmenas žiedams ir  $E$  laukas lygiagretus metalinei juostelei

Matoma, kad prieš pasiekiant rezonansą magnetinė skvarba yra teigiama ir pasiekia savo maksimumą, o dielektrinė skvarba pasiekia lokalų minimumą (žr. 17 pav. a). Rezonanso metu magnetinė skvarba keičia savo ženklą ir šiek tiek toliau pasiekia savo minimumą, o dielektrinė skvarba pasiekia savo lokalų maksimumą. Aplink rezonansinį dažnį lūžio rodiklis yra neigiamas.



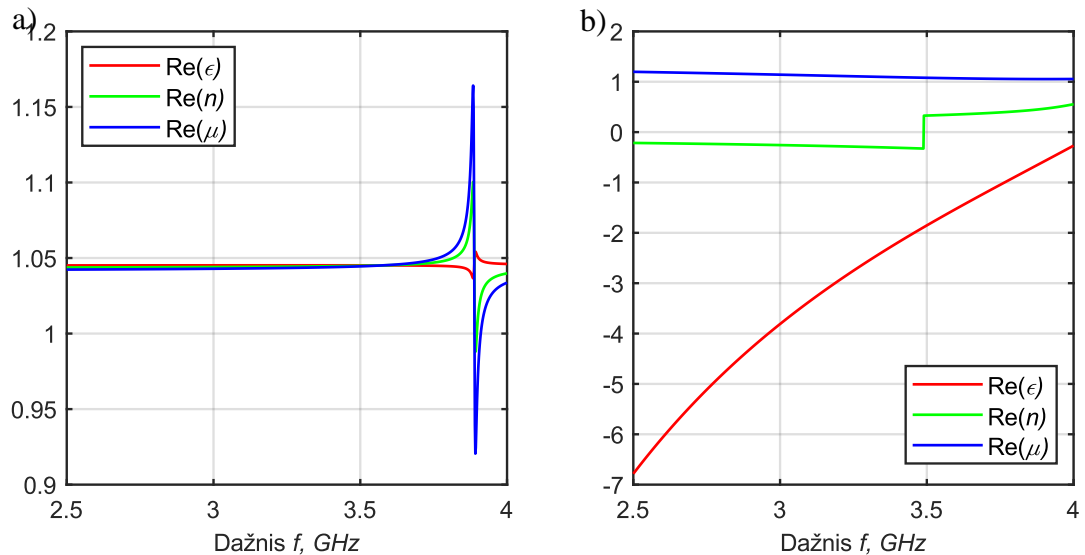
**17 pav.** Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a)  $H$  laukas statmenas žiedams ir  $E$  laukas lygiagretus metalinei juostelei, b)  $E$  laukas statmenas žiedams ir  $H$  laukas lygiagretus metalinei juostelei

Pakeitus magnetinio ir elektrinio lauko išdėliojimą (žr. 16 pav. a) gaunamas atvirkščias efektas. Pastebima, kad dielektrinė skvarba prieš rezonansą yra teigiama ir pasiekia savo maksimumą, o po rezonanso tampa neigiama ir pasiekia savo minimumą (žr. 17 pav. b). Magnetinė skvarba visame dažnių ruože išlieka teigiama ir nežymiai kinta aplink rezonansinį dažnį. Lūžio rodiklis visame dažnių ruože išlieka teigiamas ir aplink rezonansą pasiekia savo maksimalią vertę.



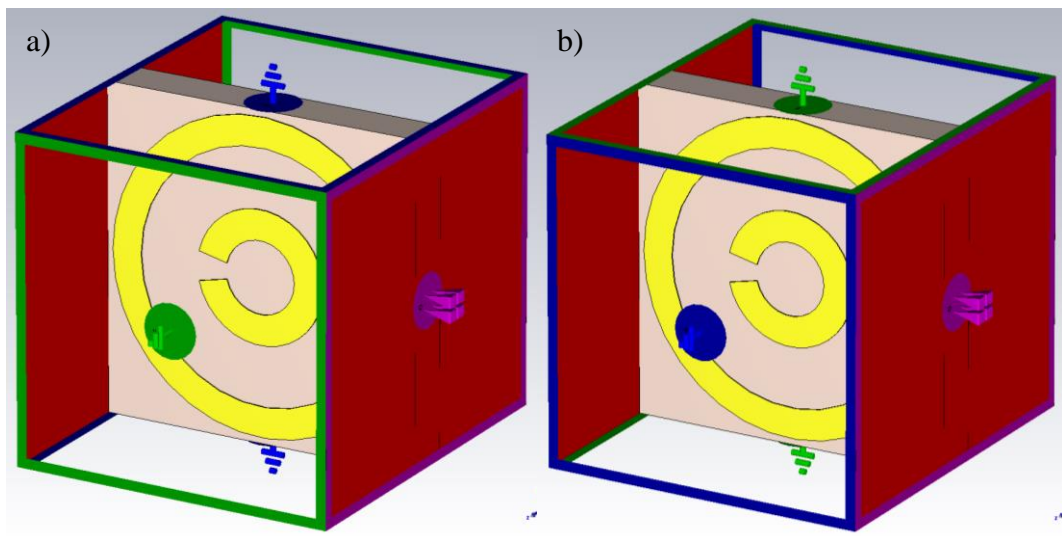
**18 pav.** Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a)  $H$  laukas yra lygiagretus žiedams ir  $E$  laukas lygiagretus metalinei juostelei, b)  $E$  laukas yra lygiagretus žiedams ir  $H$  laukas lygiagretus metalinei juostelei

Pakeitus bangolaidžio orientaciją į statmeną rezonatoriaus (žr. 18 pav. a ir b), o elektriniam bei magnetiniam laukams esant lygiagrečiai žiedams ir juostelei 19 pav. a) matomas nedidelės amplitudės rezonansas, aplink kurį tiek skvarbų, tiek lūžio rodiklio vertės kinta minimaliai. O b) magnetinė skvarba visame dažnių diapazone išlieka teigiama, dielektrinė skvarba yra neigiama, tik lūžio rodiklis ties 3,5 GHz tampa teigiamas.



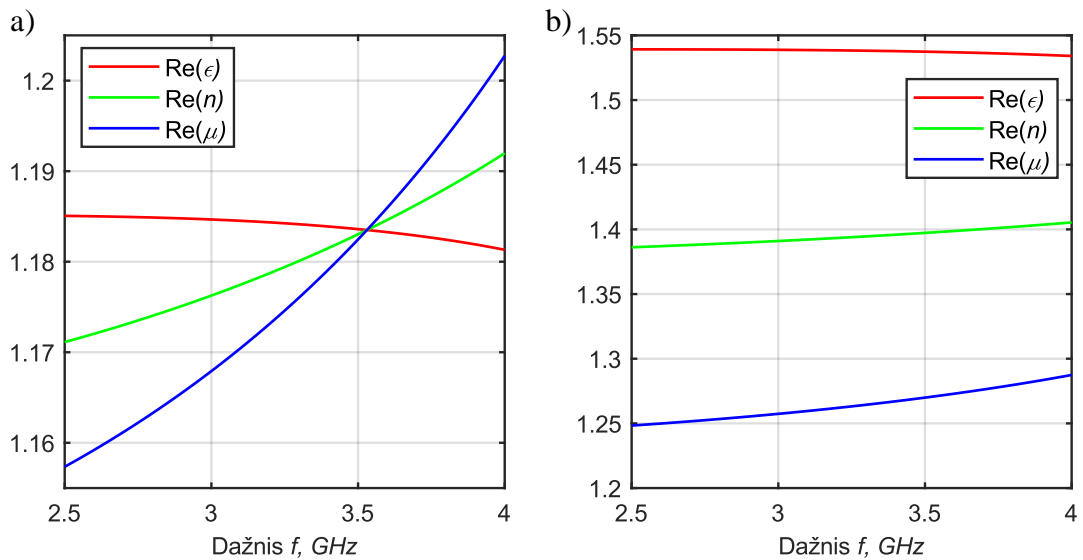
**19 pav.** Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a)  $H$  laukas yra lygiagretus žiedams ir  $E$  laukas lygiagretus metalinei juostelei, b)  $E$  laukas yra lygiagretus žiedams ir  $H$  laukas lygiagretus metalinei juostelei

Pakeitus rezonatoriaus orientaciją bangolaidyje (žr. 20 pav.), kai žiedus ir juostelę kertantys laukai yra statmeni 21 pav. a) ir b) matoma, kad metamedžiaga yra visiškai neveiksni. Abiem atvejais tiek magnetinė, tiek dielektrinė skvarbos ir lūžio rodiklis išlieka teigiami, rezonansas nėra pastebimas.



**20 pav.** Metamedžiagos elementas bangolaidyje, kai a)  $E$  laukas yra statmenas žiedams ir  $H$  laukas statmenas metalinei juostelei, b)  $H$  laukas yra statmenas žiedams ir  $E$  laukas statmenas metalinei juostelei

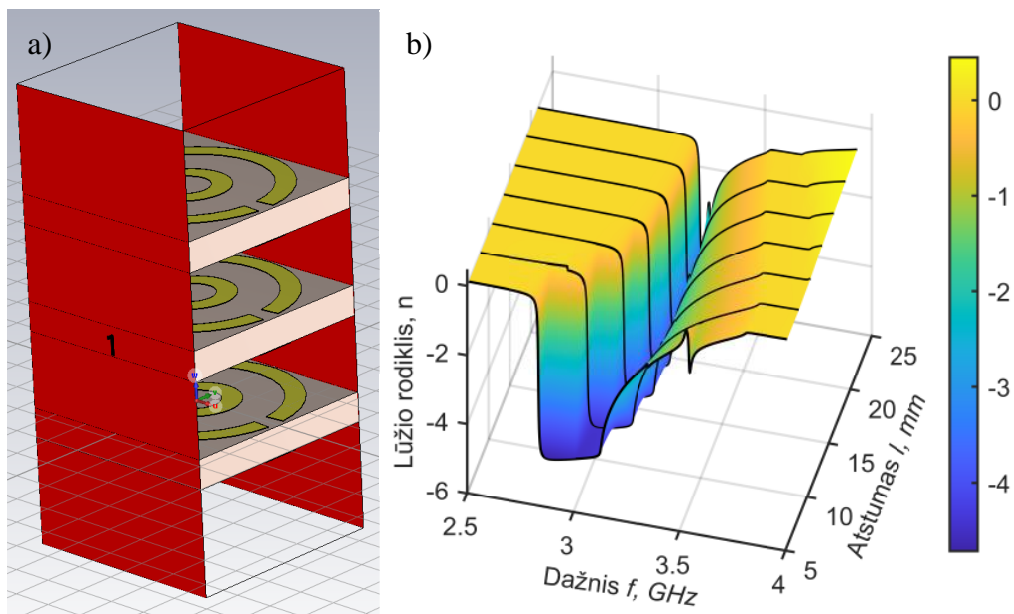
Atlikus modeliavimą iš gautų matavimų galima daryti išvadą, kad geriausias rezultatas pasiekiamas, kai magnetinis laukas statmenai kerta žiedus, o elektrinis laukas yra lygiagretus juostelei. Sužadinus išorinį magnetinį lauką, kuris yra statmenas elemento plokštumai, žieduose indukuojama EM jėga, kuri savo ruožtu sukelia tekančią kintamą efektinę srovę. Kitais atvejais gautas rezonansas nepatenka į norimų dažnių sritį arba jo nėra, todėl metamedžiagos elemento reakcija į EM bangas neatitinka užsaiduotų reikalavimų. Metalinės juostelės, sužadintos lygiagrečiai elemento plokštumai veikiančiu elektriniu lauku, kolektyviai elgiasi kaip maži rezonansiniai dipoliai.



**21 pav.** Magnetinės ir dielektrinės skvarbų bei lūžio rodiklio dažninės charakteristikos, kai a)  $E$  laukas yra statmenas žiedams ir  $H$  laukas statmenas metalinei juostelei, b)  $H$  laukas yra stamenas žiedams ir  $E$  laukas stamenas metalinei juostelei

### 3.1.2. Rezonatorių grupių tyrimas

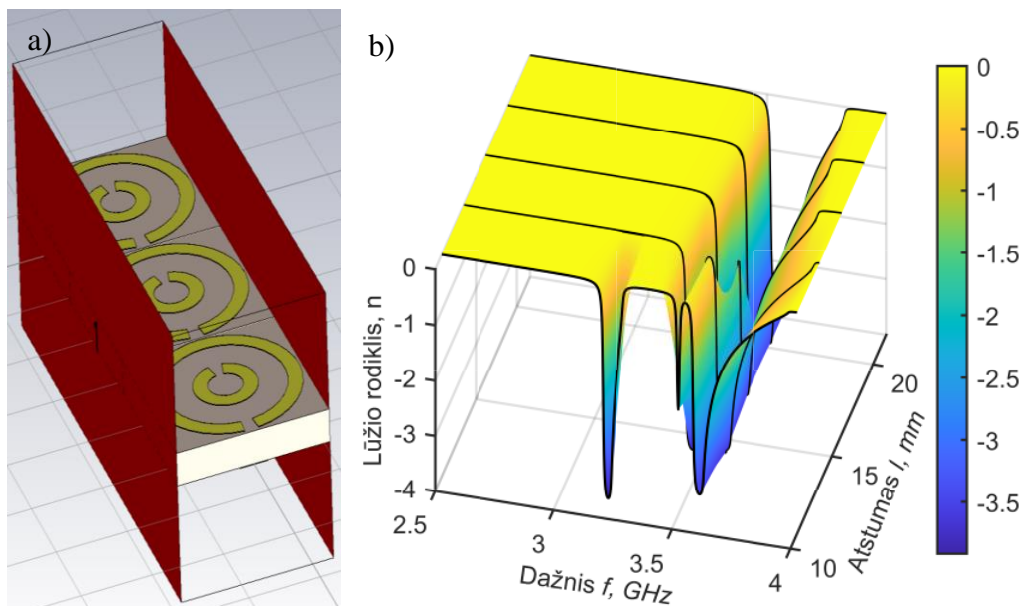
Suradus veiksmingiausią orientaciją buvo atliekami tyrimai jungiant rezonatorius į masyvus ir stebint charakteristikų pokyčius keičiant trimatį išdėstymą ir tarpusavio atstumą. Pirmiausia buvo išbandyta vertikali konfigūracija, kuomet trys struktūriniai vienetai buvo patalpinti į bangolaidį kintamu atstumu nuo pusės elemento ilgio iki dvigubo jo ilgio. Tokie režiai pasirinkti todėl, kad esant mažesniam atstumui jos veikia vieną kitą, o esant per dideliu atstumui elementai veikia ne kaip visuma, o individualiai.



**22 pav.** a) Vertikaliai išdėliotų elementų masyvas bangolaidyje, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo

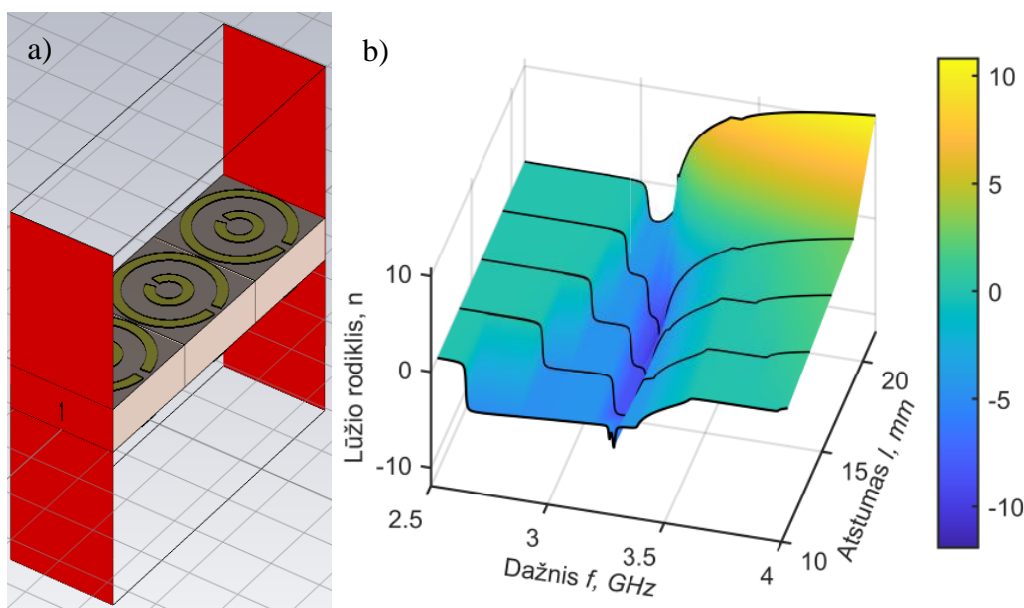
Išdėliojus elementus vertikaliai gauta, kad didėjant atstumui tarp struktūrinių vienetų mažėja dažnių ruožas, kada lūžio rodiklis yra neigiamas, o lūžio rodiklio pikas artėja prie nulio. Esant mažesniems atstumams pastebima, kad dažnių ruožas yra platesnis ir lūžio rodiklis labiau neigiamas, todėl tokia struktūra būtų labiau plačiajuostė. Tačiau vienas iš tokios struktūros trūkumų yra sudėtingas gamybos

procesas, ypač kai darbinis dažnis yra ganėtinai didelis. Kita vertus, kai atstumai yra sąlyginai dideli, dažnių ruožas siaurėja, todėl tokia struktūra tampa selektyvesnė dažniui. Taip pat šios struktūros gamyba būtų paprastesnė, tačiau bendri matmenys būtų didesni.



**23 pav.** a) Horizontaliai išdėliotų elementų masyvas bangolaidyje, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo

Kitas būdas yra elementų išdėstymas bangolaidyje horizontaliai. Atstumas tarp vienetų centrų keičiamas nuo viengubo ilgio iki dvigubo. Galima pastebėti, kad horizontalus atstumas tarp struktūrinių vienetų turi mažesnę įtaką dažninėms charakteristikoms, nei vertikalus. Kintant atstumui matoma, kad esant vertėms, artimoms vieno elemento ilgiui, be pagrindinio rezonansinio piko atsiranda papildomi, kurie didėjant atstumui slenka link pagrindinio ir ilgainiui susilieja. Lūžio rodiklio piko vertė praktiškai nepriklauso nuo atstumo. Todėl galima teigti, kad keičiant horizontalų atstumą iki tam tikros ribos, parametų pakitimas išlieka minimalus.



**24 pav.** a) Horizontaliai išdėliotų elementų, pasuktų 90° aplink savo ašį, masyvas, b) lūžio rodiklio priklausomybės nuo dažnio ir tarpusavio atstumo

Palikus horizontalų išdėstymą, tačiau elementus pasukus  $90^\circ$  gaunama, kad neigiamo lūžio rodiklio dalies dažnių ruožas yra platus lyginant su kitais variantais. Taip pat matoma, kad vertė aplink rezonansą yra labiausia neigiama iš visų kitų modeliuotų variantų. Tačiau vis labiau didinant atstumą siaurėja dažnių ruožas ir lūžio rodiklio vertė ties rezonansu artėja link nulio.

Atlikus masyvų modeliavimą, kuomet elementai išdėlioti skirtingomis kryptimis, geriausi rezultatai pasiekiami, kai tarpusavio atstumai yra artimi elementų dydžiui. Esant dideliems atstumams struktūrinių vienetų matmenys tampa sąlyginai maži palyginus su visos struktūros dydžiu, todėl jų poveikis tampa nepastebimas arba neigiamas.

### **3.2. Metastruktūrų modeliavimas**

Modeliuojant neatspindinčias struktūras, kuriose galima paslėpti radijo bangas atspindinčius objektus, yra reikalinga, kad bangos fronto forma prieš patenkant į struktūrą ir už jos beveik nesiskirtų. Tokį efektą galima pasiekti keičiant lūžio rodiklio vertę kiekvienam metastruktūros sluoksniui ir taip bangą priversti keliauti keliu apeinant kliūtį.

Kadangi metastruktūra sudaryta iš pavienių rezonatorių ir yra cilindro formos, banga pirmiausia kirs struktūros segmentą, kuris yra statmenas sklidimo kryptčiai. Remiantis 19 pav. a) matyti, kad lūžio rodiklis yra artimas vienetui, todėl banga nekeičia savo trajektorijos. Bangai sklidant toliau jos kritimo kampas mažėja, kitaip sakant bangos krypties atžvilgiu rezonatoriai sukasi aplink savo ašį vis daugiau iki kol tampa lygiagretūs. Todėl galima daryti išvadą, kad rezonatorių dažninės charakteristikos pobūdis kinta nuo 19 pav. a) pateikto varianto iki 17 pav. a) varianto.

Modeliuojamus rezonatorių masyvus galima tirti kaip metastruktūros segmentą. Kada atskirų sluoksnių rezonatoriai yra vienodi, galima gauti platesnę dažnių juostą, kurioje lūžio rodiklis yra neigiamas, arba didesnę charakteristikos piko vertę (žr. 22 pav.). Keičiant rezonatorių matmenis bei formą galima sukurti lūžio rodiklio bei kitų parametru gradientą. Priklausomai nuo gradiento pobūdžio galima valdyti bangos trajektoriją struktūros viduje, todėl galima pasiekti, kad iš struktūros išėjusios bangos energija būtų kuo mažiau išsklaidyta, o forma ir kryptis išliktų nepakitę, taip sudarant įspūdį, kad banga sklinda tuščia erdve.

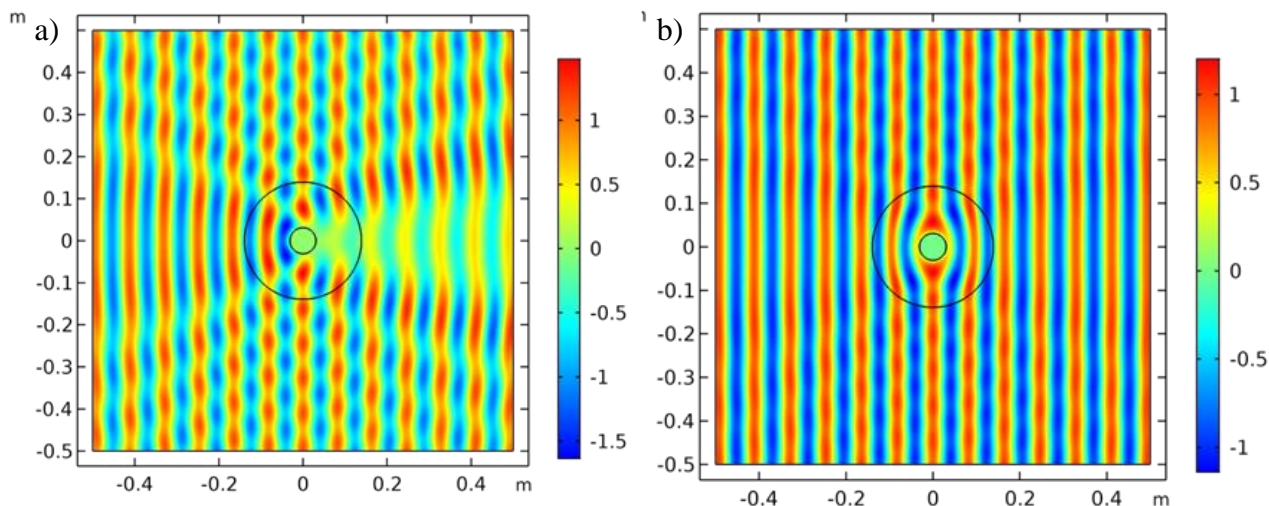
Keičiant sluoksnių aukštį dedant vienodus rezonatorius vieną ant kito galima pastebėti, kad bet kuriame struktūros skerspjūvyje parametrai išlieka nepakitę, todėl metastruktūros efektyvumas yra nepriklausomas nuo aukščio (žr. 23 pav.). Rezonatorius jungiant vienoje plokštumoje galima gauti didesnius neigiamus parametrus, nei naudojant pavienius elementus (žr. 24 pav.). Šią plokštumą išlenkus į cilindrą parametrai išlieka panašūs ir galima pasiekti, kad bangos, sklindančios vienu atstumu iš skirtingų erdvės kraštų stamenai į struktūrą, bus veikiamos vienodai.

Modeliuojama metastruktūra yra žiedo formos, kadangi jos viduje yra ertmė, kurioje bus patalpintas norimas paslėpti objektas. Konstrukcija sudaryta iš dešimties atskirų sluoksnių, bendras išorinis skersmuo yra 280 mm, vidinis skersmuo – 60 mm. Metastruktūra skirta sumažinti arba visai panaikinti kliūtis sukeltai interferencijai ir difrakcijai. Šios konstrukcijos efektyvumą galima įvertinti lyginant bangos frontų formas prieš ir po metastruktūros patalpinimo bangos kelyje.

#### **3.2.1. Metastruktūros su tolydžiu parametru gradientu modeliavimas**

Sumodeliavus žiedinę struktūrą su magnetinės skvarbos gradientu, buvo atliktas plokščiosios bangos sklidimo, difrakcijos ir interferencinio lauko tyrimas. Plokščiosios bangos sąveika su sumodeliuota idealių parametru metamedžiagos struktūra pavaizduota 25 pav. b). Banga, prasklidusi pro žiedinę struktūrą, neužlinksta ir beveik nepakeičia savo formos, nesusidaro šešėlių bei atspindžių, todėl šis objektas neturėtų būti aptinkamas EM bangomis.

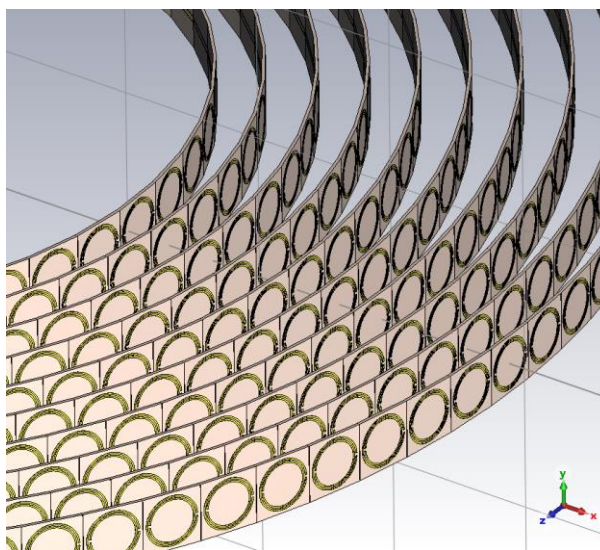




**25 pav.** Plokščiosios bangos sąveika su: a) variniu 60 mm diametro cilindru, b) idealių parametų metastruktūra, kurios viduje yra 60 mm diametro varinis cilindras

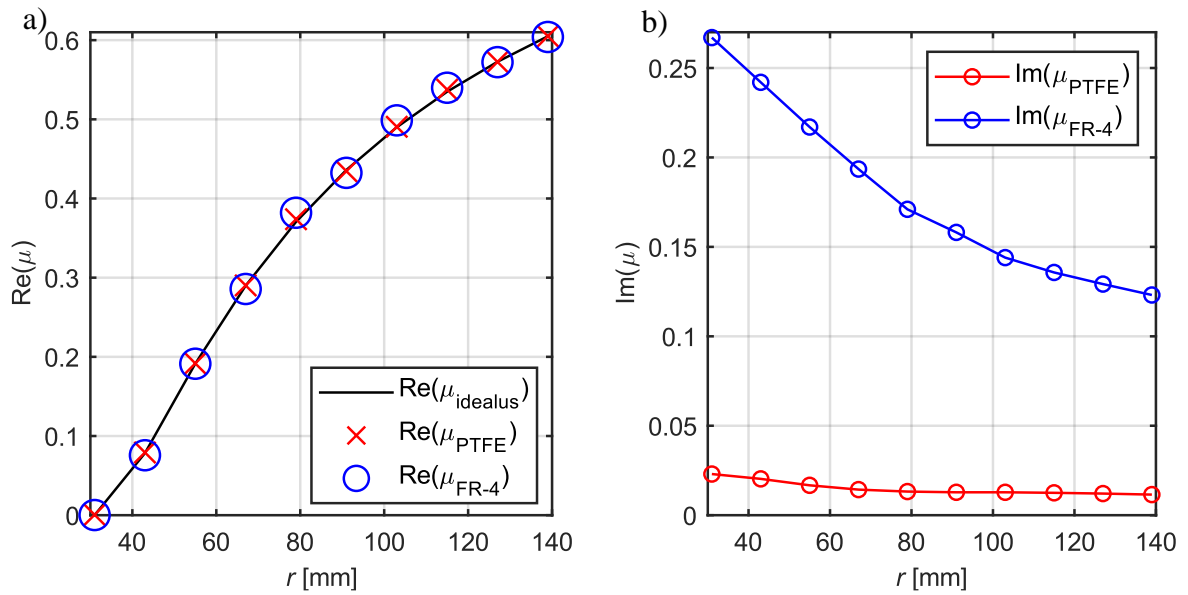
### 3.2.2. Metastruktūros modeliavimas naudojant žiedines rezonatorių struktūras

Gavus tenkinamus rezultatus modeliuojant žiedinę struktūrą su idealiais EM parametrais buvo nuspresta žiedinę struktūrą aproksimuoti pavieniais elementais. Kadangi vienas elementas palyginus su tiriamos bangos ilgiu yra pakankamai mažas, bei visa struktūra turi turėti magnetinės skvarbos gradientą, yra reikalinga struktūrą sudaryti iš kelių sluoksnių (žr 26 pav.).



**26 pav.** Struktūros, sudarytos iš pavienių elementų, pavyzdys

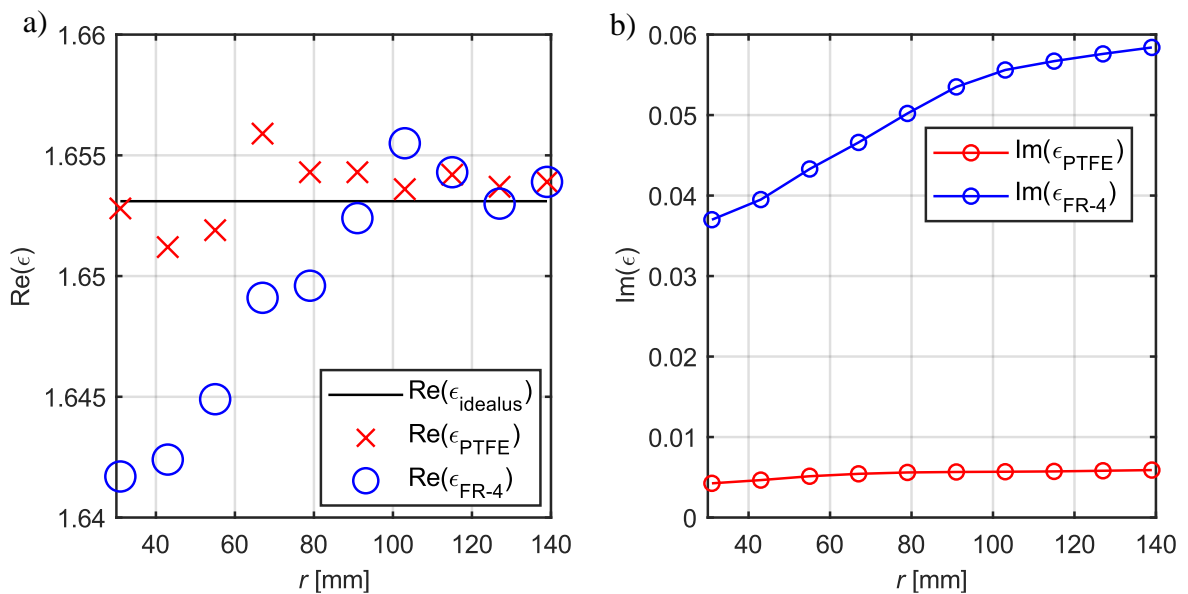
Renkantis sluoksnio spindulį reikia atsižvelgti į tai, kad susidariusio žiedo ilgyje tilptų sveikas rezonatorių skaičius. Šiuo atveju vidinio sluoksnio spindulys pasirinktas 31 mm ir tai leidžia sutalpinti 18 elementų vienetų. Šiuo atveju struktūra sudaryta iš dešimties sluoksnių, kur kiekvienas sekantis sluoksnis yra didesnis septyniais vienetais.



**27 pav.** Magnetinės skvarbos a) realiosios dalies bei b) menamosios dalies priklausomybės nuo sluoksnio spindulio

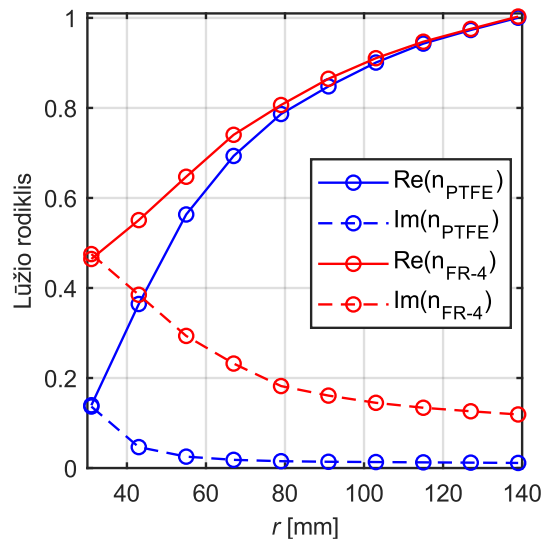
Modeliuojant struktūrą, sudaryta iš pavienių elementų, norint užtikrinti efektyviausią veikimą būtina užtikrinti, kad tiek magnetinės, tiek dielektrinės skvarbų realiosios dalys būtų kuo artimesnės teoriniams skaičiavimams, o menamosios – kuo artimesnės nuliui. Magnetinės skvarbos gradientas yra įgyvendinamas keičiant rezonatoriaus žiedų išpjovų matmenis (žr. 2 lent.), o dielektrinė skvarba yra išlaikoma visuose sluoksniuose pastovi šiek tiek keičiant varinės juostelės plotį (žr. 3 lent.).

Apskaičiavus spindulį ir skvarbų realiąsias dalis buvo atlikti skaičiavimai pasirinkus *FR-4* kaip struktūros pagrindą, kadangi tai yra populiariausia ir pigiausia medžiaga gaminant spausdintinio montažo plokštes. Iš 27 pav. a) ir 28 pav. a) matoma, kad realiosios skvarbų vertės yra pakankamai artimos užsiduotos vertėms, tačiau 27 pav. b) ir 28 pav. b) pastebima, kad menamosios dalys kinta ir nėra artimos nuliui kiekviename sluoksnyje. Būtent dėl to yra pastebima gan žymi EM bangų interferencija dėl didelių atspindžių, susidariusių dėl *FR-4* dielektrinių nuostolių (žr. 30 pav. b).



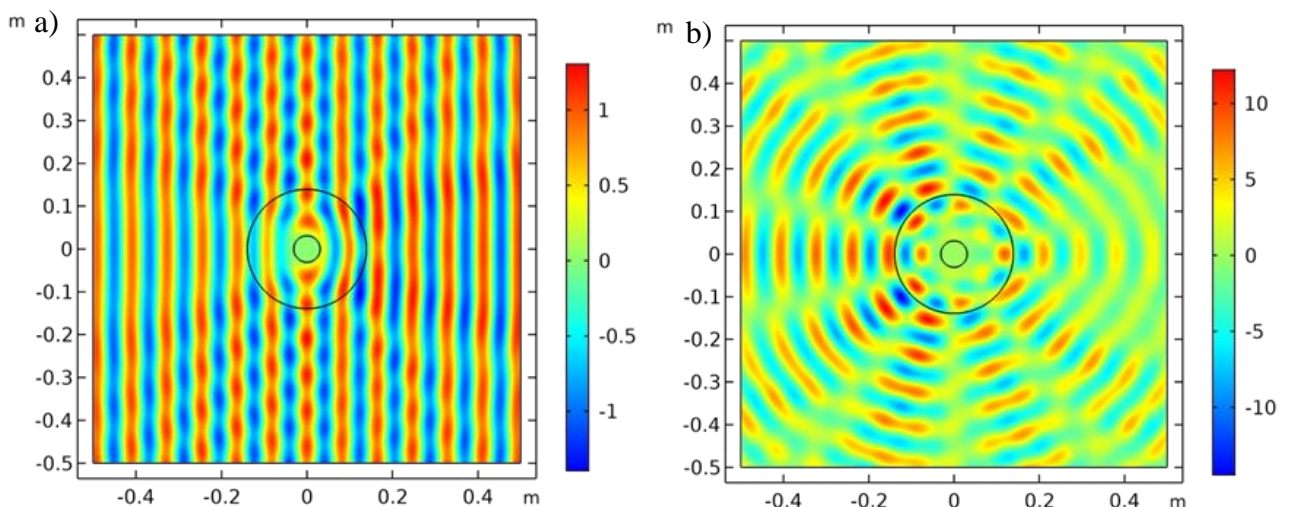
**28 pav.** Dielektrinės skvarbos a) realiosios dalies bei b) menamosios dalies priklausomybės nuo sluoksnio spindulio

Kadangi modeliavimo rezultatai rodo, kad ši struktūra veikia neefektyviai ir viduje objektą slepia prastai, nuspresta pakeisti pagrindo medžiagą į labiau pritaikytą darbui su radijo dažniais bei turinčią mažesnius dielektrinius nuostolius. Vienas iš populiariesnių variantų yra *Rogers* siūlomi tekstolitai, kurie skirstomi į atskiras kategorijas pagal dielektrinius parametrus bei darbinį dažnių ruožą. Tačiau dėl patentų ir žinomo prekės ženklo jų kaina dažniausia yra gerokai didesnė nei kitų radijo dažniais skirtų tekstolitų, turinčius artimus dielektrinius parametrus. Dėl to pasirinkta naudoti taip pat gan populiarų PTFE tekstolitą. Dielektrinių nuostolių santykis tarp *FR-4* ir PTFE yra lygus  $\frac{tg(\delta_{FR-4})}{tg(\delta_{PTFE})} = \frac{0,025}{0,0016} = 15,63$  karto.



**29 pav.** Lūžio rodiklio realiosios bei menamosios dalių priklausomybės nuo sluoksnio spindulio

Pakeitus pagrindą iš stiklotekstolito į PTFE ir atlikus modeliavimą gauta, kad dielektrinės ir magnetinės skvarbų realiosios dalys yra artimos užsiduotoms teorinėms vertėms (žr. 27 pav. a, 28 pav. a), o menamosios dalys, lyginant su *FR-4*, yra apie dešimt kartų mažesnės (žr. 27 pav. b, 28 pav. b). Taip pat iš 30 pav. a) matyti, kad struktūros sąveika su plokščiąja banga yra artimesnė teoriniam variantui.



**30 pav.** Plokščiosios bangos sąveika su metamedžiagos struktūra, kurios pagrindas yra a) PTFE, b) *FR-4*

Lūžio rodiklio priklausomybė nuo žiedo sluoksnio spindulio pateikta 29 pav., kai pagrindą sudaro *FR-4* ir PTFE. Šiuo atveju su PTFE lūžio rodiklio menamoji dalis yra gerokai mažesnė, kuri lemia mažesnius nuostolius lyginant su *FR-4*, ir leidžia pasiekti didesnę realiosios dalies gradientą vidiniuose sluoksniuose.

**2 lentelė.** Metastruktūros sluoksnių magnetiniai parametrai

Cilindro numeris	Išpjovos ilgis, s, mm	Re( $\mu_{idealus}$ )	Re( $\mu_{PTFE}$ )	Re( $\mu_{FR-4}$ )	Im( $\mu_{idealus}$ )	Im( $\mu_{PTFE}$ )	Im( $\mu_{FR-4}$ )
1	2,067	0	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0	0,0179	0,232
2	2,013	0,0784	0,0792	0,0757	0	0,0168	0,222
3	1,93	0,1914	0,192	0,191	0	0,0144	0,203
4	1,85	0,2899	0,290	0,286	0	0,0127	0,186
5	1,785	0,3705	0,374	0,382	0	0,0115	0,17
6	1,725	0,4361	0,435	0,432	0	0,0112	0,159
7	1,658	0,49	0,491	0,499	0	0,0109	0,147
8	1,605	0,5349	0,538	0,540	0	0,0109	0,138
9	1,565	0,5727	0,573	0,572	0	0,0109	0,131
10	1,525	0,6049	0,605	0,604	0	0,0107	0,125

Atlikus metastruktūros modeliavimą nustatyta, kad naudojant *FR-4* kaip rezonatorių pagrindą banga yra daugiau sugerama, nei atspindima dėl nuostolių, susidariusių dėl sąlyginai didelių skvarbų menamųjų dalių. Bangai sąveikaujant su metastruktūra pastebima interferencija, dėl kurios vyksta spinduliavimas aplink konstrukciją į visas puses. Šiuo atveju metastruktūra tampa panaši į sferinių bangų šaltinį ir neatlieka savo funkcijos.

**3 lentelė.** Metastruktūros sluoksnių dielektriniai parametrai

Cilindro numeris	Juostelės plotis b, mm	Re( $\epsilon_{idealus}$ )	Re( $\epsilon_{PTFE}$ )	Re( $\epsilon_{FR-4}$ )	Im( $\epsilon_{idealus}$ )	Im( $\epsilon_{PTFE}$ )	Im( $\epsilon_{FR-4}$ )
1	0,686	2,0864	2,067	2,088	0	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$62,2 \cdot 10^{-3}$
2	0,686	2,0864	2,074	2,088	0	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$63,5 \cdot 10^{-3}$
3	0,684	2,0864	2,087	2,08	0	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$67 \cdot 10^{-3}$
4	0,68	2,0864	2,081	2,088	0	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$70,5 \cdot 10^{-3}$
5	0,68	2,0864	2,095	2,08	0	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$73,1 \cdot 10^{-3}$
6	0,678	2,0864	2,089	2,084	0	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$75 \cdot 10^{-3}$
7	0,676	2,0864	2,085	2,086	0	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-3}$
8	0,674	2,0864	2,093	2,083	0	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$78,5 \cdot 10^{-3}$
9	0,672	2,0864	2,084	2,082	0	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$79,7 \cdot 10^{-3}$
10	0,67	2,0864	2,094	2,081	0	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$80,8 \cdot 10^{-3}$

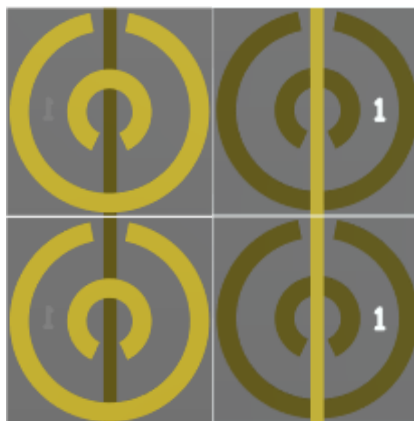
Remiantis rezultatais, gautais atliekant metastruktūros modeliavimą su PTFE pagrindu, skvarbų menamosios dalys yra mažesnės apie dešimt kartų, nei su *FR-4*. Dėl šios savybės individualūs rezonatoriai bei visa konstrukcija sugeria mažesnę bangos dalį, nei naudojant *FR-4* pagrindą. Bangai sąveikaujant su šia metastruktūra matoma, kad EM lauko stiprio verčių kitimas išlieka tolygus visame modeliuojamame lauke. Šiuo atveju taip pat galima įžvelgti šešėlių susidarymą, kuris parodo, kad metastruktūra nėra ideali ir interferencija susidaro, tačiau išlieka minimali.

#### 4. Metastruktūros savybių eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentiniam tyrimui atlikti sukonstruota metastruktūra, kurios efektyvumas bus nustatytas remiantis rezultatais, gautais pasigaminta lauko matavimo antena. Matavimai bus atliekami ant bandymų stendo, kuris skirtas matavimo pastovumo išlaikymui ir atkartojimo galimybei.

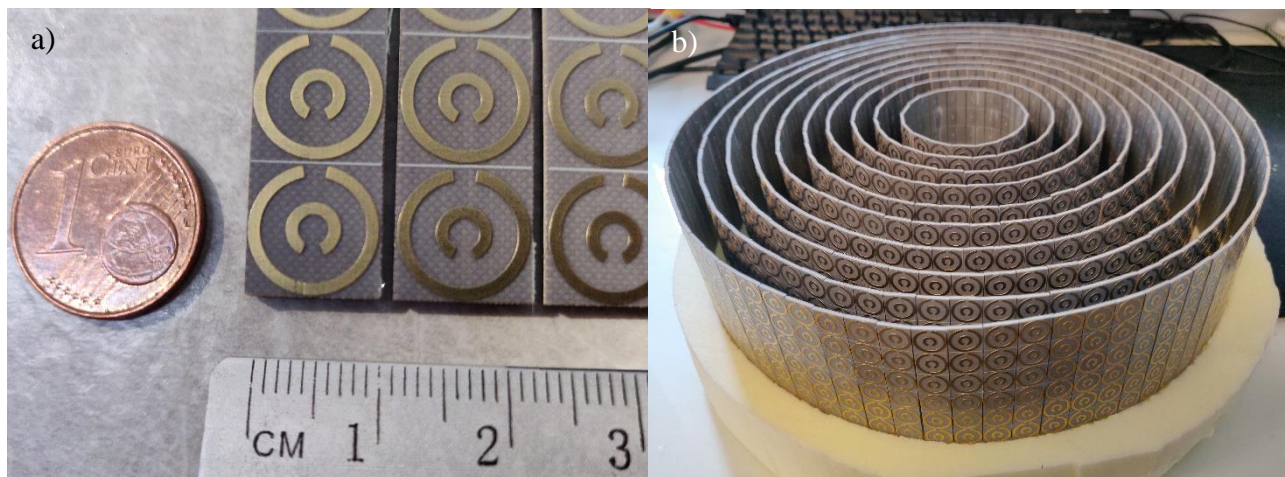
##### 4.1. Eksperimentinė neatspindinti metastruktūra

Remiantis parametrais, pateiktais 1 lent., sukurti rezonansiniai elementai ant PTFE pagrindo buvo suprojektuoti *Altium Designer* programine įranga (žr. 31 pav.). Spausdintinio montažo plokštės gamyba atlikta kompanijoje *JLPCB*. Gamintojo pateikiama plokštės storio tolerancija yra  $\pm 10\%$ , o varinių takelių –  $1,27 \text{ mm} \pm 20\%$ . Panelę sudaro 24 juostelės po šešis rezonatorius (žr. 32 pav. a).



31 pav. Rezonatorių pavyzdys projektavimo aplinkoje

Turint pagamintus elementus buvo sukonstruoti atskiri struktūros sluoksniai ant *Finnfoam* ekstrudinio putplasčio plokštės ir patalpinti tarp spinduliuojančio bangolaidžio ir priėmimo antenos (žr. 32 pav. b).

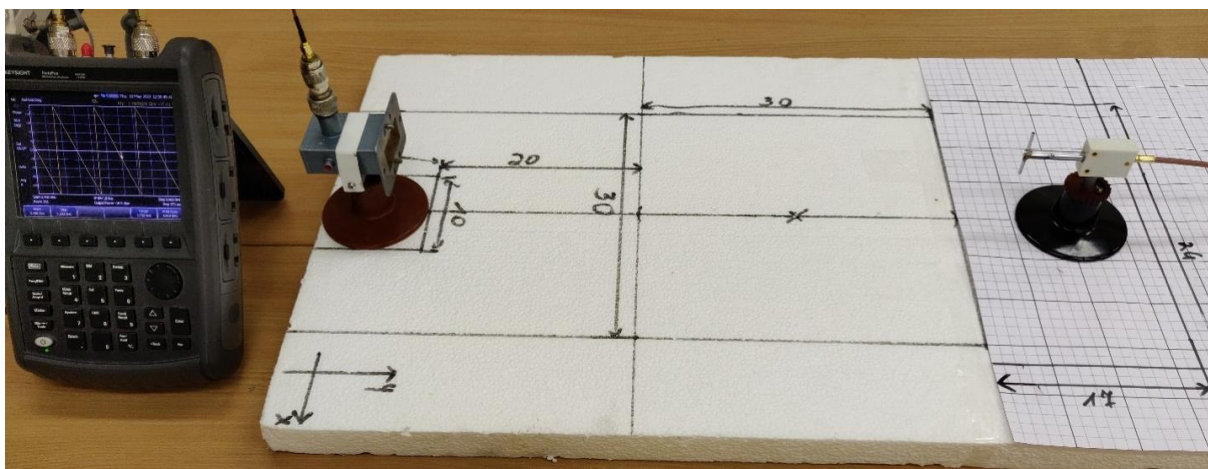


32 pav. a) Pagaminti metapaviršiaus elementai, b) sukonstruotas metapaviršiaus masyvas

##### 4.2. Bandymų stendas

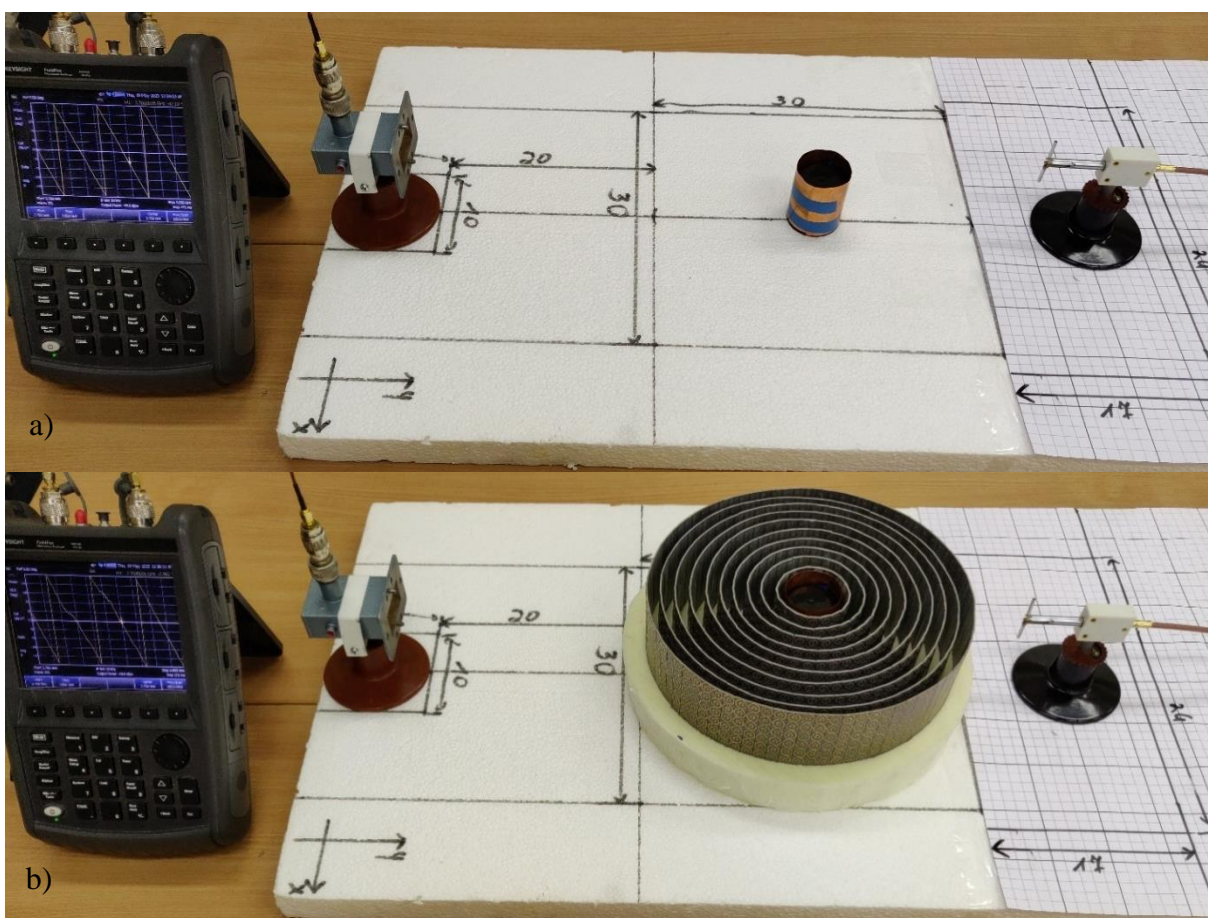
Tam, kad būtų sumažinta pašalinių atspindžių įtaka, stendas patalpintas ant putplasčio pagrindo. Gauta, kad EM lauko tolimoji zona prasideda atstumu  $r = \frac{2L^2}{\lambda} = 176 \text{ mm}$ , todėl norint užtikrinti, kad visas tyrimo objektas patektų į šią zoną, metastruktūros išorinis žiedas nuo spinduliuojančios bangolaidžio sekcijos atitrauktas 200 mm. Pastąčius lauko matavimo anteną už tiriamojo objekto

fazės matavimai yra atliekami kas 10 mm nuo bangolaidžio sekcijos traukiant iki atstumo, lygaus dvigubam bangos ilgiui – 170 mm, bei nuo centrinės ašies į abi puses taip pat iki dvigubos bangos ilgio – 340 mm (žr. 33 pav.).



**33 pav.** Eksperimentinio tyrimo standas nesant kliūčių; X pažymėtas metastruktūros centras

Tiriant sąveiką su kliūtimi tiriamojoje zonoje patalpintas varinis cilindras tam, kad atliekant tolimesnius matavimus būtų galima palyginti bangos sąveiką su tuščiu tyrimo lauku ir kai jame yra kliūtis (žr. 34 pav. a). Varinio cilindro skersmuo pasirinktas 50 mm tam, kad jis tilptų į sukonstruotos metastruktūros vidų.



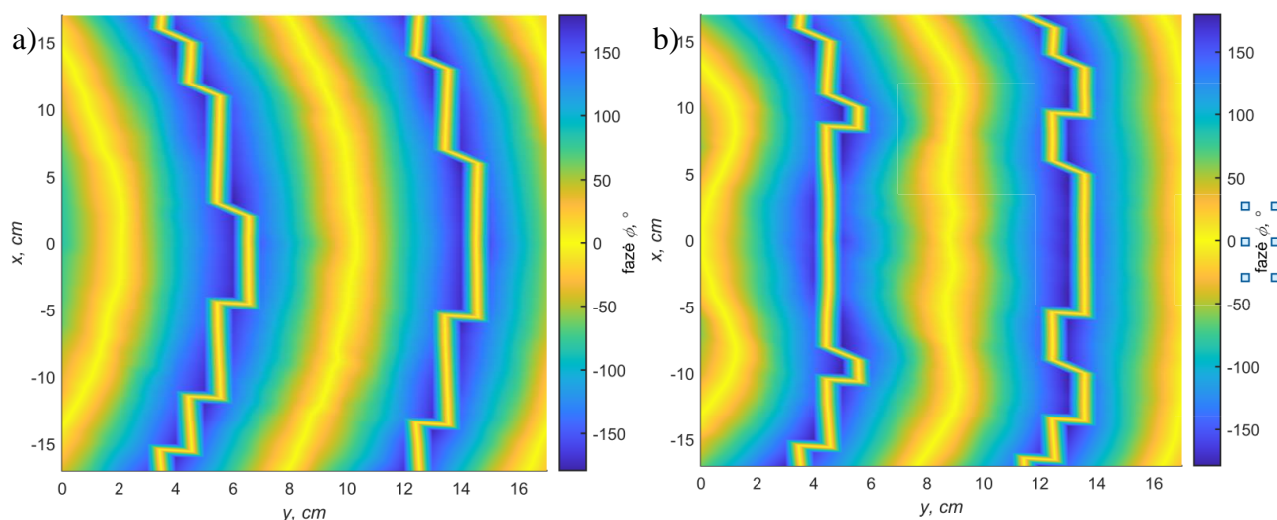
**34 pav.** Eksperimentinio tyrimo standas a) su variniu 50 mm cilindru, b) su metastruktūra ir variniu cilindru joje

Atliekant tyrimą patikrinti, ar metastruktūra veikia tinkamai, varinis cilindras yra patalpinamas į metastruktūros ertmę (žr. 34 pav. b). Gauti matavimai bus lyginami su rezultatais, gautais, kai bangos kelyje yra kliūtis ir kai tyrimo laukas yra tuščias. Metastruktūros išorinis skersmuo yra 280 mm, o vidinis skersmuo yra 60 mm, kur bus patalpintas varinis cilindras.

### 4.3. Bangos frontų matavimų rezultatai

Kai bangos kelyje nėra kliūčių, matomi sferiniai bangos frontai (žr. 35 pav. a). Dėl sąlyginai didelio matavimo tinklelio žingsnio gauti bangos frontai nėra tolygūs, tačiau tai netrukdo stebėti bangos sąveikos su aplinka. Nors ir antenos atstumas iki bangolaidžio tenkina tolimosios zonos sąlygą, tačiau banga nėra idealiai plokščia. Norint gauti plokštesnę bangą yra reikalinga matavimus atlikti gerokai didesniu atstumu nuo bangos šaltinio, tačiau tai padidintų jautrumą tinklelio žingsnio paklaidoms bei signalo stipriui.

Į tiriamąjį lauką patalpinus varinį cilindą 35 pav. b) galima pastebėti, kad bangos frontas neatitinka nei plokščios, nei sferinės bangos, todėl iš bangos fazės pasiskirstymo galima teigti, kad bangos kelyje buvo pastatyta kliūtis. Bangos sklidimo kryptimi nuo centrinės ašies iš abiejų pusių pastebimi fazių poslinkiai, kurie susidaro dėl difrakcijos sukeltos interferencijos sąveikaujant su objektu.

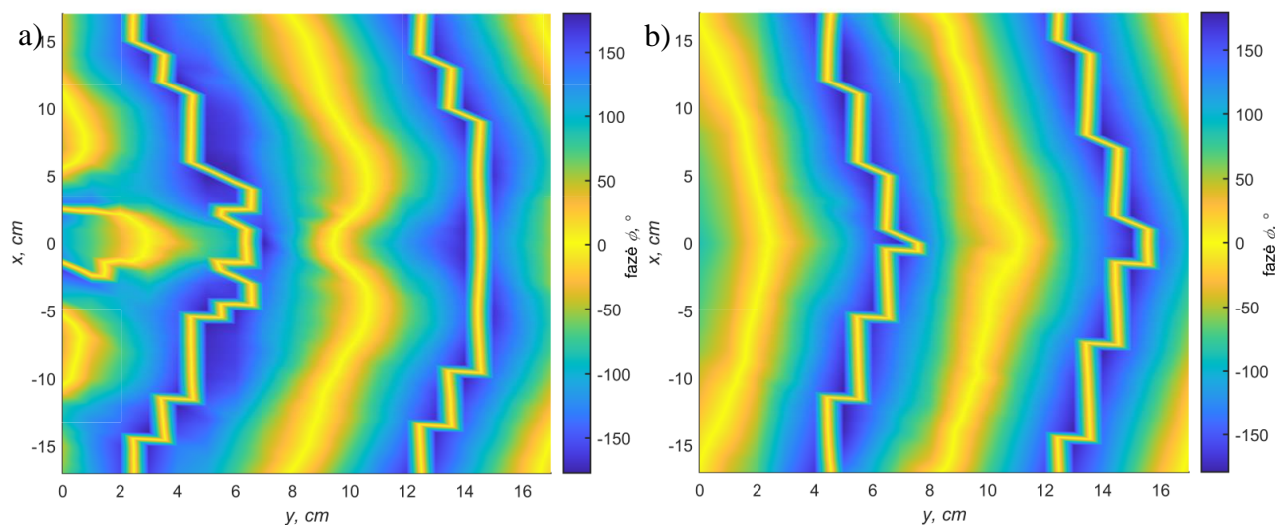


**35 pav.** Bangos fazės pasiskirstymas erdvėje a) nesant kliūčių, b) esant 50 mm variniam cilindriui

Įdėjus varinį cilindą į metastruktūros vidų 36 pav. a) matyti, kad bangos frontai išsikraipo labiau, nei tuo atveju, kai bangos kelyje yra tik cilindras. Nedideliu atstumu nuo metastruktūros pastebimi smarkūs bangos fronto iškreipimai ties centru ir nežymūs šonuose. Tačiau po vieno bangos ilgio toliau esantis frontas yra kompensuojamas metastruktūros ir įgauna cilindrinę formą kaip ir tuščioje erdvėje, nors centrinis iškreipimas vis dar išlieka. Toks rezultatas gautas dėl rezonatorių gamybos tolerancijų bei konstrukcijos netobulumo sukulto darbinio dažnio poslinkio. Kadangi sluoksniai sudaryti iš atskirų elementų, todėl jie nėra idealiai apvalūs, taip pat nebuvo išlaikomas modeliavimo metu parinktas atstumas tarp jų, nes kiekvienas sluoksnis nėra nulinio storio. Taip pat reiktų įvertinti pavienių rezonatorių modeliavimo netikslumus dėl neoptimalių modeliavimo parametrų, tokių, kaip tinklelio tankis, skaičiuoklio tipas, atstumas tarp bangolaidžio angos ir rezonatoriaus.

Eksperimentiniu būdu keičiant RF generatoriaus dažnį gauta, kad metastruktūra veikia efektyviausiai, kai bangos dažnis yra 3,76 GHz. Nustatius šį dažnį 36 pav. b) galima pastebėti, kad banga su metastruktūra sąveikauja kaip ir su laisva erdve, tik su tam tikrais iškreipymais. Už metastruktūros bangos frontai išlieka tokie pat kaip ir prieš ją, bangos fronto linija yra panaši kaip ir tuščioje erdvėje,

o pradiniai iškrypimai nepastebimi. Tačiau lyginant bangos frontą už vieno bangos ilgio matoma, kad centre atsiranda bangos fronto perkompensavimas.



**36 pav.** Bangos fazės pasiskirstymas erdvėje, kai varinis cilindras patalpintas metastruktūroje a) nesuderinus dažnio, b) suderinus dažnį

Eksperimentinio tyrimo rezultatai parodo, kad metastruktūra, sudaryta iš dešimties sluoksnių, geba bangos fronto formą išlaikyti, kaip tuščioje erdvėje, taip paslepiant patalpintą kliūtį jos viduje. Kadangi metastruktūra yra cilindro formos, todėl jos veikimas nepriklauso nuo bangos sklidimo krypties pagrindo plokštumoje. Metastruktūros darbinis dažnis teoriškai turi atitikti pavienio struktūrinio elemento rezonansinį dažnį, tačiau dėl konstrukcinių defektų jis gautas didesnis.



## Išvados

1. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad metamedžiagos turi gamtoje neaptinkamų savybių. Šios savybės susidaro dėl dvigubo įpjauto žiedo (SRR) veikiamo magnetinio ir metalinio vamzdelio veikiamo elektrinio laukų. Kombinuojant abu rezonatorius galima gauti elementą, kuris turi neigiamas magnetinę ir dielektrines skvarbas ir lūžio rodiklį. Iš atskirų elementų, kurių parametrai kinta, sudarius metapaviršių yra galimybė valdyti EM bangas taip, kad juo padengtas objektas taptų nematomas tam tikrame dažnių ruože, arba kad susidarytų iliuziją, kad objekto medžiaga arba matmenys yra kitokie, nei iš tikrųjų.
2. Tiriant SRR ir metalinės juostelės kombinuotą rezonatorių efektyvumą nuo jų orientacijos pagal bangolaidį ir EM lauką gauta, kad ties rezonansiniu dažniu dielektrinė ir magnetinė skvarbos bei lūžio rodiklis gauti neigiami tik tuo atveju, kai  $H$  laukas statmenas SRR ir  $E$  laukas lygiagretus metalinei juostelei. Tiriant rezonatorių išdėstymą tarpusavyje pastebėta, kad geriausi rezultatai pasiekiami, kai tarpusavio atstumai yra artimi elementų dydžiui.
3. Kompiuteriniai modeliavimai parodė, kad žiedinė struktūra su tolygiu magnetinės skvarbos gradientu viduje esantį objektą prie tam tikro dažnio padaro neaptinkamą. Kadangi tokios struktūros gamyba nėra įmanoma, todėl realiomis sąlygomis ji būtų aproksimuojama baigtiniu atskirų sluoksniu skaičiumi.
4. Interpoliacijos būdu sudarius gradientą gauta, kad struktūros efektyvumas priklauso nuo rezonatorių pagrindo medžiagos – naudojant *FR-4* sklindanti banga smarkiai iškraipoma, o naudojant PTFE, kurio dielektriniai nuostoliai yra 15,63 karto mažesni, bangos pobūdis artimesnis sumodeliuotam teoriniam variantui.
5. Eksperimentiškai tiriant bangos fronto pasiskirstymą erdvėje gauta, kad jis yra dalinai sferinis dėl matavimo nedideliu atstumu už tolimosios zonos. Erdvėje patalpinus varinį cilindrą bangos frontai yra iškraipomi. Cilindrą patalpinus sukonstruotos metastruktūros viduje pastebėta, kad esant dažniui, prie kurio buvo atliekamas modeliavimas (3,65 GHz), struktūra neveikia, bangos frontas nėra kompensuojamas. Tačiau eksperimentiniu būdu keičiant dažnį geriausias rezultatas pastebėtas prie 3,76 GHz. Šiuo atveju banga su metastruktūra sąveikauja kaip ir su laisva erdve.

## Rekomendacijos

Šiame darbe pavienių rezonatorių ir jų masyvų modeliavimas atliktas laiko srities (angl. *time domain*) sprendikliu, kuris yra ganėtinai jautrus tinklelio tankiui, tačiau rezultatus pateikia greitai. Didesniam tikslumui pasiekti galima naudoti dažnių srities (angl. *frequency domain*) sprendiklį, kuris automatiškai parenka efektyviausią tinklelio tankį, tačiau rezultatų gavimas užtrunka ilgiau. Yra siūlytina laiko srityje modeliuoti dideles struktūras dėl mažesnių operatyviosios atminties sąnaudų, o dažnių srityje tirti pavienius struktūros elementus.

Kadangi eksperimentiniai matavimai atlikti pakankamai arti bangų šaltinio, bangos forma nėra idealiai plokščia, tačiau metastruktūros efektyvumas vertinamas modeliuojant sąveiką su plokščiąja banga. Atliekant modeliavimus su sferine arba dalinai sferine banga galima būtų įvertinti bangos fronto formos įtaką bendram metastruktūros veikimui – darbiniam dažniui, interferencijos susidarymui – prieš atliekant eksperimentinius bandymus.

Projektuojant metastruktūros sluoksnius iš baigtinio skaičiaus pavienių elementų reikia atkreipti dėmesį, kad gauti žiedai nėra idealiai apvalūs. Konstrukciją galima tobulinti išdėstant rezonatorius ant išlenkto tolygaus pagrindo, taip pagerinant jų tarpusavio sąryšį ir bendrą cilindrų formą, dėl ko eksperimentiniai matavimai galėtų būti artimesni modeliavimo rezultatams.

Matavimo procesas gali būti optimizuotas naudojant automatizuotą sistemą. Tai leistų padidinti matavimo tikslumą sumažinant žmogiškosios paklaidos įtaką bei parenkant tankesnę matavimo tinklelį. Taip pat rezultatų gavimas taptų greitesnis, todėl būtų galima atlikti tyrimus didesniame plote, bei išmatuoti metastruktūros efektyvumą dažnių ruože. Norint sumažinti pašalinių atspindžių įtaką matavimo rezultatams bandymo stendą būtų galima patalpinti beaidėje kameroje.

## Literatūros sąrašas

1. AFSAR, M.S.U. - FARUQUE, M.R.I. - KHANDAKER, M.U. - ALQAHTANI, A. - BRADLEY, D.A. A New Compact Split Ring Resonator Based Double Inverse Epsilon Shaped Metamaterial for Triple Band Satellite and Radar Communication. In *Crystals 2022*, Vol. 12, Page 520 [interaktyvus]. 2022. Vol. 12, no. 4, p. 520. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<https://www.mdpi.com/2073-4352/12/4/520/htm>>.
2. AYDIN, K. - OZBAY, E. Identifying magnetic response of split-ring resonators at microwave frequencies. In *Opto-Electronics Review* [interaktyvus]. 2006. Vol. 14, no. 3, p. 193–199. [žiūrėta 2023-05-13]. . Prieiga per internetą: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/s11772-006-0025-x/html>>.
3. ANLAGE, S.M. The physics and applications of superconducting metamaterials. In *Journal of Optics* . 2011. Vol. 13, no. 2. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
4. BALANIS, C.A. *Antenna theory: analysis and design*. . 3rd ed. Ed. Hoboken [N.J.]: John Wiley & Sons, 2005. 1117 p. ISBN 047166782X.
5. BOSE, S. - RAMARAJ, M. - RAGHAVAN, S. - KUMAR, S. Mathematical Modeling, Equivalent Circuit Analysis and Genetic Algorithm Optimization of an N-sided Regular Polygon Split Ring Resonator (NRPSRR). In *Procedia Technology* . 2012. Vol. 6, p. 763–770. [žiūrėta 2023-05-13]. . .
6. CAI, W. - CHETTIAR, U.K. - KILDISHEV, A. V. - SHALAEV, V.M. Optical cloaking with metamaterials. In *Nature Photonics 2007 1:4* [interaktyvus]. 2007. Vol. 1, no. 4, p. 224–227. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <<https://www.nature.com/articles/nphoton.2007.28>>.
7. CALOZ, C. Perspectives on EM metamaterials. In *Materials Today* . 2009. Vol. 12, no. 3, p. 12–20. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
8. CHEN, T. - LI, S. - SUN, H. Metamaterials Application in Sensing. In *Sensors 2012*, Vol. 12, Pages 2742-2765 [interaktyvus]. 2012. Vol. 12, no. 3, p. 2742–2765. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/12/3/2742/htm>>.
9. CHOUDHURY, B. A Review of Metamaterial Invisibility Cloaks | Request PDF. In *Computers, Materials and Continua* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2023-05-07]. Prieiga per internetą: <[https://www.researchgate.net/publication/286693569\\_A\\_Review\\_of\\_Metamaterial\\_Invisibility\\_Cloaks](https://www.researchgate.net/publication/286693569_A_Review_of_Metamaterial_Invisibility_Cloaks)>.
10. CUMMER, S.A. - POPA, B.I. - SCHURIG, D. - SMITH, D.R. - PENDRY, J. Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures. In *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* [interaktyvus]. 2006. Vol. 74, no. 3, p. 036621. [žiūrėta 2023-05-13]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.74.036621>>.
11. DUBEY, A. - SHAMI, T. Metamaterials in Electromagnetic Wave Absorbers. In *Defence Science Journal* . 2012. Vol. 62, no. 4, p. 261–268. .
12. EDRIES, M. - EL-MORSY, M.A. - MOHAMED, H.A. - HEKAL, S.S. - MANSOUR, H.A. Literature review on radar absorbers using metamaterials. In *2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, EMTS 2019* . 2019. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
13. EDWARDS, B. - ALÙ, A. - SILVEIRINHA, M.G. - ENGHETA, N. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials. In *Physical Review Letters*

- [interaktyvus]. 2009. Vol. 103, no. 15, p. 153901. [žiūrėta 2023-05-23]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.103.153901>>.
14. FALCONE, F. - LOPETEGI, T. - BAENA, J.D. - MARQUÉS, R. - MARTÍN, F. - SOROLLA, M. Effective Negative-" Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators. In *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS* . 2004. Vol. 14, no. 6. [žiūrėta 2023-05-13]. . .
15. FAN, K. - PADILLA, W.J. Dynamic electromagnetic metamaterials. In *Materials Today* . 2015. Vol. 18, no. 1, p. 39–50. [žiūrėta 2023-05-22]. . .
16. GU, S. - BARRETT, J.P. - HAND, T.H. - POPA, B.I. - CUMMER, S.A. A broadband low-reflection metamaterial absorber. In *Journal of Applied Physics* [interaktyvus]. 2010. Vol. 108, no. 6, p. 64913. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <[aip/jap/article/108/6/064913/348353/A-broadband-low-reflection-metamaterial-absorber](http://aip/jap/article/108/6/064913/348353/A-broadband-low-reflection-metamaterial-absorber)>.
17. HASSAN, N. - AHMAD, B. - AZIZ, M. - ZAKARIA, Z. - OTHMAN, M. - OTHMAN, A.R. - YUSOFF, M. - JUSOFF, K. Rice husk truncated pyramidal microwave absorber using quadruple P-spiral split ring resonator (QPS-SRR). In . 2013. [žiūrėta 2023-05-13]. . .
18. HOLLOWAY, C.L. - KUESTER, E.F. - GORDON, J.A. - O'HARA, J. - BOOTH, J. - SMITH, D.R. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. In *IEEE Antennas and Propagation Magazine* . 2012. Vol. 54, no. 2, p. 10–35. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
19. HUSSEIN, K.F.A. Optimized wideband impedance matching balun for conducting two-arm antennas. In *International Journal of Antennas and Propagation* . 2014. Vol. 2014. [žiūrėta 2023-05-22]. . .
20. YARICI, I. - ÖZTÜRK, Y. Analysis of an inverted square SRR via design of experiment (DoE) approach. In *Journal of Electrical Engineering* . 2021. Vol. 72, no. 4, p. 273–277. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
21. YOUSEFI, L. - RAMAHI, O.M. Artificial magnetic materials using fractal hilbert curves. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [interaktyvus]. 2010. Vol. 58, no. 8, p. 2614–2622. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <[https://www.researchgate.net/publication/224138549\\_Artificial\\_Magnetic\\_Materials\\_Using\\_Fractal\\_Hilbert\\_Curves](https://www.researchgate.net/publication/224138549_Artificial_Magnetic_Materials_Using_Fractal_Hilbert_Curves)>.
22. KAFESAKI, M. - KOSCHNY, T. - PENCIU, R.S. - GUNDOGDU, T.F. - ECONOMOU, E.N. - SOUKOULIS, C.M. Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties. In *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* [interaktyvus]. 2005. Vol. 7, no. 2, p. S12. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1464-4258/7/2/002>>.
23. KOGO, H. Analysis of Split Coaxial Line Type Balun. In *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques* . 1960. Vol. 8, no. 2, p. 245–246. [žiūrėta 2023-05-22]. . .
24. KUMAR, P. - GARIMA, S. - ME, S. Log - Periodic Terahertz Antenna with Square SRR Metamaterial Superstrate. In *International Journal of Engineering Research & Technology* [interaktyvus]. 2016. Vol. 5, no. 7. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <[www.ijert.org](http://www.ijert.org)>.

25. LANDY, N. - SMITH, D.R. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves. In *Nature Materials* 2012 12:1 [interaktyvus]. 2012. Vol. 12, no. 1, p. 25–28. [žiūrėta 2023-05-23]. . Prieiga per internetą: <<https://www.nature.com/articles/nmat3476>>.
26. LANDY, N.I. - SAJUYIGBE, S. - MOCK, J.J. - SMITH, D.R. - PADILLA, W.J. Perfect metamaterial absorber. In *Physical Review Letters* [interaktyvus]. 2008. Vol. 100, no. 20, p. 207402. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.100.207402>>.
27. LI, A. - SINGH, S. - SIEVENPIPER, D. Metasurfaces and their applications. In *Nanophotonics* [interaktyvus]. 2018. Vol. 7, no. 6, p. 989–1011. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2017-0120/html>>.
28. LI, M.H. - YANG, H.L. - HOU, X.W. - TIAN, Y. - HOU, D.Y. Perfect metamaterial absorber with dual bands. In *Progress in Electromagnetics Research* . 2010. Vol. 108, p. 37–49. [žiūrėta 2023-05-22]. . .
29. N-TECH RESEARCH Future Opportunities for Metamaterials in Aerospace and Defense Markets. In [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2023-05-29]. . Prieiga per internetą: <[www.ntechresearch.com](http://www.ntechresearch.com)>.
30. OLIVERI, G. - WERNER, D.H. - MASSA, A. Reconfigurable electromagnetics through metamaterials-a review. In *Proceedings of the IEEE* . 2015. Vol. 103, no. 7, p. 1034–1056. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
31. PAULAUSKAS, K.V. *Antenos ir mikrobangų įtaisai: Vadovėlis respublikos aukštųjų mokyklų radiotechnikos specialybės studentams*. . Vilnius: Mokslas, 1985. 372 p.
32. PENDRY, J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. In *Physical Review Letters* [interaktyvus]. 2000. Vol. 85, no. 18, p. 3966. [žiūrėta 2023-05-29]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.85.3966>>.
33. PENDRY, J.B. - HOLDEN, A.J. - ROBBINS, D.J. - STEWART, W.J. Low frequency plasmons in thin-wire structures. In *Journal of Physics: Condensed Matter* [interaktyvus]. 1998. Vol. 10, no. 22, p. 4785. [žiūrėta 2023-05-13]. . Prieiga per internetą: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/10/22/007>>.
34. PENDRY, J.B. - HOLDEN, A.J. - ROBBINS, D.J. - STEWART, W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. In *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* . 1999. Vol. 47, no. 11, p. 2075–2084. [žiūrėta 2023-05-13]. . .
35. PITARKE, J. - GARCÍA-VIDAL, F. Effective electronic response of a system of metallic cylinders. In *Physical Review B* [interaktyvus]. 1998. Vol. 57, no. 24, p. 15261. [žiūrėta 2023-05-13]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.57.15261>>.
36. RAHUL MANOHAR, O. - JACOB, S. - MUTTATH, D.J. Investigation of double negativity of SRR-thin wire structures. In *2015 International Conference on Control, Communication and Computing India, ICCCI 2015* . 2016. p. 470–473. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
37. RAJNI - MARWAHA, A. An accurate approach of mathematical modeling of SRR and SR for metamaterials. In *Journal of Engineering Science and Technology Review* . 2016. Vol. 9, no. 6, p. 82–86. [žiūrėta 2023-05-22]. . .

38. RHEE, J.Y. - YOO, Y.J. - KIM, K.W. - KIM, Y.J. - LEE, Y.P. Metamaterial-based perfect absorbers. In *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* [interaktyvus]. 2014. Vol. 28, no. 13, p. 1541–1580. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<https://ideas.repec.org/a/taf/tewaxx/v28y2014i13p1541-1580.html>>.
39. SAHA, C. - SIDDIQUI, J.Y. A comparative analysis for split ring resonators of different geometrical shapes. In *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference, AEMC 2011* . 2011. [žiūrėta 2023-05-13]. . .
40. SCHURIG, D. - MOCK, J.J. - JUSTICE, B.J. - CUMMER, S.A. - PENDRY, J.B. - STARR, A.F. - SMITH, D.R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. In *Science* [interaktyvus]. 2006. Vol. 314, no. 5801, p. 977–980. [žiūrėta 2023-05-13]. . Prieiga per internetą: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1133628>>.
41. SIHVOLA, A. Metamaterials in electromagnetics. In *Metamaterials* . 2007. Vol. 1, no. 1, p. 2–11. [žiūrėta 2023-05-07]. . .
42. SILVEIRINHA, M.G. - ALÛ, A. - ENGHETA, N. Parallel-plate metamaterials for cloaking structures. In *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* [interaktyvus]. 2007. Vol. 75, no. 3, p. 036603. [žiūrėta 2023-05-22]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.75.036603>>.
43. SINGH, G. - MARWAHA, A. A Review of Metamaterials and its Applications. In *International Journal of Engineering Trends and Technology* [interaktyvus]. 2015. Vol. 19, no. 6. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<http://www.ijettjournal.org>>.
44. SMITH, D.R. - PADILLA, W.J. - VIER, D.C. - NEMAT-NASSER, S.C. - SCHULTZ, S. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. In *Physical Review Letters* [interaktyvus]. 2000. Vol. 84, no. 18, p. 4184. [žiūrėta 2023-05-29]. . Prieiga per internetą: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.84.4184>>.
45. STAEDTER, T. Engineered Metamaterials Could Lead to Invisibility Cloak Technology. In *Northrop Grumman* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2023-05-29]. Prieiga per internetą: <<https://now.northropgrumman.com/engineered-metamaterials-make-invisibility-cloaks-and-more/>>.
46. TANG, W.X. - MEI, Z.L. - CUI, T.J. Theory, experiment and applications of metamaterials. In *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy* [interaktyvus]. 2015. Vol. 58, no. 12, p. 1–11. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11433-015-5746-8>>.
47. VALIPOUR, A. - KARGOZARFARD, M.H. - RAKHSHI, M. - YAGHOOTIAN, A. - SEDIGHI, H.M. Metamaterials and their applications: An overview. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [interaktyvus]. 2022. Vol. 236, no. 11, p. 2171–2210. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <[https://www.researchgate.net/publication/348884705\\_Metamaterials\\_and\\_Their\\_Applications\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/348884705_Metamaterials_and_Their_Applications_An_Overview)>.
48. VENDIK, I.B. - VENDIK, O.G. - VENDIK, I.B. - VENDIK, O.G. Metamaterials and their application in microwaves: A review. In *JTePh* [interaktyvus]. 2013. Vol. 58, no. 1, p. 1–24. [žiūrėta 2023-05-07]. . Prieiga per internetą: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013JTePh..58....1V/abstract>>.

49. VESELAGO, V.G. THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF  $\epsilon$  AND  $\mu$ . In *Soviet Physics Uspekhi* [interaktyvus]. 1968. Vol. 10, no. 4, p. 509. [žiūrėta 2023-05-29]. Prieiga per internetą: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>>.
50. WANG, X. - CHEN, F. - HOOK, S. - SEMOUCHKINA, E. Microwave cloaking by all-dielectric metamaterials. In *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)* . 2011. p. 2876–2878. [žiūrėta 2023-05-23]. . .
51. WANG, X. - CHEN, F. - SEMOUCHKINA, E. Implementation of low scattering microwave cloaking by all-dielectric metamaterials. In *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* . 2013. Vol. 23, no. 2, p. 63–65. [žiūrėta 2023-05-23]. . .
52. WU, M.F. - MENG, F.Y. - WU, Q. - WU, J. - LI, L.W. A compact equivalent circuit model for the SRR structure in metamaterials. In *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC* . 2005. Vol. 1, p. 4. [žiūrėta 2023-05-22]. . .
53. COMSOL - Software for Multiphysics Simulation. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-13]. Prieiga per internetą: <<https://www.comsol.com/>>.
54. CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-13]. Prieiga per internetą: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>>.
55. DARPA to Study Metamaterials | AFCEA International. In *Signal Media* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2023-05-29]. Prieiga per internetą: <<https://www.afcea.org/signal-media/darpa-study-metamaterials>>.
56. N9916A FieldFox Handheld Microwave Analyzer, 14 GHz | Keysight. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <<https://www.keysight.com/us/en/product/N9916A/fieldfox-a-handheld-microwave-analyzer-14-ghz.html>>.