

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Justina Žemgulytė

**SISTEMŲ, SURENKANČIŲ ENERGIJĄ IŠ BEVIELIO RYŠIO WIFI
TINKLŲ, TYRIMAI**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijos studijų programa

Studentas	Justina Žemgulytė
Leisti ginti	2023-05-24
Darbo vadovas	dr. Paulius Ragulis
Instituto direktorius	prof. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	3
1. Radijo bangų energijos rinkimo sistemų apžvalga	4
1.1 Radijo bangų šaltiniai	4
1.2 Antenos, naudojamos radijo bangų energijos rinkimo sistemose	5
1.3 Mažos galios įtampos lygintuvai	10
1.4 Impedanso derinimo technikos	12
1.5 Mažos galios kaupimo ir valdymo sistemos	14
2. Radijo bangų energijos rinkimo sistemos elementų tyrimas	17
2.1 Antenų modeliavimas CST ir parametrų analizė	17
2.2 Įtampos lygintuvo modelis	20
2.3 Ketvirčio bangos ilgio transformatoriaus skaičiavimo metodika	22
2.4 Impedanso derinimas tarp antenos ir įtampos lygintuvo naudojant ADS	23
2.5 Energijos valdymo modulis	25
3. Rezultatai	27
3.1 Gamybos ir matavimų metodikos	27
3.2 Aplinkos spektro matavimas	28
3.3 Plyšinės antenos matavimai	29
3.4 Yagi Uda antenos matavimai	31
3.5 Chebishevo impedanso derinimo grandynai	33
3.6 Įtampos lygintuvai: topologijų palyginimas	34
3.7 Antenos ir įtampos lygintuvo integracija ant vieno padėklo	36
3.8 Energijos kaupimo sistemos optimizavimas	37
3.9 Radijo bangų energijos kaupimo sistemos matavimai	38
Rezultatai ir išvados	40
Summary	41
Literatūra	42

Įvadas

Radijo bangų energorinkinių sistemos šiais laikais susilaukia nemažai dėmesio, kaip būdas kaupiti ir panaudoti nenaudingai išspinduliuojamą mikrobangų energiją. Kuriamos saulės, vėjo, šilumos, vibracijų, elektrocheminės energijos kaupimo sistemos iš dalies yra pranašesnės už radijo bangų rinkimo sistemas dėl didesnės surenkamos galios tankio [1]. Tačiau plačiai naudojami WiFi, 3G, LTE, GSM tinklai lemia tai, kad tokių šaltinių aplinkoje yra apstu, todėl vis daugiau dėmesio yra skiriama radijo bangų energijos rinkimo sistemoms vystyti [1], [2]. Ypač dažnai yra pasirenkama rinkti radijo bangų energiją patalpose, pavyzdžiui, iš maršrutizatorių skleidžiamų signalų, nes daugumą kitų energijos kaupimo rūšių yra pritaikytos naudoti išorėje.

Pagrindinė motyvacija kurti naujas energijos kaupimo sistemas yra mažos energijos prietaisų ir bevielių jutiklių tinklų maitinimas be baterijų [4]. Jei galėtume sumažinti per metus pagaminamų baterijų skaičių tai stipriai sumažintų aplinkos taršą, kuri sukeliama tiek jų gamybos metu, tiek atsikratant baterijomis ne tam skirtose vietose [5]. Mikrobangų energijos kaupimo sistemas galima panaudoti kaip energijos šaltinį maisto kokybės įvertinimo sistemoje [6], ar skaitmeninio laikrodžio maitinimui [7]. Pagrindinė tokių sistemų problema yra mažas radijo bangų tankis aplinkoje, todėl stengiamasi naudoti efektyvias antenas su dideliu stiprinimu arba plačia dažnių juosta ir užtikrinti gerą suderinimą tarp sistemos elementų. Taip pat yra ieškoma kitų būdų, pavyzdžiui, antena ir įtampos lygintuvas integruojamas į vieną korpusą, kad sumažėtų nuostoliai atsirandantys dėl jungčių.

Šio darbo tikslas yra sukurti radijo bangų energijos kaupimo sistemą, kuri veiktų 2,4 GHz dažnių ruože ir būtų pritaikyta rinkti energiją iš bevielio ryšio interneto (WiFi) tinklo. Norint pasiekti šį tikslą reikia įgyvendinti tokius uždavinius: suprojektuoti ir pagaminti anteną, įtampos lygintuvą, optimalų impedanso derinimo grandyną ir energijos kaupimo modulį. Šioms užduotims įvykdyti reikia įsisavinti: CST Microwave Studio® (CST), Keysight Advanced Design Systems® (ADS) programinius paketus, išmokti matuoti antenų charakteristikas mikrobangų beaidėje kameroje.

1. Radijo bangų energijos rinkimo sistemų apžvalga

1.1 Radijo bangų šaltiniai

Paprasčiausia radijo bangų rinkimo sistema (RBRS) (1 pav.) susideda iš antenos ir kintamos įtampos lygintuvo, kurie literatūroje dažnai vadinami vienu žodžiu - (angl. *rectenna*). Antenos ir lygintuvo paskirtis – iš aplinkos surinkti kiek įmanoma daugiau energijos. Antenos išėjime energija paverčiama į kintamą elektros srovę, o įtampos lygintuvas ją paverčia į nuolatinę elektros srovę, kuri gali būti panaudota prietaisų maitinimui ir/arba kaupiama vėlesniam panaudojimui.

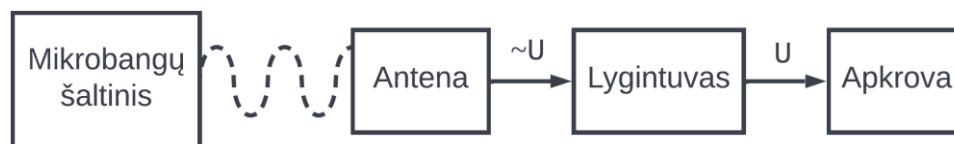
Pagal Lietuvos higienos normą [8] gyvenamojoje aplinkoje energijos srauto tankis (S), mikrobangų dažniuose (0,3 GHz – 300 GHz) negali viršyti $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Mikrobangų galios tankį su galia antenos išėjime P galima susieti taip:

$$S = \frac{P}{A_{eff}} = \frac{4\pi P}{G\lambda^2}, \quad (1)$$

čia A_{eff} – antenos efektyvus plotas, G – antenos stiprinimas, λ – bangos ilgis. Iš šios formulės galime rasti antenos priimamą galingumą:

$$P = \frac{SG\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

Žinodami galios tankį S , antenos stiprinimą G ir bangos ilgį λ , galima suskaičiuoti kiek galios gausime antenos išėjime. Lentelėje (žr. 1 lentelę) pavaizduota kokios galios galime tikėtis antenos išėjime esant skirtingiems galios tankiams, renkant energiją iš 2,45 GHz ir 5,45 GHz dažnio mikrobangų signalų, kai antenos stiprinimas yra 3 dBi. Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, kad renkant žemesnio dažnio bangų energiją potencialiai galima gauti daugiau galios nei renkant aukštesnio dažnio bangų energiją.



1 pav. Supaprastinta radijo bangų rinkimo sistemos blokinė schema

1 lentelė. Galia 3 dBi antenos išėjime prie skirtingo galios tankio

	$S, \text{W/m}^2$										
P, mW f, GHz	10	7	5	3	2	1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1
2,45	23,69	16,58	11,84	7,11	4,74	2,37	1,90	1,18	0,71	0,47	0,24
5,45	4,81	3,37	2,41	1,44	0,96	0,48	0,39	0,24	0,14	0,10	0,05

Galios tankio formulė gali būti išreikšta kitaip. Jeigu spinduliuojančios antenos stiprinimas yra G_s , į ją paduodama galia yra P_s , tuomet sukuriamas galios tankis (S) nuo antenos atstumu R bus lygus:

$$S = \frac{G_s P_s}{4\pi R^2} \quad (3)$$

Iš (3) formulės matome, kad tostant nuo šaltinio, galios tankis mažėja atvirkščiai proporcingai nuotolio kvadratui. Dėl šios priežasties energijos rinkimo sistemose stengiamasi energiją rinkti iš kelių dažnių, tokiu būtu norima padidinti surenkamą energiją, kad ją būtų galima praktiškai panaudoti.

Straipsnyje [9] buvo atliktas tyrimas, kuriame parodyta, kad GSM-900 ir WLAN-1800 tinklų galios tankis aplinkoje yra pakankamas, kad iš jo būtų galima sukaupti naudingą kiekį energijos. Buvo išmatuota, kad vidutinis galios tankis 25–100 m atstumu nuo GSM bazinės stoties svyruoja nuo 1 mW/m² iki 0,1 mW/m², WLAN atveju 7–12 m atstumu vidutinis galios tankis svyravo nuo 0,05 mW/m² iki 0,0001 mW/m². Autoriai teigia, kad naudojant antenų masyvus ir sumažinus atstumą iki šaltinio būtų galima surinkti pakankamai energijos mažos galios jutiklio maitinimui. Tai buvo įrodyta maitinant LED šviestuką su tipinę radijo bangų energijos rinkimo sistema, o kaip šaltinį naudojant GSM-1800 (1 W) mobilų telefoną, kurio sklaidžiamos radijo bangų (RB) energijos užteko uždegti šviestuką, kai nuotolis tarp jo ir telefono buvo mažesnis nei 20 cm.

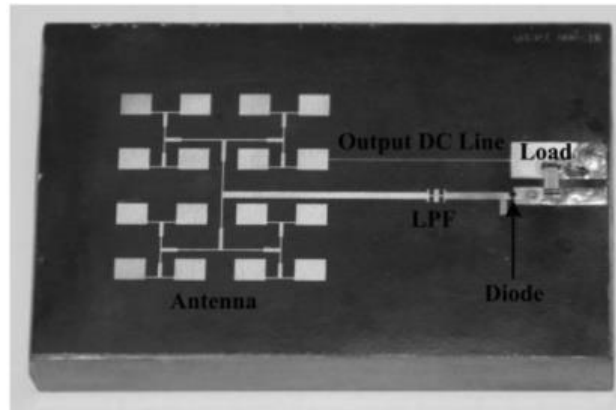
1.2 Antenos, naudojamos radijo bangų energijos rinkimo sistemose

Antena radijo bangų energijos rinkimo sistemoje priima šaltinio spinduliuojamą elektromagnetinę energiją laisvoje erdvėje ir išėjime tai paverčia į kintamą elektros srovę.

Priklausomai nuo šaltinio tipo ir pačios energijos kaupimo sistemos paskirties reikia atsižvelgti į tam tikrus antenos parametrus. Pavyzdžiui, kuriant nešiojamą RBRIS svarbi antenos poliarizacija ir kryptingumas, nes jos padėtis ir kampas šaltinio atžvilgiu gali kisti. Renkant radijo bangas iš foninės spinduliuotės paprastai naudojamos didelio ploto plačiadažnės arba daugiadažnės antenos. Radijo bangų tankis erdvėje yra labai mažas todėl renkant energiją iš kelių dažnių, pavyzdžiui, iš GSM 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz galime jos surinkti daugiau. Turint dedikuotą šaltinį yra paprasčiau, šiuo atveju galima naudoti kryptinę anteną su dideliu stiprinimu ir rinkti energiją iš vienos ar kelių siaurų dažnio juostų. Tai pasitaiko retai, tačiau kartais vietoje to, kad prisitaikyti prie šaltinio yra kuriami specialūs šaltiniai, kurie palengvina energijos kaupimą. Pavyzdžiui, straipsnyje [10] aprašyta dėvima radijo bangų kaupimo sistema, kur šaltinio antena gali aptikti kurioje pusėje yra prietaisas ir ta kryptimi orientuoja antenos spindulį, naudojant MIMO (angl. *multiple input multiple output*) technologiją.

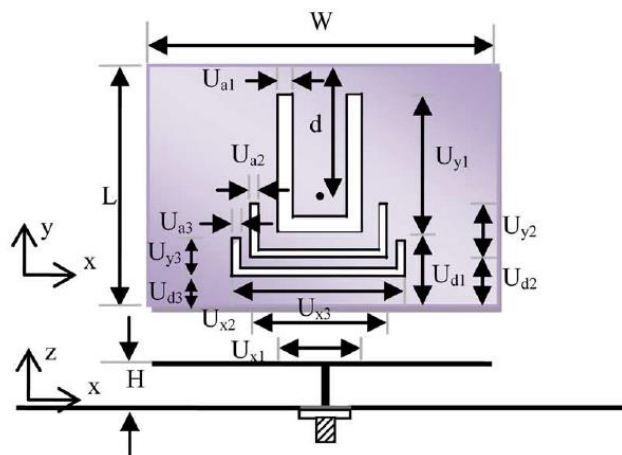
Norint padidinti surenkamos energijos kiekį, yra stengiamasi integruoti keletą skirtingų rūšių energijos kaupimo sistemų į vieną prietaisą. Straipsnyje [11] buvo integruotos šiluminės energijos ir radijo bangų kaupimo sistemos. Šiluminės energijos kaupimui naudojami radiatoriai buvo sukurti taip, kad veiktų kaip antenos GSM900, GSM1800 ir 3G dažnių ruožuose. Kitame straipsnyje [12] buvo integruotos saulės ir radijo bangų energijos kaupimo sistemos. Čia buvo sukurta permatoma kūgio formos plyšinė antena, veikianti nuo 2,2 GHz iki 12,1 GHz, kuri uždedama ant saulės kolektoriaus.

Bet kokių atveju, sistemose, kurios susideda iš daug dalių, yra privalumas naudoti paprastos konstrukcijos elementus. Viena iš priežasčių yra ta, kad juos lengviau analizuoti, yra mažiau parametrų, kurie gali kisti. Kita priežastis yra gamybos paklaidos. Paprasta konstrukcija pasižymi mikrojuostelinės antenos. Jos sudarytos iš dielektriko, kurio viena pusė yra pilnai arba dalinai metalizuota, o kitoje pusėje yra stačiakampio, apskritimo ar kitokios formos metalizuoti dariniai. Antenos rezonansinis dažnis priklauso nuo darinio ilgio, o įėjimo impedansas nuo plokštelės pločio. Tokios antenos pasižymi siaura veikimo dažnių juosta, mažu kryptingumu ir mažu stiprinimu 3-6 dBi. Jos puikiai tinka antenų masyvams gaminti. Straipsnyje [13] naudojant mikrojuostelinių antenų masyvą (2 pav.) 39 GHz dažnyje pavyko pasiekti 19 dBi stiprinimą.



2 pav. Radijo bangų energijos rinkimo sistema su 4x4 mikrojuostelinių antenų masyvu, veikianti 39 GHz dažnyje [13]

Norint turėti mažą anteną su geromis charakteristikomis mikrojuostelinės antenos yra įvairiai modifikuojamos. Pavyzdžiui, straipsnyje [3] norint pagerinti mikrojuostelinės antenos stiprinimą ir sukurti papildomas veikimo dažnių juostas buvo išpjauti fraktalinės formos kraštai ir F formos plyšiai. Taip pat suderinimui pagerinti buvo naudojamas ketvirčio bangos ilgio rezonatorius bei perskelto žiedo formos plyšys. Šios antenos stiprinimas buvo: 5,4 dBi ties 2,1 GHz, 6,4 dBi ties 3,3 GHz ir 5,1 dBi ties 4,1 GHz. Nors stiprinimas pasiektas didelis, antenos konstrukcija yra sudėtinga, todėl rezonansiniai dažniai sunkiai valdomi. Straipsnyje [14] buvo pademonstruotas paprastesnis būdas sukurti dviejų ar trijų rezonansinių dažnių anteną. Čia į plačiajuostę anteną su U formos plyšiu buvo įterpiami papildomi U formos plyšiai. Antena su vienu plyšiu veikia plačiame dažnių ruože ir jos stiprinimas yra >8 dBi beveik visame ruože nuo 4 GHz iki 5,2 GHz. Įterpus antrą plyšį rezonansas atsiranda dviejuose siauresniuose dažnių ruožuose 3,75 GHz – 4,05 GHz ir 5,0 GHz – 5,75 GHz. Pridėjus trečią U formos plyšį (3 pav.) antena veikia trijų dažnių ruožų režimu: 3,5 GHz – 3,75 GHz, 4,85 GHz – 5,2 GHz, 5,5 GHz – 5,7 GHz. Ši antena turi vieną minusą – norint turėti didelį stiprinimą reikalingas oro tarpas tarp viršutinės plokštės ir žemės, todėl darinys gaunasi kiek storesnis.



3 pav. Plyšinė antena su trimis U formos plyšiais [14]

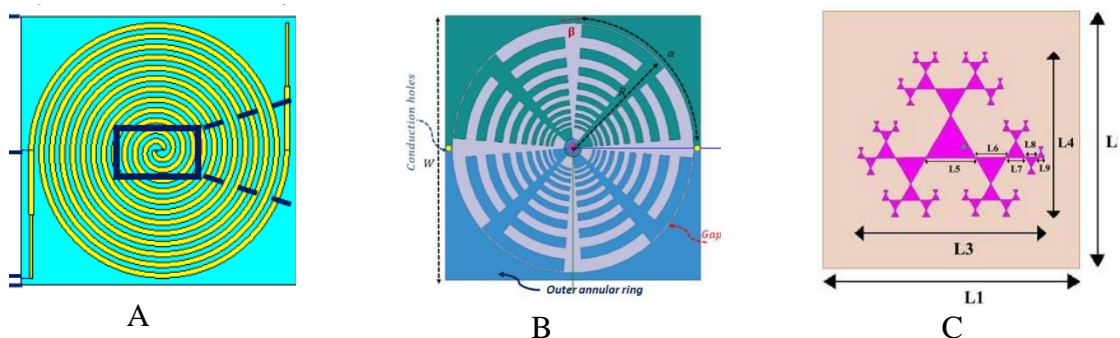
Paprastai antenos pasiekia didelį stiprinimą siauro spinduliavimo ruožo dėka. Populiariausios didelį stiprinimą turinčios antenos yra parabolinės, heliksinės, Yagi-Uda. Ruporinės antenos taip pat gali turėti didelį stiprinimą, tačiau yra rečiau naudojamos dėl savo didelių matmenų. Parabolinės antenos paprastai reikalauja išgaubto skliauto, ką sudėtinga įgyvendinti panaudojant planarinę technologiją. Heliksinės antenos gali būti pagamintos ant plokščio paviršiaus, tačiau konstrukcija yra sudėtinga [15]. Tuo tarpu planarinės Yagi-Uda antenos yra nesudėtingos ir dažnai naudojamos RBRS. Straipsnyje [6] kuriama save maitinanti maisto kokybės užtikrinimo sistema naudoja kryptinę trijų elementų planarinę Yagi-Uda anteną, nes energija renkama iš numatyto vieno dažnio šaltinio. Autoriai teigia, kad panaudojant papildomus nukreipimo elementus tokia antena gali pasiekti 20 dBi stiprinimą, tačiau kartu didėja ir jos matmenys. Sumodeliuotos antenos su vienu kreipimo elementu ir vienu atspindinčiu elementu centrinis veikimo dažnis – 915 MHz, plotis apie 120 MHz, maksimalus stiprinimas yra 6,54 dBi. Jos plotis – 146 mm, ilgis – apie 95 mm. Yagi antenos yra pagarsėjusios sudėtingu impedanso derinimu. Dažnai naudojamas simetrinimo įtaisas (angl. *balun*) turi neigiamų efektų, kaip sudėtinga geometrija ir didelis signalo slopinimas, kas sukelia efektyvumo nuostolius. Tačiau mikrojuostelinėse Yagi-Uda antenose dažnai pasinaudojama galimybe išdėstyti antenos elementus skirtingose dielektriko pusėse taip pasiekiant žadinimui reikalingą 90 fazės poslinkį be papildomų reaktyvių elementų. Panaši antena aprašyta [16] darbe.

Radijo bangų energijos rinkimui naudojami dažniai yra pasiskirstę labai plačiame ruože ir RBRS naudodami vieno rezonansinio dažnio anteną prarandame daug potencialios energijos. Todėl būtų pranašu naudoti anteną, kurios veikimo dažnių juosta apimtu juos visus. Teoriškai tai įmanoma, tačiau praktiškai antenos gali veikti tik tam tikrame dažnių ruože, kuris priklauso

nuo jos ypatybių ir yra baigtinis. Plačiadažnėms antenoms priskiriamos: Archimedo spiralinės, logaritminės, logperiodinės, fraktalinės antenos. Plačiadažnių antenų stiprinimas yra nedidelis. Jis stipriai priklauso nuo antenos dizaino ir dažnai patariama kurti tokių antenų masyvus. Stiprinimo ir SBK (Stovinčios bangos koeficientas) dydžius stipriai įtakoja antenos matmenys, padėklo storis, jo dielektrinė konstanta ir oro tarpas tarp antenos ir žemės sluoksnio. Antenos dydį nulemia žemiausias veikimo dažnis, tačiau yra metodų, kurie leidžia jį sumažinti.

Straipsnyje [17] Archimedo spiralinė planarinė antena buvo panaudota RB energijos rinkimui. Antenos modelis pavaizduotas 4 pav. a). Galima pastebėti, kad spiralės galai yra pratęsti tiesia linija link antenos krašto, tai padidina antenos elektrinį ilgį, sušvelnina srovės atspindžius ir leidžia pasiekti didesnę veikimo dažnių ruožą. Spiralės apsisukimų skaičius lemia žemiausią veikimo dažnį, o centrinis spindulys r_1 , – aukščiausią dažnį. Norint pasiekti antenos veikimo dažnių ruožą nuo 400 MHz iki 5 GHz straipsnio autoriai apskaičiavo, kad spiralės apsisukimų skaičius turi būti $N = 6$, o centrinis spindulys $r_1 = 1,20$ mm. Antena buvo pagaminta ant FR-4 dielektriko, kurio efektyvi dielektrinė konstanta $\epsilon_{\text{eff}} = 4,7$. Pagamintos antenos atspindžio koeficientas buvo išmatuotas dažnių ruože nuo 0,3 GHz iki 18 GHz ir nustatyta, kad antena veikia nuo 350 MHz iki 16 GHz, o S_{11} kinta nuo -10 iki -15 dB. Maksimalus efektyvumas 88% pasiekiamas dažnyje 0,83 GHz, o stiprinimas – 3,47 dBi. Antenos spinduliavimas yra bekryptis (angl. *omnidirectional*) (nes nėra žemės sluoksnio), tai yra privalumas foninės energijos rinkimui.

Logperiodinės antenos taip pat priskiriamos prie plačiadažnių antenų ir yra dažnai naudojamoms RB rinkimo sistemose. Straipsnyje [18] buvo pademonstruota šešių dažnio juostų dvigubos apskritiminės poliarizacijos planarinė logperiodinė antena (4 pav. b)), kuri



4 pav. Daugiadažnės antenos, naudojamos radijo bangų energijos rinkimo sistemose, A – Archimedo spiralinė [17], B – logperiodinė [18], C – fraktalinė [19]

pasižymi dideliu stiprinimu (iki 7,2 dBi). Antena susideda iš dviejų logperiodinių dipolių, kurie vienas kitam yra ortogonalūs. Paveikslėlyje žaliai pavaizduota antenos dalis yra prijungta prie 50 Ω SMA jungties, o mėlyna dalis įžeminta. Antenos parametrams pagerinti buvo siekiama panaudoti daug spinduolių (18), su mažais tarpais, taip perėjimas tarp spinduolių pasidaro tolygesnis ir impedansas kinta mažiau. Didžiausio spinduolio spindulys – 75 mm. Norint gauti apskritiminę poliarizaciją buvo panaudota tuščiaviduris ketvirčio žiedo darinys (spindulys – 4 mm, plotis – 0,5 mm), kuri veikia kaip 90° fazės vėlinimo linija. Ašinis santykis (angl. *axial ratio*) AR < 3 dB buvo pasiektas šiuose dažniuose: 0,63 GHz-0,68 GHz, 0,91 GHz -0,97 GHz, 1,33 GHz -1,69 GHz, 1,77 GHz -2,01 GHz, 2,03 GHz -2,28 GHz, 2,31 GHz -2,51 GHz. Stiprinimas beveik visose dažnių juostose išmatuotas didesnis nei 3,5 dBi, o maksimalus 7,2 dBi ties 2,45 GHz.

Fraktalinės antenos taip pat dažnai sutinkamos RBRS. Jos pasižymi geru spinduliavimo efektyvumu ir plačia dažnių juosta. Straipsnyje [19] ant FR-4 pagaminta fraktalinė antena pavaizduota 4 pav. c). Ji susideda iš kraštais sujungtų trikampių. Kiekviena trikampių pora susideda iš didesnio ir mažesnio trikampio ir jų kraštinių santykis yra konstanta lygi apytikriai 0,65. Antena veikia 5 dažniuose (0,9 GHz, 2,17 GHz, 3,61 GHz, 5,76 GHz ir 6,70 GHz), o juostų pločiai atitinkamai: 161.1 MHz, 47.8 MHz, 491.2 MHz, 12.92 MHz ir 37.36 MHz. SBK (Stovinčios bangos koeficientas) vertės, nusakančios antenos efektyvumą yra: 1.03, 1.40, 1.20, 1.12 ir 1.28. Maksimalus stiprinimas: 13 dBi – 0,9 GHz, 11,22 dBi – 2,17 GHz, 1,37 dBi – 3,61 GHz, 4,86 dBi – 5,76 GHz ir 6,61 dBi – 6,70 GHz. Antena pasižymi labai geru efektyvumu, dideliu stiprinimu, tačiau tai pasiekta didelio antenos ploto (200 x 200 mm) sąskaita.

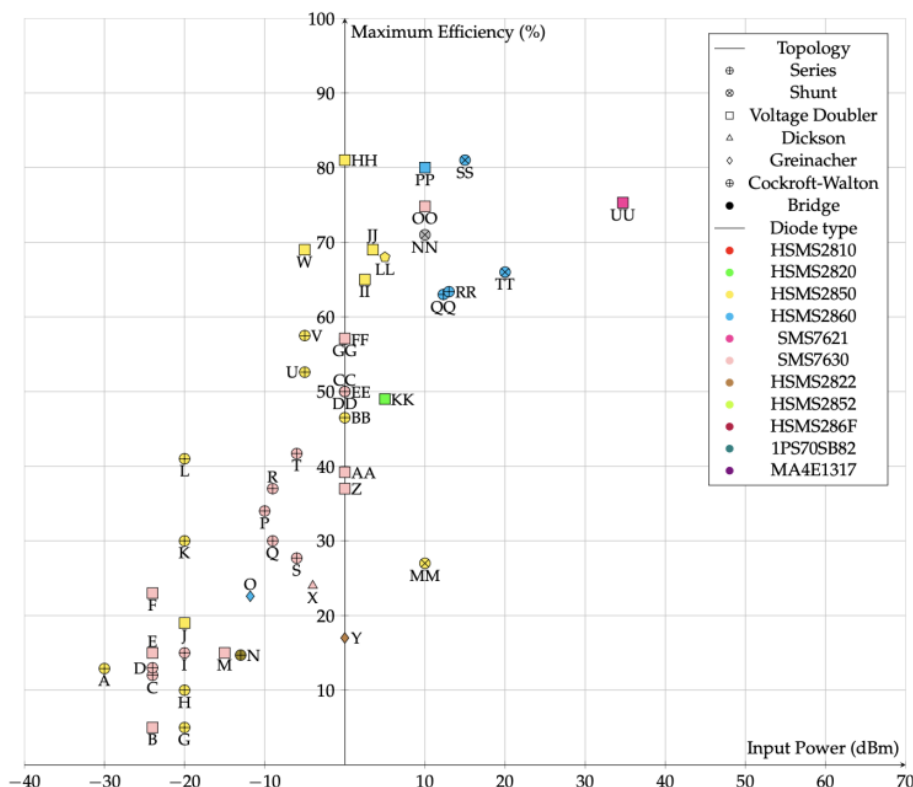
1.3 Mažos galios įtampos lygintuvai

Mažos galios įtampos lyginimui naudojamos įvairios topologijos. Beveik visais atvejais lyginimo grandinės yra sudarytos iš Šotki diodų ir kondensatorių. Šotki diodai sudaryti iš metalas-puslaidininkis sandūros ir turi labai mažą atsidarymo įtampą (apie 0,2 V). Tuo tarpu tradiciniai p-n sandūros diodai atsidaro prie 0,7 V. Kitas svarbus parametras – persijungimo greitis. Šotki diodo persijungimo greitis dėl jo konstrukcijos priklauso tik nuo jo talpos, todėl jie yra greitesni už tipinius p-n diodus.

Straipsnyje [20] buvo surinkti duomenys apie įvairių moksliniuose straipsniuose tyrinėtų mažos galios mikrobangų lygintuvų efektyvumo rezultatus. Rezultatai atvaizduoti 5 pav., kur lygintuvai suskirstyti pagal topologiją ir naudojamų diodų modelį. Grafike

atvaizduotas lygintuvų maksimalus efektyvumas gaunamas prie tam tikros įėjimo galios. Bendra tendencija yra ta, kad kuo didesnė mikrobangų galia lygintuvo įėjime, tuo didesnę efektyvumą galima pasiekti, nes prie didesnės įėjimo įtampos diodai veikia efektyviau. Matome, kad mažos galios signalams (Nuo -30 dBm iki -5 dBm) dažniau naudojamos topologijos su vienu diodu. Vidutinės galios signalams (Nuo -5 dBm iki 10 dBm) lyginti naudojami įtampą dvigubinantis lygintuvai, jie išlygina tiek neigiamą, tiek teigiamą įtampos sinusoidės dalį, todėl išėjime duoda dvigubai didesnę įtampą. Iš šio grafiko matome, kad dažniausiai mokslinėje literatūroje tyrinėjami lygintuvai, kuriuose naudojami SMS7630 ir HSMS2580 diodai.

Populiariausi SMS 7630, HSMS 2820, HSMS 2850 ir HSMS 2860 diodai buvo plačiau palyginti straipsnyje [21]. Čia buvo išmatuotos diodų efektyvumo priklausomybės nuo lyginamos įtampos prie 900 MHz, 2,45 GHz ir prie 5,8 GHz. Žemuose dažniuose SMS7630 ir HSMS 2850 buvo efektyviausi, tačiau prie 5,8 GHz HSMS 2820 diodas stipriai pralenkė konkurentus.



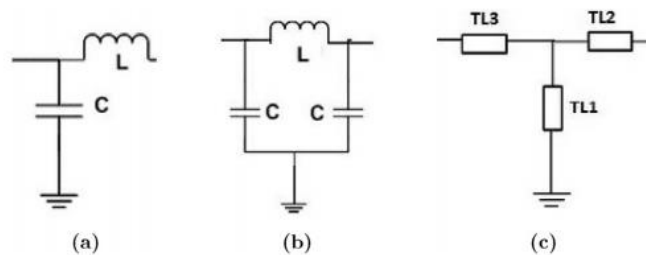
5 pav. Skirtingų lygintuvų topologijų ir naudojamų diodų palyginimas pagal įėjimo galią ir maksimalų efektyvumą [20]

1.4 Impedanso derinimo technikos

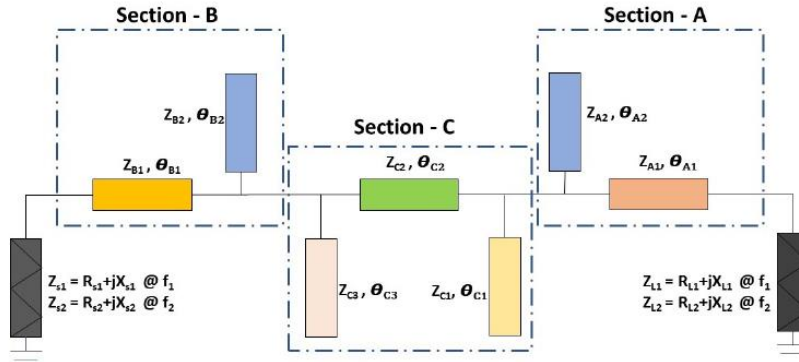
Kadangi antenų impedansas būna 50Ω , o mikrobangų lygintuvų impedansas būna mažas ir kaip taisyklė turi kompleksinę dalį, tarp antenos ir lygintuvo įterpiami impedanso derinimo grandynai. Tai užtikrina maksimalią galios pernašą tarp antenos ir lygintuvo, nes nesusuderinus grandinių didelė dalis galios atsispindi ir yra prarandama.

Dažniausiai sutinkamas impedanso derinimo būdas yra PI, T ir L tipo derinimo grandynai (6 pav.). Jie patrauklūs savo paprastumu, nes yra sudaromi iš rezistorių, kondensatorių ir induktorių. Tačiau tai yra ir neigiamas dalykas, nes aukštuose dažniuose reaktyvūs elementai lemia parazitinius nuostolius, o varža bet koku atveju lemia galios praradimą. Literatūroje dažnai naudojamas kriterijus: $l < \lambda/10$, kur l – fizinio komponento ilgis. Jeigu projektuojame grandyną skirtą 2,4 GHz dažniui tuomet galime naudoti 0603 (0,06” \times 0,03”) dydžio komponentus, kurių ilgis 1,6 mm, nes šiame dažnyje $\lambda/10 \approx 12$ mm ir minėtas kriterijus tenkinamas. Taigi 2,4 GHz dažnyje dar galime naudoti fizinius (angl. *lumped*) elementus tol kol jų vidiniai parazitiniai nuostoliai nėra dideli. Reikia paminėti, kad T ir PI tipo grandynai pasižymi plačia pralaidumo juosta, o L tipo grandynai turi siauresnę pralaidumo juostą tačiau didesnę efektyvumą. Taip yra nes L tipo grandynai yra sudaryti tik iš dviejų elementų. Dėl skirtingo grandynų veikimo skiriasi ir sąlygos kuomet jie yra naudojami. Jei apkrova yra mažo impedanso ($<50 \Omega$) tuomet naudojami T tipo grandynai. Jei apkrova yra didelio impedanso ($>50 \Omega$) tuomet naudojami PI tipo grandynai.

Kad išvengti nuostolių aukštuose dažniuose fiziniai elementai paprastai pakeičiami ekvivalentine mikrojuosteline linija. Tam naudojami įvairių formų šuntai ir linijos. Kombinuoti L, PI ir T mikrojuosteliniai grandynai yra kone geriausias būdas suderinti kompleksinę dalį turinčią apkrovą dviejuose, vienas nuo kito nepriklausančiuose dažniuose.



6 pav. L, PI, T tipo impedanso derinimo grandynai [22]

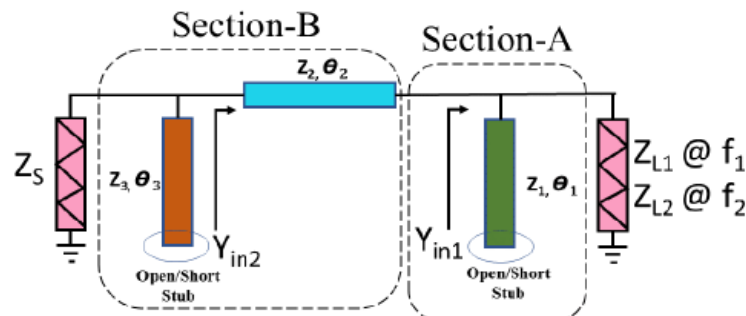


7 pav. Dviejų dažnių impedanso derinimo grandynas [23]

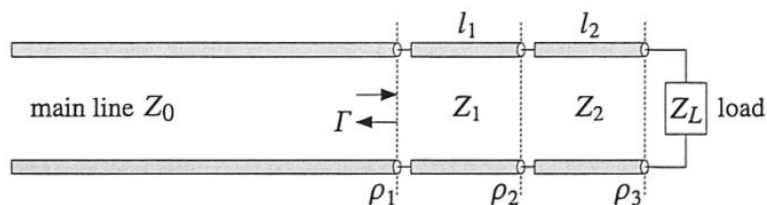
Tai buvo parodyta straipsnyje [23] kuriame buvo pasiūlytas dviejų dažnių impedanso derinimo grandynas (7 pav.). Jis sudarytas iš dviejų L tipo grandynų ir vieno PI tipo grandyno. L tipo sekcijos kompensuoja kompleksinę apkrovos dalį, o PI tipo sekcija suderina realią apkrovos impedanso dalį.

Kitame straipsnyje [24] pasiūlyta elegantiškesnė išeitis. Čia naudojamas PI tipo grandynas (8 pav.). Sekcija A suderina menamą impedanso dalį, o sekcija B suderina realią impedanso dalį. Pasiūlytas derinimas leidžia rasti sprendinį labai plačiuose ruožuose. Tiek matematinė analizė tiek pagaminti prototipai parodė gerą sutapimą su skaičiavimais. Be to, šis grandynas leidžia suderinti realią apkrovą dviejuose dažniuose naudojant tik B sekciją, tad yra labai universalus.

Literatūroje galima rasti ir dar paprastesnių grandynų. Straipsnyje [25] parodyta, kaip naudojant grandyną, panašų į Chebishevo transformatorių, lygintuvą galima suderinti dviem dažniams. Grandyno schema pavaizduota 9 pav. Parinkus atitinkamus sekcijų ilgius ir pločius



8 pav. PI tipo dviejų dažnių impedanso derinimo grandynas



9 pav. Dviejų sekcijų impedanso transformatorius [25]

gaunama situacija, kai atspindys lygus nuliui dviejuose pasirinktuose dažniuose. Atstumas tarp dviejų dažnių gali būti keičiamas. Tačiau ši technika skirta tik apkrovoms neturinčioms kompleksinės dedamosios.

Svarbu įvertinti tai, kad sudėtingesnė schema apsunkina impedanso derinimą: platesnė pralaidumo juosta lemia didesnę mažiausią atspindžio koeficientą, taip pat aukštesniame dažnyje didėja dielektriko nuostoliai ir diodo parazitiniai nuostoliai. Paprasčiausia kompleksinę apkrovą yra suderinti viename dažnyje. Tam naudojami Chebishevo impedanso derinimo grandynai, kurie plačiai aprašyti knygoje Orfanidis „Electromagnetic waves and antennas“ [26].

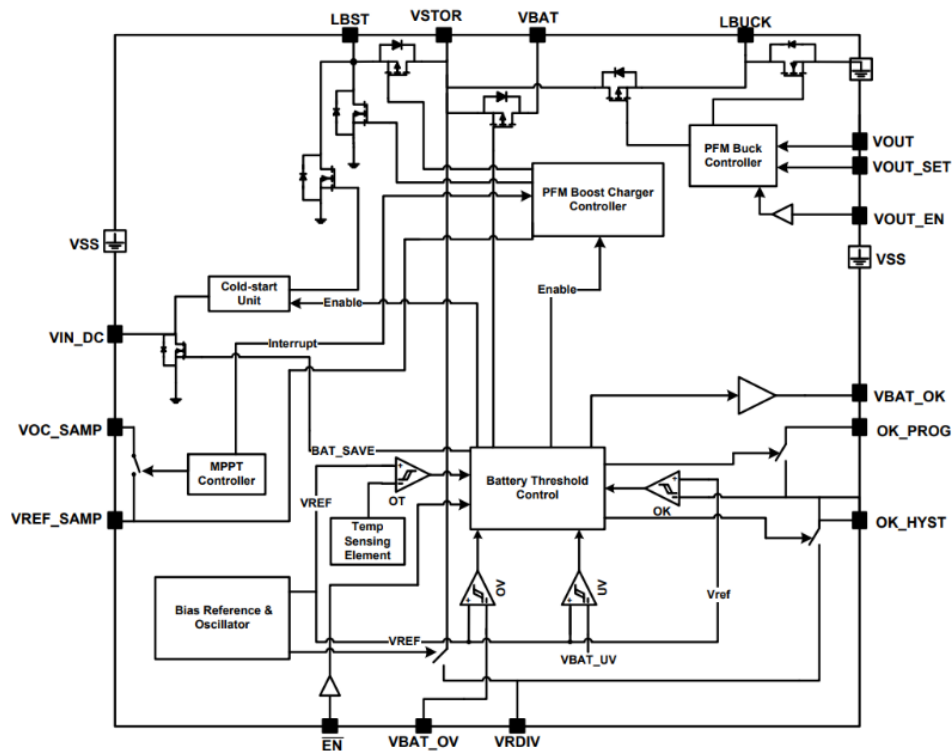
Autoriai straipsnyje [27] siūlo atsisakyti impedanso derinimo grandyno. Kadangi lygintuvo impedansas stipriai kinta priklausomai nuo dažnio impedanso derinimas su plačiadažne antena tampa labai sudėtingas ir dėl to pasiekiamas mažas sistemos efektyvumas. Vietoje jo naudojama speciali itin didelio impedanso antena. Pasirinktame dažnyje antenos impedansas padaromas lygus $(X-jY)$, kai tuo tarpu lygintuvo impedansas yra $(X+jY)$. Tačiau kituose dažniuose antenos impedansas nustatomas taip, kad nesutaptų su lygintuvu, tuomet schema veikia kaip filtras. Sukurta energorinkio sistema pasižymėjo dideliu naudingumo koeficientu ir galėjo rinkti energiją iš plataus dažnių diapazono (nuo 0,9 GHz iki 1,1 GHz ir nuo 1,8 GHz iki 2,4 GHz). Nors autoriai teigia, kad jų sistema palyginus su kitomis yra paprastesnė, tačiau yra uždedamas ribojimas antenos pasirinkimui, nes ne visų tipų antenos gali pasiekti reikiamą impedanso kitimo nuo dažnio charakteristiką ir veikti optimaliai.

1.5 Mažos galios kaupimo ir valdymo sistemos

Gera energorinkio sistema turi turėti energijos kaupimo ir valdymo modulį [6], [28]. Jo paskirtis yra reguliuoti baterijos arba kondensatoriaus įsikrovimą ir išsikrovimą (laiku atjungti apkrovą), taip pat reguliuoti lygintuvo apkrovimą, kad energijos perdavimas būtų maksimalus, ši funkcija vadinama MPPT (angl. *Maximum Power Point Tracking*). Paprastai modulių

išėjime integruojamas ir įtampos transformatorius tuomet galima nustatyti specifinį įtampos lygį tiekiamą apkrovai. Panagrinėkime dažnai naudojamą Texas Instruments® BQ25570 mikroschemą (10 pav.).

Energijos šaltinis jungiamas prie kontakto VIN_DC. Energijos kaupimo elementas jungiamas prie kontakto VBAT. Išėjime VOUT prijungta apkrova. Jeigu prijungtas energijos kaupimo šaltinis yra išsikrovęs įjungiamas „cold-start“ režimas, kurio metu veikia tik mažesnio našumo įtampos keitiklis, kurio tikslas įkrauti VSTOR kondensatorių iki tokio lygio (1,6 V-1,9 V), kad galėtų pradėti veikti pagrindinis aukšto našumo įtampos keitiklis. Pasiekus reikiamą įtampos lygį keitiklis išjungiamas, kad įėjimo įtampa pasiektų atviros grandinės įtampos lygį. Šis įtampos lygis toliau naudojamas kaip atskaitos taškas MPPT įtampos reguliavimui, kuris yra išsaugomas prie VREF_SAMP kontakto prijungtame mažos talpos kondensatoriuje. Toliau tarp VSTOR ir VBAT kontaktų esantis tranzistorius atidaromas bei įjungiamas pagrindinis įtampos keitiklis. MPPT algoritmas kas maždaug 16 s išjungia pagrindinį įtampos keitiklį ir nuskaito naują MPPT atskaitos vertę, nes maksimalus galios taškas kinta priklausomai nuo įėjimo galios. Skirtingi šaltiniai turi skirtingus maksimalios galios taškus, pavyzdžiui, gamintojas rekomenduoja termoelektrinėms energijos rinkimo sistemoms naudoti 50% atviros



10 pav. BQ25570 funkcinė blokinė schema [29]

grandinės įtampos, o saulės elementams 70%-80%. Šis dydis reguliuojamas išoriniais rezistoriais, kurie jungiami tarp VRDIV ir GND kontaktų. Išoriniais rezistoriais reguliuojama ir maksimali, darbinė bei minimali prie VBAT kontakto prijungto energijos kaupimo elemento įsikrovimo įtampa. Kai pasiekiami maksimali riba įtampos keitiklis išjungiamas. Kai pasiekiami darbinė riba VBAT_OK įjungiamas aukštas lygis. Kai dėl prijungtos apkrovos VBAT išsikrauna iki nustatytos ribos, VBAT_OK įjungiamas žemas lygis. Kontaktas VOUT_EN leidžia išoriniu signalu įjungti ir išjungti įtampos keitiklį išėjime, tad sujungę jį su VBAT_OK kontaktu galima automatiškai prijungti ir atjungti išėjimo apkrovą. Yra atvejų, kai toks modulis nėra reikalingas, pavyzdžiui, kai surenkamos energijos kiekis yra pakankamai didelis, kad prietaisą būtų galima maitinti nuolatos.

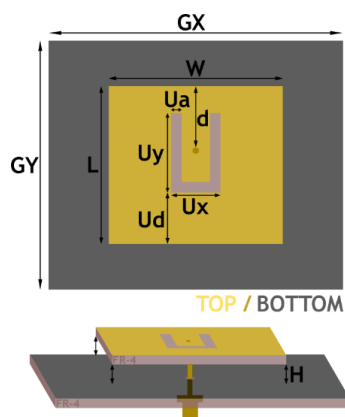
2. Radijo bangų energijos rinkimo sistemos elementų tyrimas

2.1 Antenų modeliavimas CST ir parametų analizė

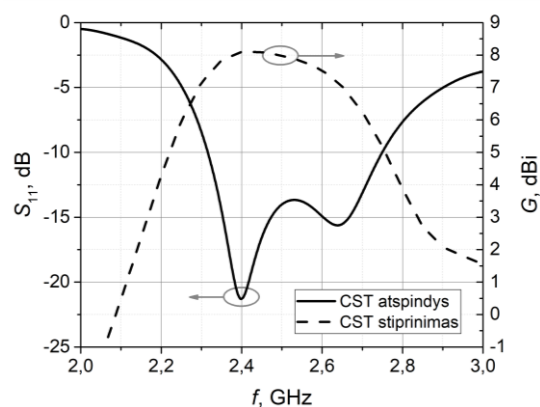
Šio darbo metu buvo sumodeliuotos dviejų tipų planarinės antenos. Modeliavimui pasirinkome CST Studio Suite®, 3D elektromagnetinės analizės programinį paketą, skirtą elektromagnetinių komponentų ir sistemų projektavimui, analizei ir optimizavimui.

Kaip jau buvo aptarta pirmame skyriuje, antenos skirtos RBRS gali būti įvairios. Šio darbo metu buvo nuspręsta sumodeliuoti dvi skirtingas antenas iš kurių viena turėtų platų spinduliavimo kampą, o kita būtų kryptingesnė ir turėtų kuo didesnę stiprinimą. Iš visų 1 skyriuje aptartų antenų planarinė antena su plyšiu atrodo kaip geras variantas energijos rinkimui. Ji yra nedidelio profilio, paprastos konstrukcijos ir universali tuo, kad galima lengvai keisti jos parametrus. Kaip buvo pademonstruota [14] darbe, keičiant plyšio ilgį galima keisti rezonansinį dažnį, keičiant jo plotį plėtės ir dažnių juosta, o norint kelių rezonansinių dažnių galima įterpti papildomą plyšį. Dėl šių priežasčių buvo pasirinkta modeliuoti būtent šios topologijos anteną. Remiantis [14] darbu buvo sumodeliuota plačiadažnė plyšinė antena. Antena pavaizduota 11 pav., o jos parametrai patekti lentelėje (žr. 2 lentelę).

Modeliavimo metu atlikus plyšinės antenos atspindžio analizę buvo nustatyta, kad antenos veikimo dažniui didžiausią įtaką turi viršutinės metalizacijos ilgis, o atspindžio koeficientui – plyšio parametrai, žadinimo vieta ir atstumas iki žemės sluoksnio. Žadinimo vieta turi didelę įtaką suderinimo kokybei, nes tostant nuo antenos krašto varža mažėja.



11 pav. Sumodeliuotos plyšinės antenos vaizdas

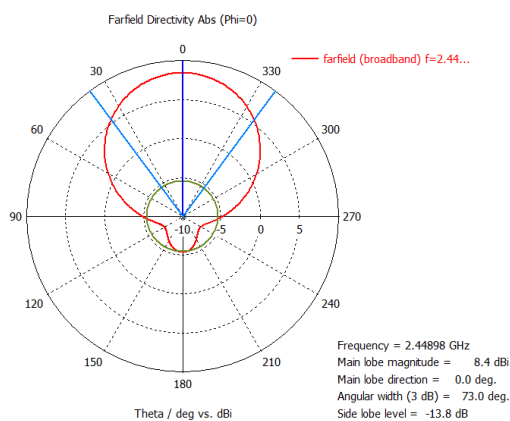


12 pav. Plyšinės antenos modeliavimo rezultatai, atspindžio ir stiprinimo dažninės charakteristikos

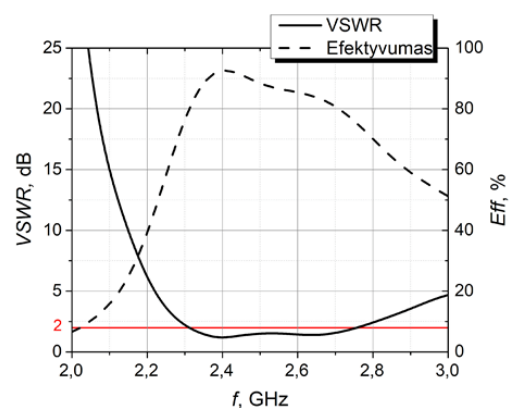
2 lentelė. Galutiniai plyšinės antenos parametrai (mm)

W	L	H	G_X	G_Y	d	U_{a1}	U_{d1}	U_{x1}	U_{y1}
49,6	45	8	84	71	18,4	3	14,7	14,1	22,6

Antenos stiprinimas ir veikimo ruožas matomas 13 pav., jis yra nuo 2,31 GHz iki 2,75 GHz (juostos plotis – 350 MHz). Bevielio ryšio protokolas WiFi IEEE 802.11b susideda iš 14 ryšio kanalų nuo 2,401 GHz iki 2,495 GHz, sumodeliuota antena aprėpia visą šį ruožą. Frakcinis dažnių ruožas lygus 14%, antena nepatenka į plačiadažnių antenų kategoriją (<20%), Maksimalus stiprinimas – 8,1 dBi ties 2,45 GHz. Veikimo ruožų kraštuose stiprinimas nenukrenta žemiau 5 dBi, reiškia galima tikėtis, kad plyšinės antenos surinkta energija bus mažiausiai 3,1 karto didesnė lyginant su izotropine antena. Sumodeliuotos antenos kryptinė diagrama 2,45 GHz dažnyje pavaizduota 13 pav. Spinduliavimas kryptinis, pagrindinio lapelio amplitudė 8,4 dBi. Užpakalinio lapelio amplitudė -5,5 dBi, tai nurodo energijos dydį, kuris išspinduliuojamas nenaudingai. Užpakalinio lapelio amplitudė stipriai priklauso nuo apatinės plokštės dydžio. Esant poreikiui antenos dydį galima būtų sumažinti, tačiau tuomet sumažėtų ir antenos stiprinimo koeficientas. Kryptingumo kampas (angl. *half-power beamwidth*) - 73°. Kuo platesnis spinduliavimo kampas iš tuo daugiau krypčių galima bus priimti energiją. Antenos poliarizacija vertikali. Kiti antenos parametrai pavaizduoti 14 pav. SBK (angl. *VSWR*) yra žemesnis už 2 dažniuose nuo 2,31 GHz iki 2,75 GHz. Tai reiškia, kad sumodeliuota antena išlaiko stabilų impedansą veikimo dažnių ruože. Maksimalus efektyvumas 2,4 GHz dažnyje gautas 92,5 %. Didžiausi nuostoliai susidaro dėl neidealus impedanso suderinimo bei nuostolių dielektrike.



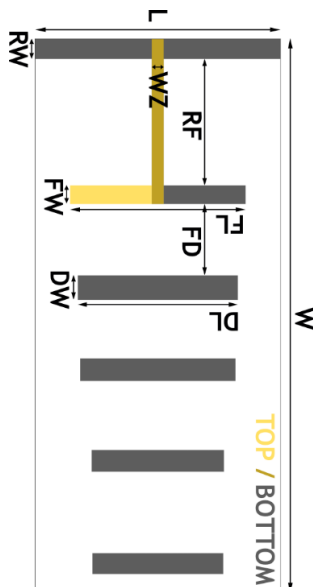
13 pav. Plyšinės antenos kryptinė charakteristika (CST)



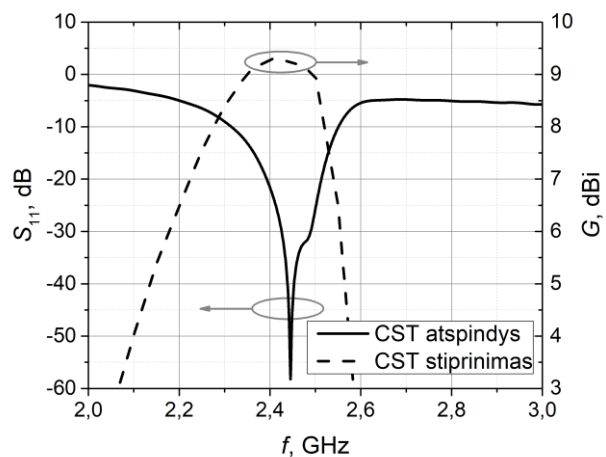
14 pav. Plyšinės antenos SBK (angl. *VSWR*) ir efektyvumas (CST)

Kita mūsų nagrinėta antena – Yagi-Uda (15 pav.). Pagrindinis šios antenos elementas yra dipolis. Prieš dipolį esantis elementas (reflektorius) užtikrina, kad energija nebūtų spinduliuojama atgal. Jo ilgis būna šiek tiek didesnis už dipolio ilgį. Priešais dipolį esantys elementai vadinami direktoriais, jie užtikrina spinduliavimą į vieną pusę formuodami elektrinį lauką. Kuo daugiau yra papildomų direktorių tuo siauresnis darosi antenos spinduliavimas. Direktorių ilgis būna mažesnis nei dipolio. Atstumai tarp direktorių nebūtinai turi būti vienodi. Yra galimybė pridėti ir papildomus reflektorius, tačiau jų poveikis spinduliavimo charakteristikoms yra mažesnis nei papildomų direktorių. Iš kitos pusės, pasiekus tam tikrą direktorių skaičių (6-12) indukuotos srovės tolimiausiuose elementuose pasidaro labai mažos ir turi nedidelę įtaką lauko formavimui.

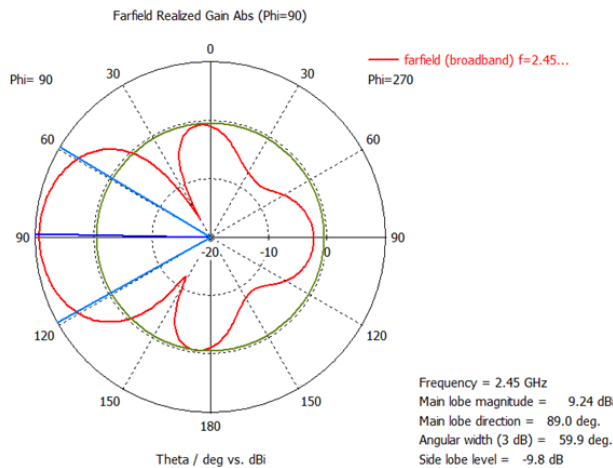
Atlikus Yagi-Uda antenos analizę buvo nustatyta, kad antenoje rezonansinis dažnis labiausiai priklauso nuo dipolio ilgio, o rezonanso gylį galima reguliuoti keičiant reflektoriaus bei direktoriaus ilgį ir atstumą tarp reflektoriaus ir dipolio bei dipolio ir direktoriaus elementų. Sumodeliuota antena pavaizduota 15 pav. Stiprinimas ir atspindžio koeficientas parodyti 16 pav. Antenos veikimo dažnių ruožas 2,32 GHz–2,55 GHz. Maksimalus stiprinimas 9,3 dBi ties 2,4 GHz. Kryptinė diagrama 2,45 GHz dažnyje pateikta 17 pav. Spinduliavimas kryptinis, pagrindinio lapelio amplitudė 9,24 dBi. Užpakalinio lapelio



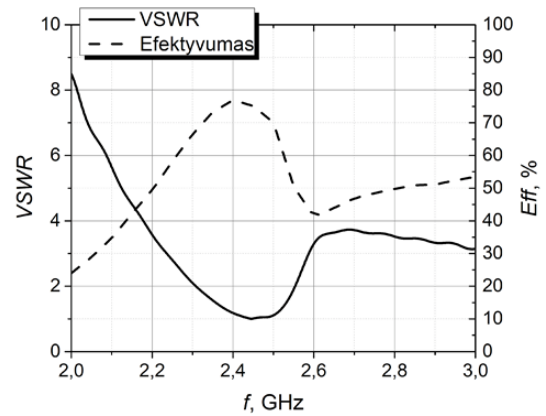
15 pav. Yagi Uda antenos vaizdas



16 pav. Yagi Uda antenos modeliavimo rezultatai, atspindžio ir stiprinimo dažninės charakteristikos



17 pav. Yagi Uda antenos kryptinė charakteristika (CST)



18 pav. Yagi Uda antenos SBK (angl. VSWR) ir efektyvumas (CST)

amplitudė -2 dBi. Užpakalinė spinduliuotė yra pakankamai didelė, naudojant papildomus reflektorius arba metalinę sferą ją būtų galima sumažinti ir taip išgauti didesnę stiprinimą reikiama kryptimi, tačiau tai pasunkintų antenos konstrukciją. Kryptingumo kampas (angl. *half-power beamwidth*) - 59,9°. Kaip ir tikėtasi, Yagi antena yra kryptingesnė nei plyšinė (73°).

Kiti antenos parametrai pavaizduoti 18 pav. SBK yra žemesnis už 2 nuo 2,32 GHz iki 2,55 GHz. Maksimalus efektyvumas gautas 77% 2,4 GHz dažnyje. Plyšinė antena gavosi efektyvesnė (93,5%), galimai dėl pačios antenos konstrukcijos bei geresnio suderinimo.

3 lentelė. Galutiniai Yagi-Uda antenos parametrai (mm)

W	L	fl	dl	rw	fw	dw	rf	fd
50	60	46,4	39,5	4,75	4,79	5,29	15,2	16,39

2.2 Įtampos lygintuvo modelis

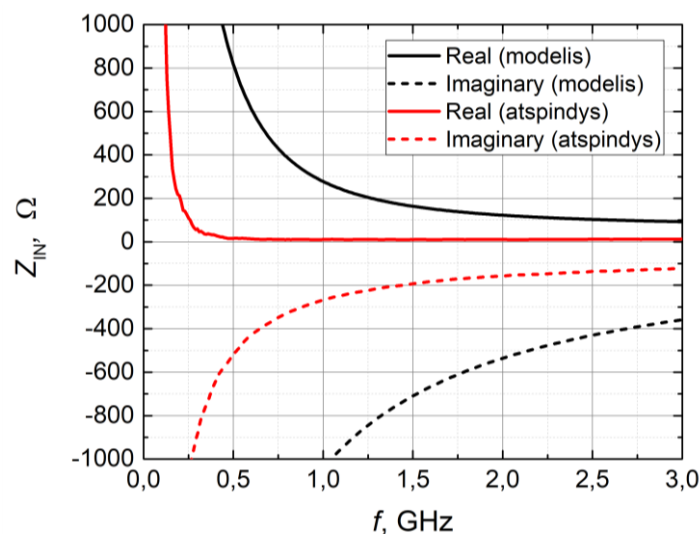
Įtampos lygintuvai bus modeliuojami naudojant programinę įrangą Keysight ADS ("Advanced Design System"), tai yra elektronikos projektavimo automatizavimo programinė įranga, skirta radijo, mikrobangų dažnių grandinėms kurti.

Atlikus literatūros analizę ir įvertinus Šotki diodų prieinamumą rinkoje buvo nuspręsta naudoti SMS7630 Šotki diodus. Kad sumodeliuoti įtampos lygintuvą reikia kuo tikslesnio SMS7630 diodo „spice“ modelio arba ekvivalentinės schemos. Gamintojas šiam modeliui neturėjo pateikęs „spice“ modelio, tačiau techniniuose dokumentuose buvo pateikta diodo ekvivalentinė schema, taip pat buvo pateikta išmatuota diodo atspindžio dažninė charakteristika. Naudojantis SMS7630 dokumentacija buvo sukurtas diodo modelis naudojant ADS programinę įrangą. Šis modelis buvo palygintas su gamintojo pateikta atspindžio

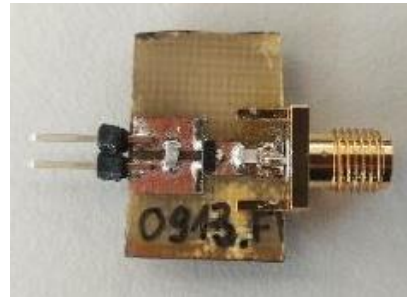
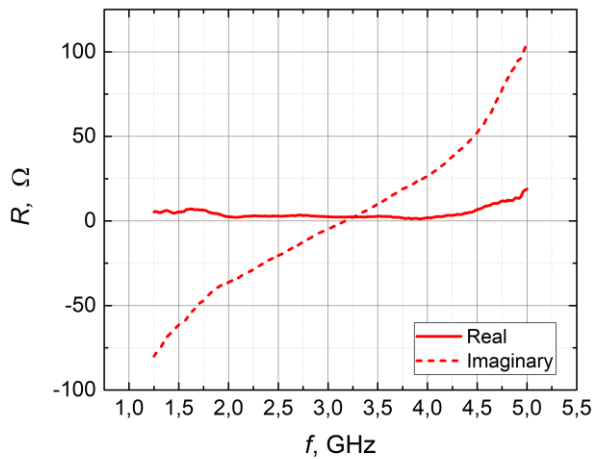
charakteristika (19 pav.). Galime pastebėti, kad paprastas pagal dokumentaciją sukurtas modelis stipriai nesutampa su matavimu. Taip yra todėl, nes modelyje yra prastai įvertinamas diodo netiesiškumas ir netiesiniai parazitiniai parametrai.

Vietoje to, kad kurti sudėtingą diodo modelį, buvo nuspręsta naudoti atspindžio koeficiento matavimo rezultatus. Iš pradžių yra pagaminamas lygintuvas be suderinimo (20 pav. b)) ir išmatuojama jo atspindžio charakteristika (20 pav. a)), tuomet išmatuoti rezultatai įkeliami į S1P failą, kuris modeliuojant naudojamas kaip kuriamo impedanso derinimo grandyno apkrova. Iš išmatuotos lygintuvo be suderinimo atspindžio charakteristikos (20 pav.) matome, kad reali impedanso dalis kinta nežymiai, tačiau menama dalis kinta ruože nuo $-80i \Omega$ iki $104i \Omega$. Nagrinėjamas dažnis yra 2,45 GHz (8 WiFi kanalo centrinis dažnis), šiame taške lygintuvo impedansas lygus $2,94 - 21,78i \Omega$.

Toliau ir visame darbe modeliavimui buvo naudojami tokie parametrai: padėklo storis 1,45 mm, dielektrinė skvarba 4,25, metalizacijos laidumas 10^5 S/m, metalizacijos storis 0,05 mm, dielektriko nuostoliai ($\tan\delta$) 0,002 @ 1 GHz.



19 pav. Diodo modelio (modelis) ir gamintojo pateiktos išmatuotos atspindžio charakteristikos (atspindys) palyginimas pagal įėjimo impedansą



a)

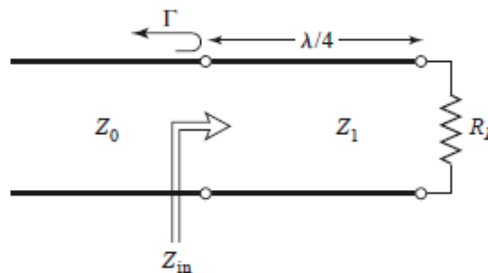
b)

20 pav. Pilno bangos lygintuvas, a- išmatuotas impedansas be suderinimo, b – matuojamas lygintuvas.

2.3 Ketvirčio bangos ilgio transformatoriaus skaičiavimo metodika

Ketvirčio bangos transformatoriai buvo sumodeliuoti dviejų tipų: su linija ir su šuntu. Šių impedanso derinimo grandynų pranašumas yra gamybos paprastumas, nes jis turi vos kelis mikrojuostelinės linijos elementus

David M. Pozar knygoje „Microwave engineering“ [30] nagrinėjamas ketvirčio bangos transformatorius ir aprašoma jo kūrimo eiga. Ketvirčio bangos transformatoriaus schema pavaizduota 21 pav. Čia Z_0 ir R_L yra realūs ir žinomi, jie sujungti idealia nežinomo impedanso Z_1 ir mikrojuosteline linija, kurios ilgis yra $\lambda/4$. Mūsų siekis yra suderinti apkrovą su žadinimo linija Z_0 , kitaip tariant, pasiekti atspindį $\Gamma \rightarrow 0$. Įėjimo varža užrašoma (4) formule.



21 pav. Ketvirčio bangos transformatorius [30]

$$Z_{IN} = Z_0 \frac{R_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jR_L \tan \beta l} \quad (4)$$

Čia $\beta = 2\pi/\lambda$ – sklidimo linija konstanta, o l – nuotolis. $\beta l = (2\pi/\lambda)(\lambda/4) = \pi/2$, $\tan \beta l \approx \beta l$, todėl išraišką galima užrašyti taip:

$$Z_{IN} = \frac{Z_1^2}{R_L} \quad (5)$$

Tam, kad gauti $\Gamma = 0$, Z_{IN} turi būti lygus Z_0 , tam Z_1 turi būti:

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 R_L} \quad (6)$$

Žinant dielektrinio padėklo parametrus galime apskaičiuoti sekcijos Z_1 plotį ir ilgį ir taip suderinti Z_0 sekciją prie realios R_L apkrovos. Sekcija Z_1 suderins tik realią impedanso dalį. Kad suderinti ir menamą apkrovos impedanso dalį reikia pridėti papildomą Z_0 (arba 50Ω) impedanso liniją. Keičiant jos ilgį keičiame kokios fazės bus banga, pasiekusi apkrovą.

2.4 Impedanso derinimas tarp antenos ir įtampos lygintuvo naudojant ADS

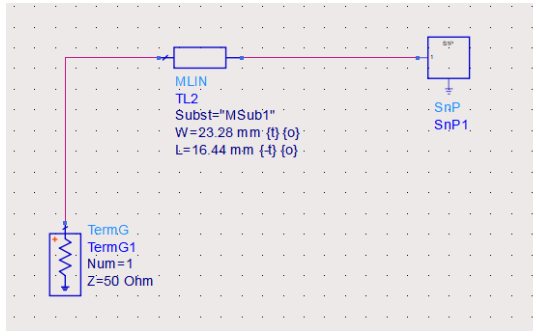
Ketvirčio bangos transformatorius buvo modeliuojamas dviejų tipų: su linija ir su šuntu. Iš pradžių skaičiuojame bangos ilgį λ pagal formulę (7):

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_R}} \quad (7)$$

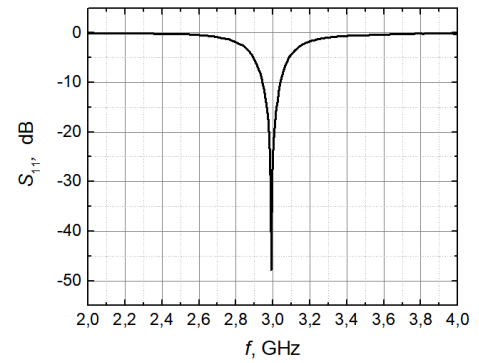
$$\lambda = \frac{2,9 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,24}} = 65,76 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda}{4} = 16,44 \text{ mm,}$$

Turėdami $\lambda/4$ sekcijos ilgį galime pradėti modeliuoti. Kaip jau aptarta anksčiau, šios sekcijos ilgis yra fiksuotas, o plotis suderina realią impedanso dalį. Plotį galime apskaičiuoti teoriškai, naudodami (6) formulę, gauname sekcijos impedansą apie 12Ω , tai atitinka 19 mm linijos plotį. Paveikslėlyje (22 pav. a)) pavaizduota modeliuojama schema, o 22 pav. b) parodyta atspindžio koeficiento priklausomybė nuo dažnio. Sekcijos plotis buvo didinamas tol, kol buvo pasiektas optimalus realios impedanso dalies suderinimas. Iš 22 pav. b) matyti, kad suderinimas pasiektas netinkamame dažnyje. Norint paslinkti suderinimo dažnį reikalinga papildoma 50Ω linija. Toks pakeitimas pavaizduotas 23 pav. a). Geriausios sąlygos pasiektos (23 pav. b),d)), kai 50Ω linijos ilgis 4,34 mm.

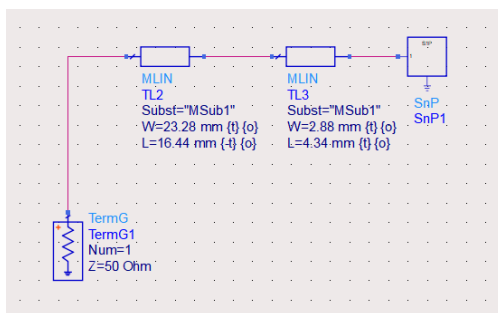


a)

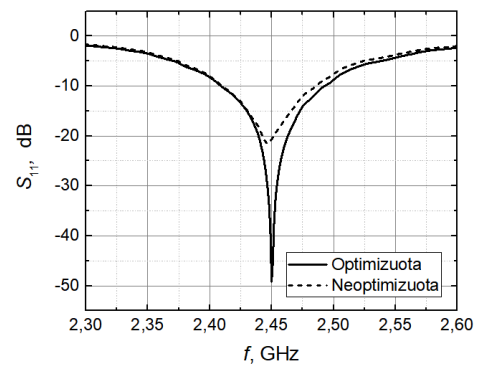


b)

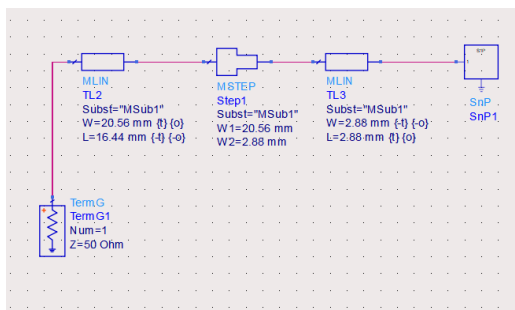
22 pav. Chebishevo transformatorius tik $\lambda/4$ linija (ADS), a – schema, b – atspindžio charakteristika



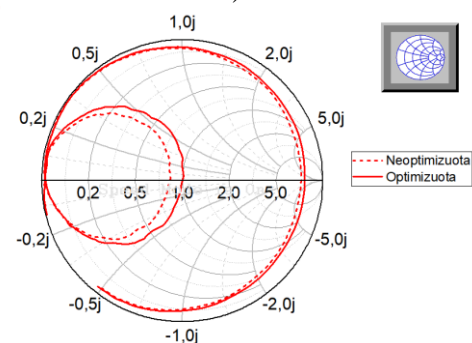
a)



b)



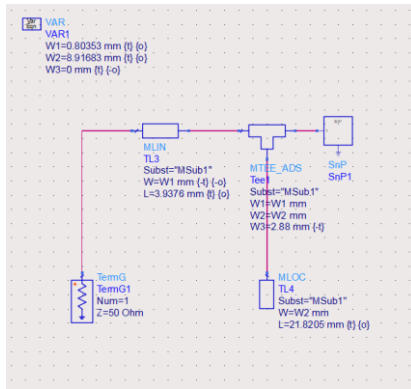
c)



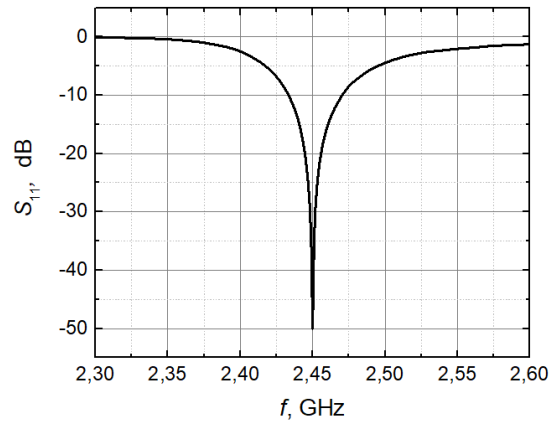
d)

23 pav. Chebishevo transformatorius a – schema prieš optimizaciją, b – atspindžio charakteristika, c – schema po optimizavimo, c – Smito diagrama

Perėjimas tarp dviejų skirtingos varžos (takelio pločio) linijų turi įtakos bangos sklidimui, todėl suderinimo grandynas buvo optimizuojamas įvertinant atspindžius dėl impedanso perėjimo (23 pav. c)). Po optimizavimo buvo gauti tokie sekcijų ilgiai ir pločiai: $L_1=16,56$ mm $W_1= 20,56$ mm, $L_2= 2,88$, $W_2= 2,88$ mm.



a)



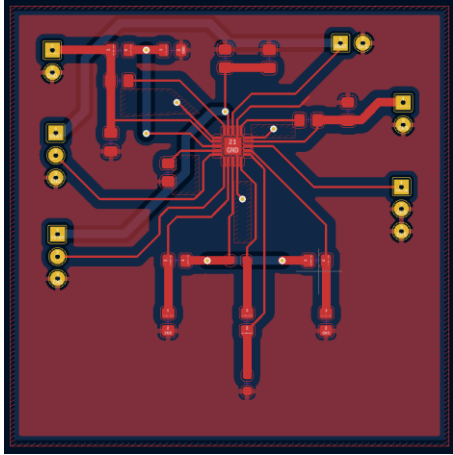
b)

24 pav. Chebishevo transformatorius su šuntu a – schema, b – atspindžio charakteristika

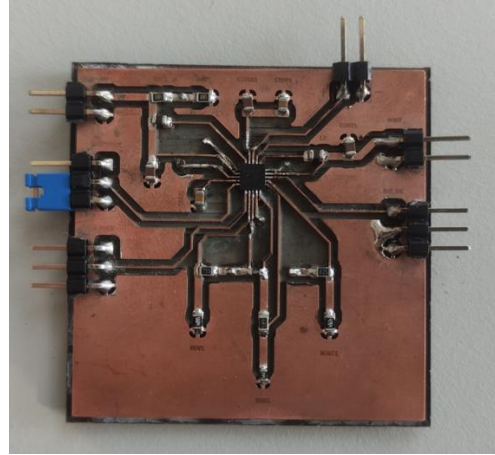
Impedanso derinimo grandynas su šuntu buvo modeliuojamas remiantis [30] šaltiniu - $\lambda/8$ ilgio trumpinantis šuntas atitinka talpą, o $3\lambda/8$ – induktyvumą. Atviras šuntas – priešingai, $\lambda/8$ – induktyvumas, o $3\lambda/8$ – talpa. Parinkdami šunto banginę varžą galime kompensuoti tiek induktyvinę tiek ir talpuminę apkrovos impedanso dalį. Matuojant lygintuvo impedansą jo kompleksinė dalis buvo neigiama, tai reiškia talpinį reaktyvumą. Kad jį kompensuoti naudosime atvirą šuntą, nes jis yra lengviau pagaminamas. Grandyno su šuntu schema ir atspindžio charakteristika pavaizduota 24 pav. a),b).

2.5 Energijos valdymo modulis

Norint užtikrinti optimalų energijos perdavimą iš įtampos lygintuvo į energijos kaupimo elementą ir periodinį maitinimo įtampos tiekimą apkrovai buvo nuspręsta panaudoti Texas instruments® BQ25570 modulį. Naudojant atviros prieigos KiCAD programinę įrangą ir remiantis BQ25570 dokumentacijoje pateiktais nurodymais šiam elementui buvo suprojektuota spausdintinė plokštė (25 pav.). Pagrindiniai parametrai, kuriuos reikėjo nustatyti naudojant išorinius rezistorius buvo šie: MPPT koeficientas (0,5), kaupimo elemento įsikrovimo lygio viršutinė riba (4,2 V), žemutinė riba (3,6 V), apkrovos prijungimo riba (4,1 V). Suprojektuota plokštė buvo pagaminta ant FR-4 dielektrinio padėklo lazerinės abliacijos būdu (26 pav.). Lazerinė abliacija buvo vykdoma naudojant EKSPLA Atlantic 20W lazerį.



25 pav. Suprojektuota spausdintinė plokštė
KiCAD programinėje aplinkoje



26 pav. Pagaminta spausdintinė plokštė su
BQ25570 elementu

3. Rezultatai

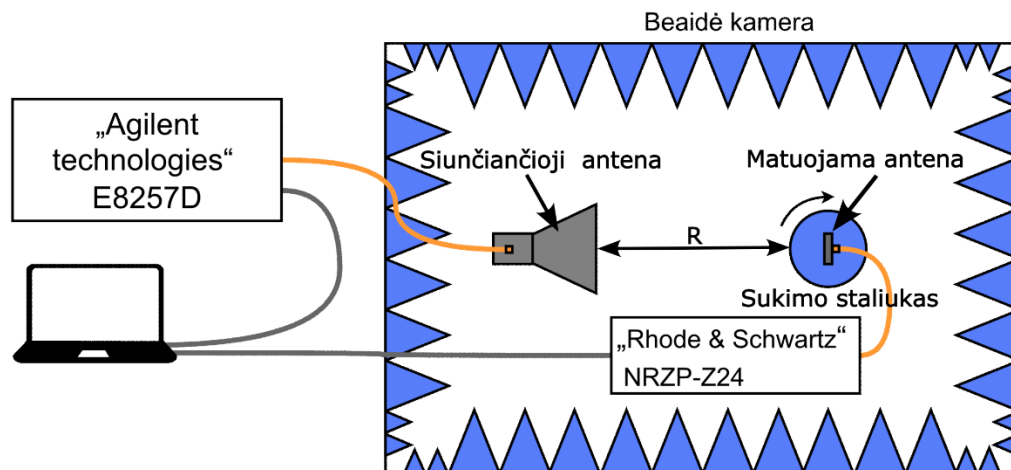
3.1 Gamybos ir matavimų metodikos

Antrame skyriuje buvo sumodeliuotos dvi antenos (plyšinė ir Yagi-Uda), Chebishevo tipo impedanso derinimo grandynas ir suprojektuota energijos valdymo plokštė. Šiame skyriuje bus aprašytos RBRS elementų gamybos ir eksperimentinio tyrimo metodikos ir pateiktos išmatuotos jų charakteristikos.

RBRS komponentai (išskyrus energijos valdymo modulį) gaminami ant metalizuoto FR-4 dielektrinio padėklo. Gamybai naudojamas vario ėsdinimas natrio persulfato $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ tirpalu. Plonu metalizacijos sluoksniu ($50\mu\text{m}$) padengtas dielektriko paviršius yra padengiamas šviesai jautria medžiaga - pozityviu fotorezistu (KOC-POSITIV20). Tuomet naudojant specialų trafaretą paviršius yra 60 s apšviečiamas ultravioletine spinduliuote. Toliau vykdomas ryškinimas. Ryškinimo metu plokštė įmerkiamą į vonelę su DP50 tirpalu (natrio metasilikatas Na_2SiO_3), neapšvitintose vietose fotorezistas yra nuplaunamos, o trafareto uždengtose vietose fotorezistas lieka ir taip sudaro rūgščiai atsparų trafareto formos sluoksnį. Galiausiai vykdomas ėsdinimas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ tirpale. Pagaminus antenas buvo įvertintos jų kryptinės ir dažninės charakteristikos. Antenų spinduliavimą nusakančios charakteristikos matuojamos FTMC mikrobangų beaidėje kameroje. Beaidėje kameroje yra sukuriama begalinės erdvės sąlygos (nėra atspindžių), kas stipriai palengvina antenos stiprinimo nustatymą. Matavimo schema pavaizduota 27 pav. Radijo impulso generavimui naudojamas analoginis impulsų generatorius E8257D. Jis koaksialine linija sujungtas su kalibruota plačiadažne ruporine antena (1-18 GHz), kuri nukreipta į pagamintą nežinomų parametru anteną. Tiriama antena pritvirtinta prie stendo, kurio pasisukimo kampas valdomas kompiuteriu (1° žingsnis). Pagamintos antenos išėjimas sujungtas su R&S NRZP-Z24 galios jutikliu. Antenos stiprinimas apskaičiuojamas pasinaudojus tokia išraiška:

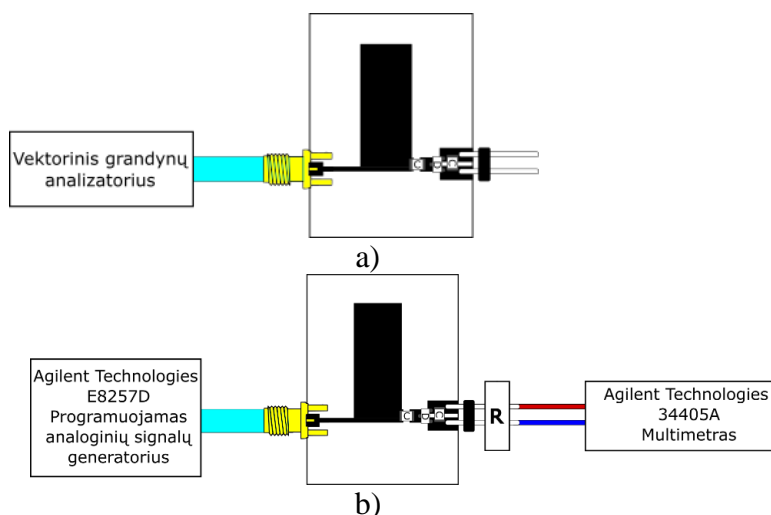
$$G(f, \varphi, \theta) = \frac{P(f, \varphi, \theta)(4 \cdot \pi \cdot R)^2}{(P_{TR} \cdot G_{TR} \cdot \lambda)^2} \quad (8)$$

čia P – išmatuota galia (su nuostoliais), R – atstumas tarp antenų, P_{TR} – galia paduodama į siunčiančią anteną, G_{TR} – siunčiančios antenos stiprinimas, λ – bangos ilgis, f – elektromagnetinės spinduliuotės dažnis, o φ ir θ – sferinės koordinatų sistemos kampai. Norint pilnai iširti antenos parametrus yra naudojami du matavimo režimai: dažninė charakteristika matuojama užfiksavus kampus, o kryptinės charakteristikos matuojamos fiksuotame dažnyje.



27 pav. Dažniųjų ir kryptinių charakteristikų matavimo schema

Antena ir įtampos lygintuvai charakterizuojami atspindžio dažnine priklausomybe, ji nusako suderinimo tarp sistemos elementų kokybę. Tam naudojamas vektorinis grandynų analizatorius. Matavimo schema pavaizduota 28 pav. a). Įtampos lygintuvai charakterizuojami išėjimo įtampos priklausomybe nuo įėjimo signalo galios ir dažnio. Šios charakteristikos matuojamos naudojant programuojamą impulsų generatorių E8257D, jis sugeneruoja įėjimo signalą. Išėjime įtampos lygis matuojamas Agilent 34405A multimetru. Schema pavaizduota 28 pav. b). Matuojant įtampos lygintuvo efektyvumą lygiagrečiai multimetru yra prijungiamos skirtingo nominalo varžos.

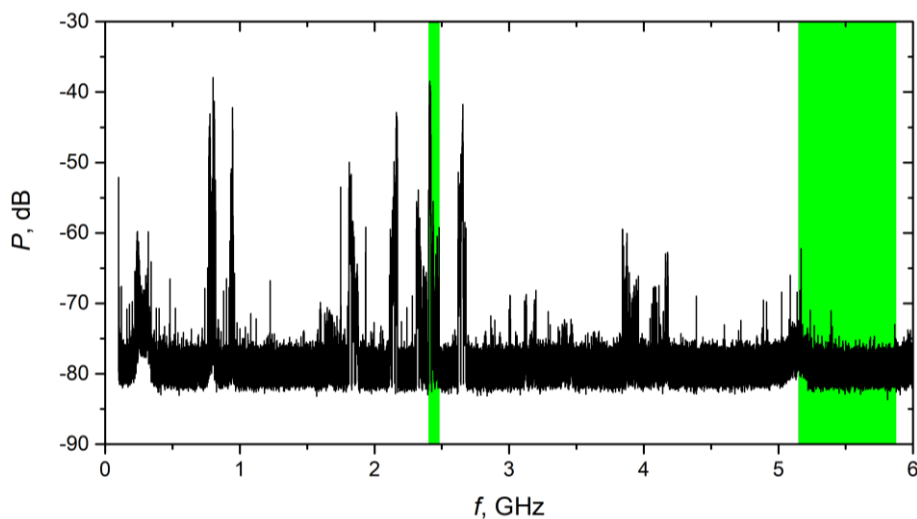


28 pav. Matavimų blokinė schema, a – atspindžio koeficiento matavimo schema, b – išėjimo įtampos priklausomybės nuo įėjimo signalo matavimas

3.2 Aplinkos spektro matavimas

Norint patikrinti, kaip yra išsidėstę radijo bangų šaltiniai spektre būtų naudinga atlikti spektro matavimą laboratorijoje, naudojant programine įranga apibrėžtą radiją (SDR)

„HackRF“. Tai yra programine įranga valdomas radijo bangų siųstuvai ir imtuvai, galintys nuskaityti signalus nuo 1 MHz iki 6 GHz, vienu metu galima stebėti maksimalią 20 MHz pločio dažnių juostą 20 MS/s tikslumu. Matavimas buvo atliekamas 5 minutes, naudojant maksimalios vertės užlaikymą (programa - QSpectrumAnalyzer). Signalas stiprinamas 40 dB, spektras yra skenuojamas 20 MHz pločio atkarpomis, pilna dažnių juosta nuskanuojama kas 2 s. Paveikslėlyje (29 pav.) pavaizduotas FTMC bendro naudojimo patalpose išmatuotas foninės aplinkos spektras. Paveiksle šviesiai žalia linija pažymėtos WiFi-2,4 ir WiFi-5 veikimo dažnių juostos. Matome, kad WiFi 5 GHz kanalai (5150–5875 GHz) atrodo mažiau aktyvūs, tai gali būti todėl, nes naudojama antena nepritaikyta aukštiems dažniams. Matavimo metu aktyviausias buvo pirmas WiFi-2 kanalas (2,401–2,423 GHz).



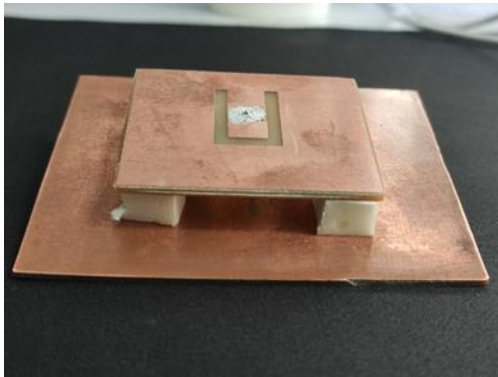
29 pav. Radijo bangų spektras nuo 1 MHz iki 6 GHz, išmatuotas naudojant programine įranga valdomą radiją HackRF

3.3 Plyšinės antenos matavimai

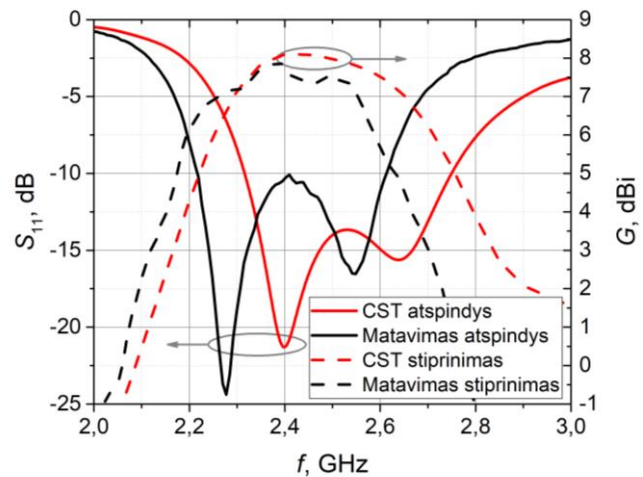
Pagaminta plyšinė antena pavaizduota 30 pav. Atspindžio matavimo rezultato palyginimas su modeliavimo rezultatais parodytas 31 pav. ištisine linija. Iš rezultatų matyti, kad pagamintos antenos rezonansinis dažnis pasislinko į žemesnių dažnių pusę. Taip atsitiko todėl, nes siekiant geresnio impedanso suderinimo, aukštis tarp viršutinės ir apatinės plokštės H buvo šiek tiek sumažintas. Sumodeliuotos antenos veikimo dažnių ruožas yra nuo 2,31 GHz iki 2,75 GHz, o išmatuotas - nuo 2,17 GHz iki 2,65 GHz. Pagaminta antena yra tinkama naudoti kuriamoje RBRS, nes pilnai padengia visą WiFi dažnių ruožą.

Išmatuotas plyšinės antenos stiprinimas yra atvaizduotas 31 pav. punktyrine linija. Matyti, kad antenos stiprinimas kaip ir atspindys yra šiek tiek pasislinkęs į žemesnių dažnių pusę, tačiau nuo modeliavimo metu gauto skiriasi mažiau nei 1 dBi, todėl galima laikyti, kad rezultatai sutampa. Maksimalus antenos stiprinimas – 7,9 dBi. Plyšinės antenos kryptinės charakteristikos pateiktos 32 pav. Iš vertikalios poliarizacijos matavimų (32 pav. a)) galime pastebėti neatitikimą antenos galiniame spinduliavime, taip galėjo nutikti dėl pasirinkto per mažo tikslumo modeliuojant arba suprastėjusio jutiklio jautrumo mažose galiose. Tačiau skirtumas nežymus, todėl gali būti laikomas nereikšmingu. Horizontalios poliarizacijos (32 pav. b)) matavimo ir modeliavimo kreivės neblogai sutampa. Antenos spinduliavimo kampas: 72° .

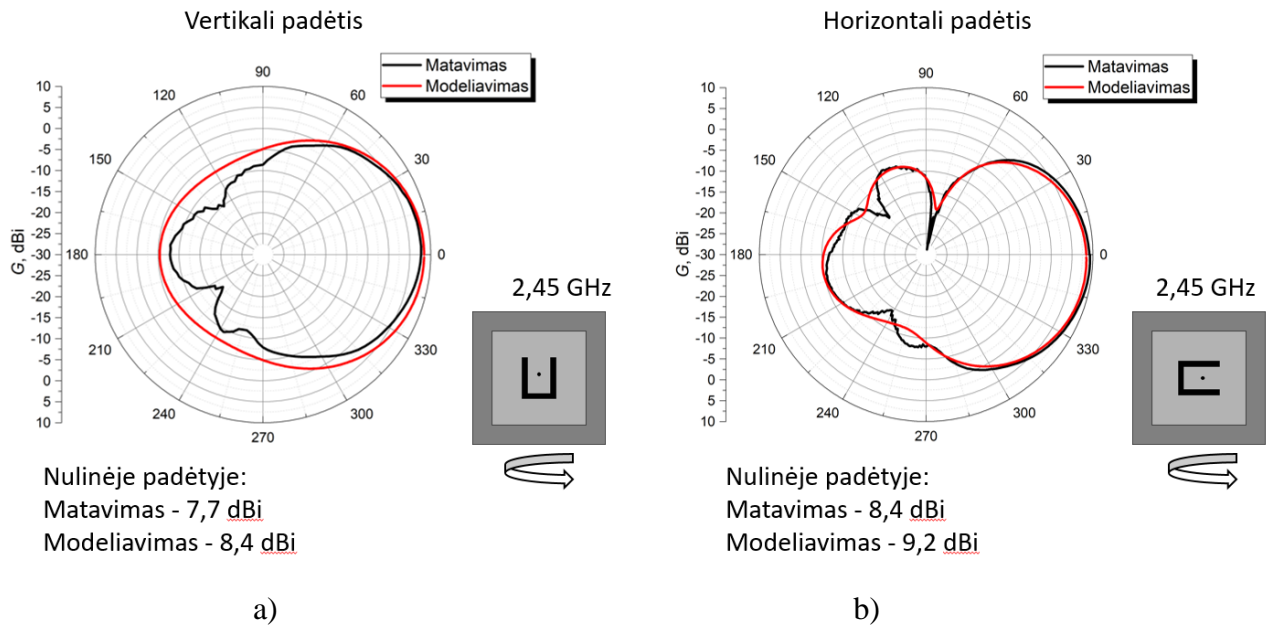
Pagaminta plyšinė antena atitinka energijos rinkimo sistemos reikalavimus. Ji yra pakankamai maža (ilgis – 71 mm, plotis – 84 mm, bendras aukštis be žadinimo jungties – 11,2 mm). Žemės sluoksnis užtikrina kryptinį spinduliavimą ir didelį stiprinimą (7,5 dBi ties 2,45 GHz). Operacinis dažnis apima visą Europoje naudojamą WiFi dažnių ruožą (nuo 2,401 GHz iki 2,483 GHz).



30 pav. Pagaminta plyšinė antena



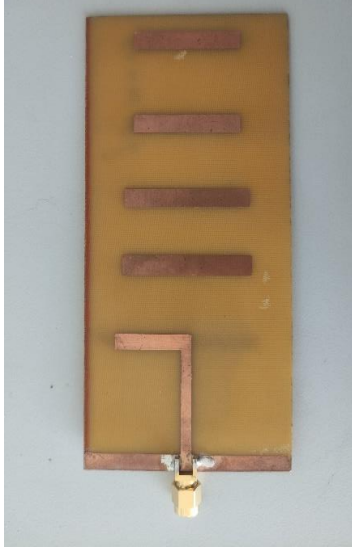
31 pav. Plyšinės antenos atspindžio ir dažninės charakteristikos matavimo ir modeliavimo rezultatai



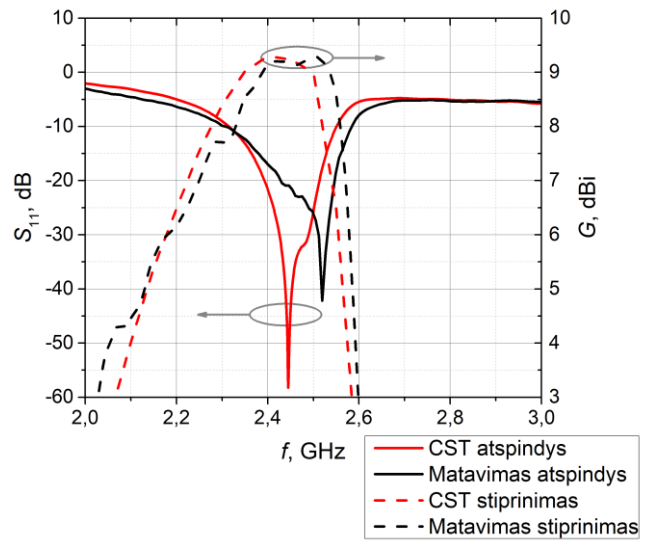
32 pav. Plyšinės antenos kryptinių charakteristikų matavimo ir modeliavimo rezultatai, a - vertikaloje ir b - horizontalioje padėtyje

3.4 Yagi Uda antenos matavimai

Pagamintos Yagi Uda antenos (33 pav.) atspindžio charakteristikos matavimo rezultatai pavaizduoti 34 pav. ištisine linija. Išmatuota antenos atspindžio dažninė charakteristika labai gerai sutampa su modeliavimo metu gautais rezultatais. Antenos veikimo dažnių ruožas, kai $S_{11} < -10\text{dB}$ modeliuojant gautas: 2,32 GHz–2,55 GHz, o išmatuotas: nuo 2,3 GHz iki 2,58 GHz. Išmatuota stiprinimo priklausomybė nuo dažnio kaip ir atspindys yra šiek tiek pasislinkęs į aukštesnių dažnių pusę, tačiau maksimali amplitudė tokia pati (modeliuojant: 9,3 dBi, išmatuota: 9,3 dBi). Kryptinėje diagramoje (35 pav. a)) vertikalios poliarizacijos grafike galima pastebėti, kad išmatuotas stiprinimas 0° kryptimi gautas kiek mažesnis už sumodeliuotą (modeliavimas: 9,23 dBi, matavimas: 8,4 dBi). Horizontalios padėties matavimas (35 pav. b)) sutapo su modeliavimo metu gautais rezultatais (modeliavimas: 9,23 dBi, matavimas: 8,6 dBi). Spinduliavimo kampas 64° , palyginus su plyšine antena (72°) Yagi Uda antena pasižymi didesniu kryptingumu.

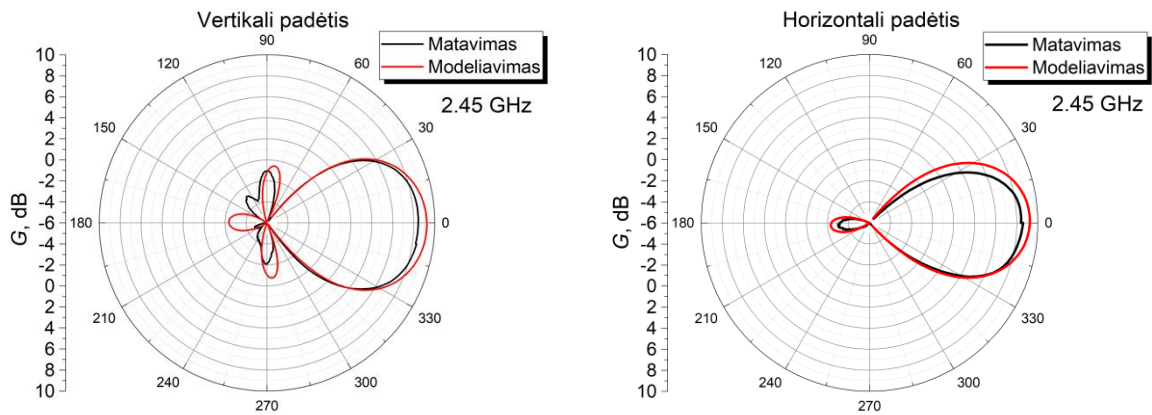


33 pav. Pagaminta Yagi Uda antena



34 pav. Yagi Uda antenos atspindžio ir dažninės charakteristikos matavimo ir modeliavimo rezultatai

Ši Yagi Uda antena tinkama naudoti energijos rinkimo sistemoje, kurioje energija yra renkama iš vieno šaltinio. Ji kiek didesnė už anksčiau aprašytą plyšinę anteną (ilgis – 71 mm, plotis – 84 mm, aukštis be žadinimo jungties – 1,45 mm). Antenos operacinis dažnis apima visą Europoje naudojamą WiFi dažnių ruožą (nuo 2,401 GHz iki 2,483 GHz). Taip pat ji yra kryptinga ir turi didelį stiprinimą (> 9 dBi).



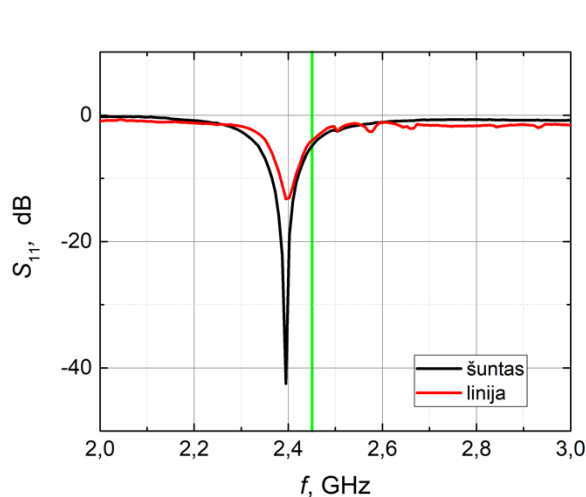
a)

b)

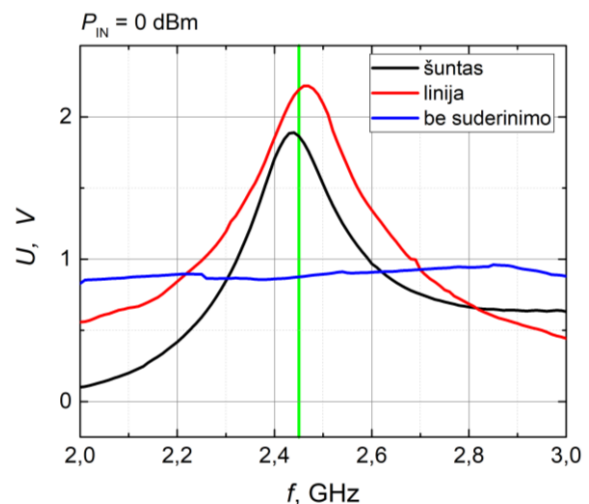
35 pav. Yagi Uda antenos kryptinių charakteristikų matavimo ir modeliavimo rezultatai, a - vertikaloje ir b - horizontalioje padėtyje

3.5 Chebishevo impedanso derinimo grandynai

Poskyryje 2.4 sumodeliuoti dviejų tipų Chebishevo impedanso derinimo grandynai buvo pagaminti ir ištirtos jų atspindžio bei išėjimo įtampos priklausomybės nuo dažnio charakteristikos. Derinimo grandynų atspindžio charakteristikos pavaizduotas 36 pav. Iš paveikslo matome, kad grandyno su šuntu ir grandyno su linija atspindžio koeficiento minimumas yra ties 2,4 GHz. Lygintuvo su linija atspindys išmatuotas didesnis nei lygintuvo su šuntu: linija - -13,1 dB, šuntas - -42,5 dB. Matuojant įtampos priklausomybę nuo dažnio (37 pav.) lygintuvo su linija įtampos maksimumas gautas 2,22 V ties 2,47 GHz, o su šuntu kiek mažiau – 1,88 V ties 2,44 GHz, nors pagal atspindžio charakteristiką šunto suderinimas turėtų būti geresnis. Palyginimui buvo išmatuota ir lygintuvo be suderinimo įtampa, ji visame dažnių ruože buvo lygi apie 0,85 V, naudodami impedanso derinimo grandyną ties 2,47 GHz gauname 2,6 karto didesnę įtampą. Galutinės linijos ir šunto derinimo grandynų matmenys pateikti 4 lentelėje.



36 pav. Pagamintų įtampos lygintuvų su Chebishevo impedanso derinimo grandynais atspindžio priklausomybė nuo dažnio, kai $R_L = 10 \text{ M}\Omega$



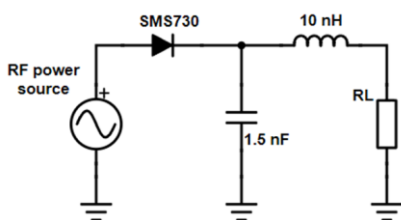
37 pav. Pagamintų įtampos lygintuvų su Chebishevo impedanso derinimo grandynais įtampos priklausomybė nuo dažnio, kai $R_L = 10 \text{ M}\Omega$

4 lentelė. Galutiniai impedanso derinimo grandynų elementų matmenys

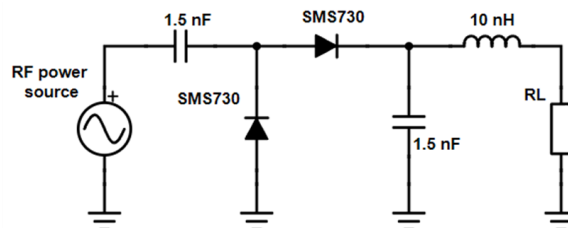
Derinimo grandyno tipas	Sekcijos Nr. 1 ilgis, mm	Sekcijos Nr. 1 plotis, mm	Sekcijos Nr. 2 ilgis, mm	Sekcijos Nr.1 plotis, mm
Linija	16,7	20,3	6,2	2,88
Šuntas	18	1	25	10,5

3.6 Įtampos lygintuvai: topologijų palyginimas

Radijo bangų energijos rinkimo sistemos elementų apžvalgoje buvo išsiaiškinta, kad mažos įtampos lyginimui galima naudoti daug įvairių topologijų. Šiame darbe buvo ištirti ir palyginti dviejų tipų įtampos lygintuvai: pusės bangos ilgio lygintuvas ir pilno bangos ilgio lygintuvas, kurių topologijos pavaizduotos 38 pav. ir 39 pav. Pirmoje topologijoje yra tik vienas diodas, kuris praleidžia kintamą elektros srovę tik į vieną pusę, todėl sakoma, kad išlyginama tik pusė bangos. Antroje topologijoje pirmoji pusbangė įkrauna nuosekliai prijungtą kondensatorių, o antrosios pusbangė metu, įėjimo ir įkrauto kondensatoriaus įtampos susideda ir įkrauna antrąjį, lygiagrečiai prijungtą kondensatorių, iki įtampos, maždaug 2 kartus didesnės nei įėjimo signalo amplitudė. Abiejose topologijose taip pat yra po vieną mažo induktyvumo ritę. Ši ritė naudojama kaip aukšto dažnio filtras.

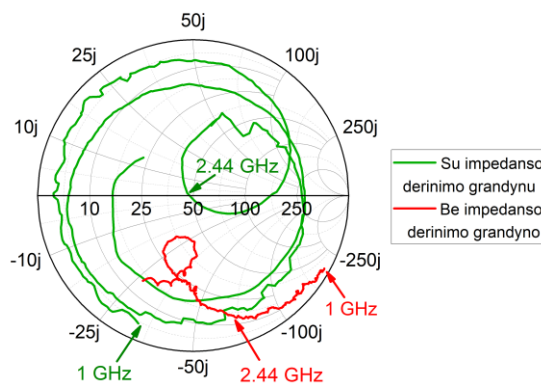


38 pav. Pusės bangos įtampos lygintuvas



39 pav. Pilnos bangos įtampos lygintuvas

Pradžioje buvo pagaminti pusės bangos ir pilnos bangos įtampos lygintuvai be impedanso derinimo grandinės ir išmatuotos jų atspindžio charakteristikos. Tuomet naudojant ketvirčio bangos ilgio impedanso derinimo grandyno skaičiavimo metodiką aprašytą (2.3 poskyryje) buvo apskaičiuoti mikrojuostelinių linijų parametrai. Galiausiai abu lygintuvai su suderinimo grandynu buvo pagaminti ir atlikta jų analizė. Įdomu pažiūrėti į lygintuvo su ir be suderinimo grandyno impedanso priklausomybę nuo dažnio Smito diagramoje 40 pav. Kaip



40 pav. Smito diagrama, įtampos lygintuvas su ir be impedanso derinimo grandyno

matome, lygintuvo be suderinimo impedansas ties 2,44 GHz yra nutolęs nuo 50 Ω taško, tačiau po suderinimo jis atsiduria būtent ten.

Norint palyginti šių dviejų lygintuvų topologijų efektyvumą prie skirtingos įėjimo galios, buvo išmatuotas įtampos lygintuvo efektyvumas, kuris skaičiuojamas pagal formulę:

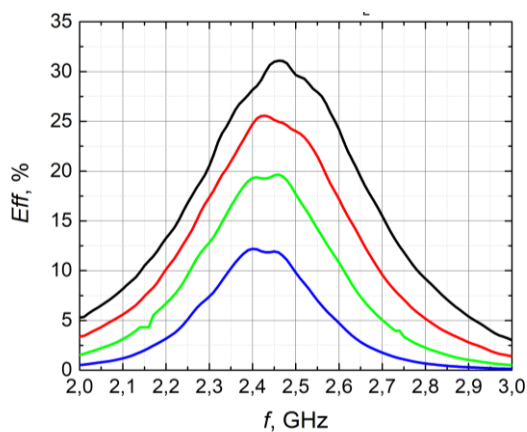
$$Eff = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

čia P_{OUT} - galia išėjime, o P_{IN} - galia įėjime. Galią išėjime galime suskaičiuoti pasinaudodami Omo dėsnium:

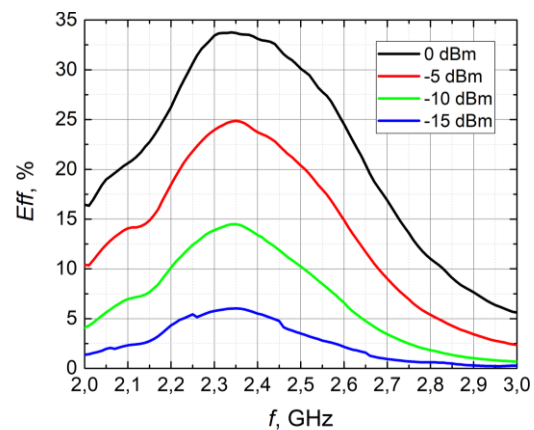
$$P_{OUT} = \frac{U_{OUT}^2}{R_L}, \quad (10)$$

kur U_{OUT} - išėjimo įtampa, o R_L apkrovos varža.

Tad pirmiausia buvo išmatuotos abiejų lygintuvų išėjimo įtampos naudojant skirtingo dydžio apkrovas ir apskaičiuotas efektyvumas naudojant (9) ir (10) išraiškas. Pirmo lygintuvo didžiausias efektyvumas pasiektas, kai apkrovos varža yra 910 Ω, o antro, kai apkrovos varža yra 3 kΩ. Naudojant 910 Ω varžą kaip apkrovą buvo išmatuota abiejų lygintuvų išėjimo įtampa, kai įėjimo galia -15 dBm, -10 dBm, -5 dBm ir 0 dBm ir apskaičiuotas efektyvumas. Iš grafikų pateiktų 41 pav., 42 pav. matome, kad pilnos bangos lygintuvas veikia efektyviau nei pusės bangos lygintuvas, kai įėjimo galia didelė (0 dBm). Tačiau, kai įėjimo galia lygi -15 dBm pusės bangos lygintuvas veikia daug efektyviau. Šio tyrimo rezultatai buvo pristatyti stendiniame pranešime tarptautinėje „OpenReadings 2022“ konferencijoje [31].



41 pav. Pusės bangos lygintuvo efektyvumas prie skirtingo galingumo, kai apkrova yra 910 Ω

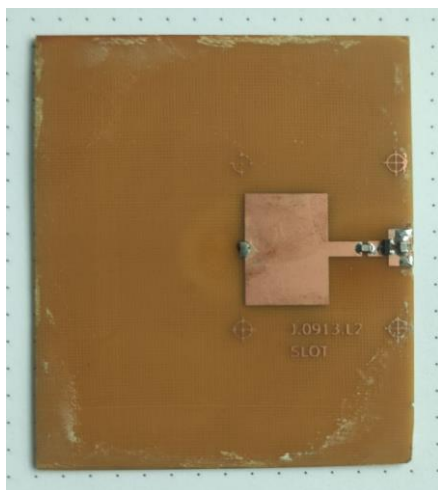


42 pav. Pilnos bangos lygintuvo efektyvumas prie skirtingo galingumo, kai apkrova yra 910 Ω

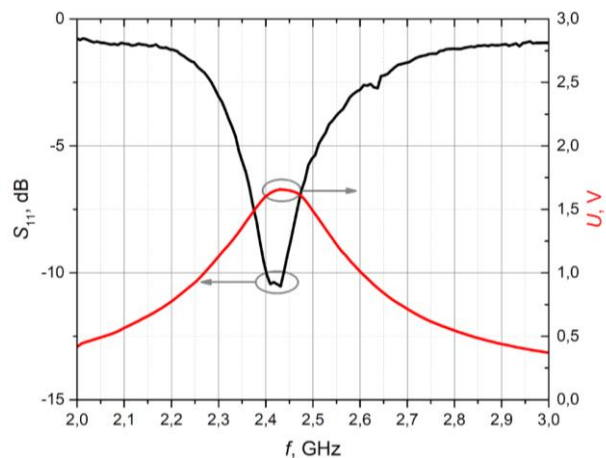
3.7 Antenos ir įtampos lygintuvo integracija ant vieno padėklo

Svarstant apie energorinkio sistemos dalių integravimą buvo siekiama išsiaiškinti ar naudojamos SMA jungtys gali sukelti pastebimus surenkamos galios nuostolius. Pasirinktos plyšinės antenos apatinė plokštė veikia kaip reflektorius, tačiau kitoje pusėje esantis plotas yra neišnaudotas. Todėl buvo nuspręsta pagaminti plyšinės antenos apatinę plokštę su įtampos lygintuvu kitoje pusėje. Jos vaizdas pateiktas 43 pav. Lygintuvas ir Chebishevo impedanso derinimo grandynas su linija ant plokštės buvo pagamintas taip, kad įtampos maksimumas būtų ties 2,45 GHz, nes maždaug toks yra plyšinės antenos centrinis veikimo dažnis. Lygintuvo atspindžio charakteristika ir dažninė įtampos priklausomybė pavaizduota 44 pav.

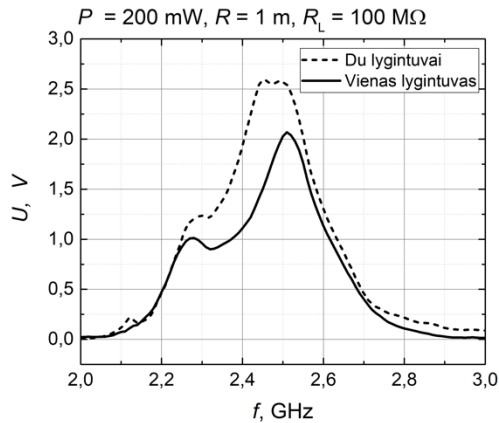
Įvertinus išmatuotas lygintuvo charakteristikas, buvo nutarta jį panaudoti kuriamoje RBRS. Norėdami išsiaiškinti ar SMA jungtys įneša nuostolius atlikome du matavimus. Pirmasis atliktas su plyšine antena, kurios žemės plokštėje įmontuota SMA jungtis ir lygintuvas yra prijungiamas per kitą SMA jungtį. Antrasis, kai lygintuvas yra integruotas į plyšinės antenos žemės plokštę. Matavimo metu antena su lygintuvu buvo pastatyti 1 m atstumu nuo rutorinės antenos, kuri prijungta prie 200 mW šaltinio. Lygintuvo išėjimo įtampa matuojama multimetru.



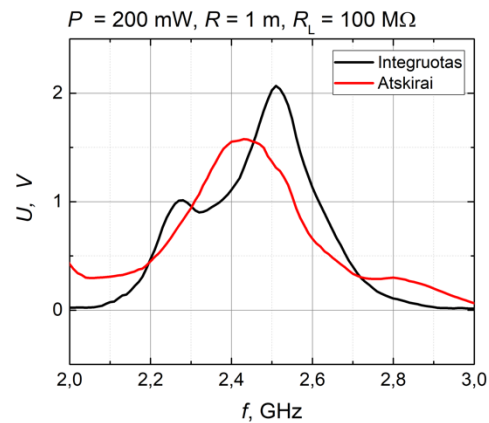
43 pav. Pilnos bangos įtampos lygintuvas ant plyšinės antenos apatinės plokštės



44 pav. Išmatuotos integruoto įtampos lygintuvo atspindžio bei išėjimo įtampos (prie 0 dBm galios) dažninės charakteristikos



45 pav. Palyginimas tarp atskirai prijungto lygintuvo ir integruoto į anteną lygintuvo išėjimo įtampos



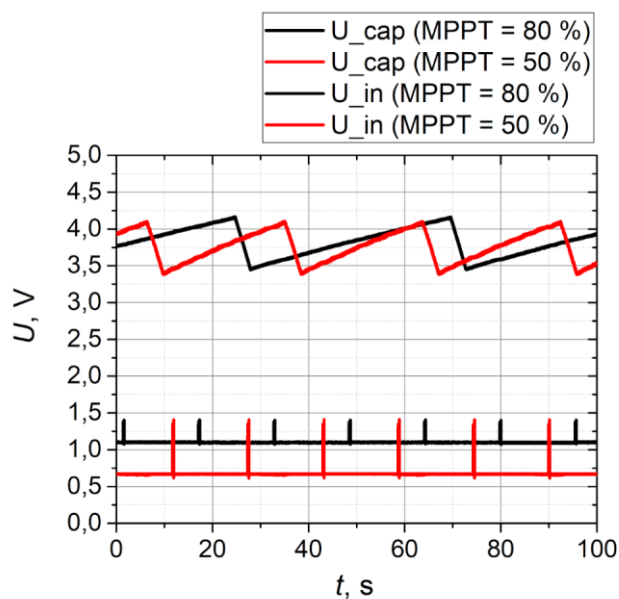
46 pav. Palyginimas tarp vienos plyšinės antenos su integruotu įtampos lygintuvu ir dviejų antenų išėjimo įtampos

Matavimo rezultatai pavaizduoti 45 pav. Matome nežymų dažnio poslinkį, galimai dėl nevienodo atstumo tarp viršutinės ir apatinės plyšinės antenos plokščių arba lygintuvo plokštės įtakos antenai pirmojo matavimo metu. Pagrindinis rezultatas, tai įtampos maksimumas. Matyti, kad integruvus lygintuvą į anteną buvo gautas 0,5 V įtampos prieaugis. Be to antenos ir lygintuvo aukščio matmenys buvo sumažinti nuo 3 cm iki 2 cm (įskaitant SMA jungtį).

Norint padidinti surenkamą mikrobangų galią buvo nuspręsta pagaminti dar vieną identišką anteną su integruotu lygintuvu ir atlikti tokį patį eksperimentą, kai du lygintuvai yra sujungti nuosekliai. Matavimo rezultatai pavaizduoti 46 pav. Matome, kad sujungus du lygintuvus negauname dvigubai daugiau įtampos. Esant vienam įtampos maksimumas - 2,1 V, esant dviem - 2,6 V. Viena iš priežasčių gali būti ta, kad antenos yra paslinktos į šoną nuo centrinės ruponinės antenos spinduliavimo padėties, o kita – gali būti susijusi su impedanso suderinimu.

3.8 Energijos kaupimo sistemos optimizavimas

Nėra tiksliai aišku, kokį MPPT lygį (žr. poskyrius 1.5 ir 2.5) mūsų atveju reikia parinkti, kad energija tarp įtampos lygintuvo ir kaupimo modelio būtų perduodama efektyviausiai. Tam buvo atlikti du matavimai: vienu atveju MPPT lygis buvo nustatytas 50%, o kitu 80%. Įtampos lygintuvas buvo prijungtas tiesiai prie radijo signalų generatoriaus, o energijos kaupimo modulis prijungtas lygintuvo išėjime. Kaip apkrova prie energijos kaupimo modulio išėjimo buvo prijungta varža. Naudojant PicoScope osciloskopą buvo matuojamas įtampos kitimas ant

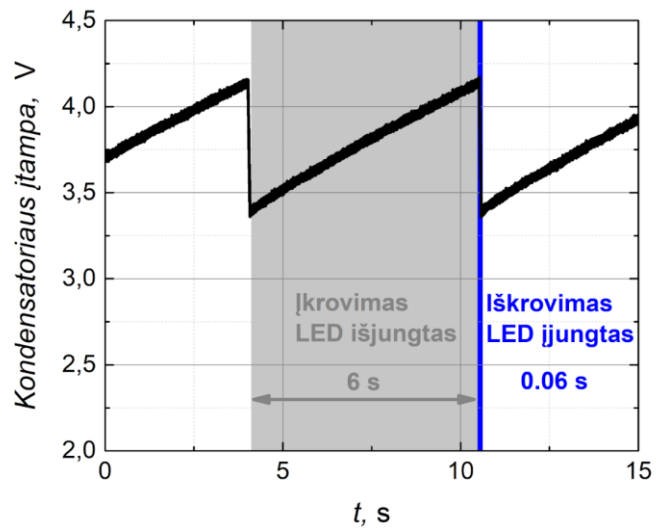


47 pav. Energijos kaupimo modulio tyrimas, geriausio MPPT ieškojimas

kondensatoriaus kontaktų ir įėjimo įtampa. (47 pav.). Juoda kreivė pažymėta įėjimo ir kondensatoriaus įtampa, kai MPPT yra 80%, o raudona, kai MPPT yra 50%. Akivaizdu, kad esant MPPT 50% kondensatorius įkraunamas greičiau, nors įėjimo įtampa yra mažesnė.

3.9 Radijo bangų energijos kaupimo sistemos matavimai

Paskutiniam šio darbo eksperimentui buvo surinkta pilna radijo bangų energijos kaupimo sistema. Ji susideda iš dviejų plyšinių antenų su žemės plokštėje integruotais pilnos bangos įtampos lygintuvais, kurie sujungti nuosekliai, energijos valdymo modulio su 2200 μF talpos kondensatoriumi ir apkrova (LED šviestukas su 400 Ω varža). Radijo bangų šaltinis buvo ruporinė antena prijungta prie 200 mW mikrobangų šaltinio. Energijos kaupimo sistema buvo pastatyta už 1 m nuo transliuojančios antenos. Naudojant PicoScope osciloskopą, buvo išmatuota kondensatoriaus įsikrovimo ir išsikrovimo įtampos priklausomybė nuo laiko (48 pav.). Matome, kad kondensatoriaus įsikrovimo laikas yra 6 s. Pasiekus 4,1 V ribą kondensatoriuje sukaupta energija išnaudojama apkrovai maitinti – LED diodas šviečia 0,06 s. Švietimo trukmė yra pakankamai trumpa, nes diodas naudoja daug energijos, o paprastai tokios energijos kaupimo sistemoms naudojamos mažos energijos prietaisams maitinti, pavyzdžiui, skaitmeninis laikrodis, temperatūros ar slėgio jutiklis. Apkrovos maitinimo laikas gali būti padidintas, jei vietoje 2200 μF talpos kondensatoriaus būtų naudojamas didesnės (0,5-1 F) talpos kondensatorius arba superjoninis kondensatorius. Taip pat įmanoma naudoti LiPo tipo baterijas, tačiau tuomet įkrovimo laikas galimai išaugtų iki parų ar savaičių, daug jos būtų



48 pav. RBRS tyrimas, kondensatoriaus įtampa laike

iššvaistyta dėl nuotėkio srovių. Šio tyrimo rezultatai buvo pristatyti stendiniame pranešime tarptautinėje „OpenReadings 2023“ konferencijoje [32].

Rezultatai ir išvados

1. Naudojant CST programinį paketą buvo sumodeliuotos dvi potencialiai energorinkio sistemai tinkančios antenos: plyšinė ir Yagi-Uda. Geriausiai parametrais pasižyminčios antenos buvo pagamintos ir eksperimentiškai ištirtos.
2. Modeliavimo metu atlikus plyšinės antenos atspindžio analizę buvo nustatyta, kad antenos veikimo dažniui didžiausią įtaką turi plyšinės antenos ilgis, o atspindžio koeficientui – plyšio parametrai, žadinimo vieta ir atstumas iki žemės sluoksnio. Žadinimo vieta įtakoja atspindžio koeficientą, nes tolstant nuo antenos krašto mažėja plyšinės antenos varža.
3. Naudojant Advanced Design Systems (ADS) programinį paketą buvo sumodeliuoti du potencialiai energorinkio sistemai tinkantys impedanso derinimo grandynai: Chebishevo transformatorius su linija ir Chebishevo transformatorius su šuntu. Atlikus matavimus nustatyta, kad impedanso derinimui naudojant grandyną su linija pilnos bangos lygintuvas prie 0 dBm galios generavo didesnę įtampą 2,22 V, nei naudojant grandyną su šuntu 1,88 V.
4. Palyginus pusės bangos ir pilnos bangos įtampos lygintuvų efektyvumą nustatyta, kad pusės bangos lygintuvas veikia efektyviau, kai įėjimo galia yra maža (<15 dbm), o pilnos bangos lygintuvas efektyvesnis, kai įėjimo galia yra didesnė (<0 dBm). Taip atsitinka todėl, nes naudojant du diodus grandinės nuostoliai mažų galių srityje išauga.
5. Darbo metu buvo pagamintas pilnos bangos įtampos lygintuvas su impedanso derinimo grandynu ant plyšinės antenos žemės plokštės. Palyginus integruotą į antenos plokštę lygintuvą, su lygintuvu prijungiamu prie antenos panaudojus SMA jungtis buvo gautas 0,5 V įtampos prieaugis, nes sumažėjo nuostoliai dėl papildomos jungties.
6. Naudojant KiCAD programinę įrangą buvo sukurta spausdintinė plokštė energijos kaupimo moduliui. Plokštė buvo pagaminta ir atliktas MPPT tyrimas, kurio metu išsiaiškinta, kad iš įtampos lygintuvo paimama didesnė energija, kai MPPT yra 50%.
7. Buvo atliktas pilnas radijo bangų energijos kaupimo sistemos tyrimas: dvi plyšinės antenos su žemės plokštėje integruotais pilnos bangos įtampos lygintuvais, kurie sujungti nuosekliai, energijos valdymo modulis su 2200 μ F talpos kondensatoriumi ir apkrova (LED šviestukas su 400 Ω varža). Buvo išmatuota, kad kondensatorius įkraunamas per 6 s, o apkrova maitinama 0,06 s.

RESEARCH ON SYSTEMS HARVESTING ENERGY FROM WIRELESS WIFI NETWORKS

Justina Žemgulytė

Master thesis

Electronics and telecommunication engineering programme

Vilnius University, Faculty of Physics

Supervisor – dr. Paulius Ragulis

Vilnius, 2023

Summary

44 pages, 48 pictures, 4 tables, 32 references.

The main purpose of this work is to accumulate knowledge on radio frequency energy harvester system components and, using that knowledge, design, manufacture, and investigate a radio frequency energy harvesting system that can harvest radio wave energy at WiFi 2.4 GHz frequency.

The work is divided into the following sections: scientific literature analysis, system component analysis, and measurements. Literature analysis reveals the feasibility of harvesting energy from different radio sources, using different types of antennas, low power voltage rectifier topologies, and diodes used in them. The importance of different impedance matching network topologies, and energy storage system functions is also disclosed. After literature analysis, two chosen antennas and voltage rectifiers are simulated and analysed using CST and ADS software. Finally, in third section, system components manufacturing, and measurement results are presented.

The main result of this study is that manufactured radio frequency energy harvesting system could periodically power an LED diode when collecting energy from a 200 mW source 1 m away. Also it is discovered that a one-diode voltage rectifier is more efficient in AC/DC conversion when input power is low (<-15 dBm).

Indoor radio energy harvesting systems such as this someday will replace batteries in low-power electronic devices and sensors, reducing environmental pollution associated with battery manufacturing.

Literatūra

- [1] K. K. Selim, S. Wu, and D. A. Saleeb, "An Optimized Rectifier Design for RF Energy Harvesting at the 2.45 GHz WiFi Frequency Band," in *2020 27th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Bali, Indonesia: IEEE, Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICT49546.2020.9239433.
- [2] I. D. Bougas, M. S. Papadopoulou, A. D. Boursianis, K. Kokkinidis, and S. K. Goudos, "State-of-the-Art Techniques in RF Energy Harvesting Circuits," *Telecom*, vol. 2, no. 4, pp. 369–389, Oct. 2021, doi: 10.3390/telecom2040022.
- [3] R. Mishra *et al.*, "Compact High Gain Multiband Antenna Based on Split Ring Resonator and Inverted F Slots for 5G Industry Applications," *Appl. Comput. Electromagn. Soc.*, vol. 36, no. 8, pp. 999–1007, 2021, doi: 10.47037/2021.ACES.J.360808.
- [4] L. Liu, W. Yuan, J. Mu, Z. Zhu, and Y. Yang, "A Dual Band RF Energy Harvester with Hybrid Threshold Voltage Self-Compensation," *J. Circuits Syst. Comput.*, vol. 25, no. 06, p. 1650055, Jun. 2016, doi: 10.1142/S0218126616500559.
- [5] W. Mrozik, M. A. Rajaeifar, O. Heidrich, and P. Christensen, "Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries," *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 12, pp. 6099–6121, 2021, doi: 10.1039/D1EE00691F.
- [6] H. D. Do, D. E. Kim, M. B. Lam, and W. Y. Chung, "Self-Powered Food Assessment System Using LSTM Network and 915 MHz RF Energy Harvesting," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 97444–97456, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3095271.
- [7] R. Berges, L. Fadel, L. Oyhenart, V. Vigneras, and T. Taris, "Conformable dual-band wireless energy harvester dedicated to the urban environment," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, no. 11, pp. 3391–3400, Nov. 2020, doi: 10.1002/mop.32461.
- [8] Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, "DĖL LIETUVOS HIGIENOS NORMOS HN 80:2011 „ELEKTROMAGNETINIS LAUKAS DARBO VIETOSE IR GYVENAMOJOJE APLINKOJE. PARAMETRŲ NORMUOJAMOS VERTĖS IR MATAVIMO REIKALAVIMAI 10 KHZ–300 GHZ RADIO DAŽNIŲ JUOSTOJE“ PATVIRTINIMO." 02 2011. [Online]. Available: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.393801?jfwid=32wf948v>
- [9] H. J. Visser, A. C. F. Reniers, and J. A. C. Theeuwes, "Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements," in *2008 38th European Microwave Conference*, Amsterdam, Netherlands: IEEE, Oct. 2008, pp. 721–724. doi: 10.1109/EUMC.2008.4751554.
- [10] V. H. Tran, A. Misra, J. Xiong, and R. K. Balan, "WiWear: Wearable Sensing via Directional WiFi Energy Harvesting," in *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, Kyoto, Japan: IEEE, Mar. 2019, pp. 1–10. doi: 10.1109/PERCOM.2019.8767406.
- [11] A. Bakytbekov, T. Q. Nguyen, G. Zhang, M. S. Strano, K. N. Salama, and A. Shamim, "Synergistic multi-source ambient RF and thermal energy harvester for green IoT applications," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 1875–1885, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.01.027.
- [12] T. Peter, T. A. Rahman, S. W. Cheung, R. Nilavalan, H. F. Abutarboush, and A. Vilches, "A Novel Transparent UWB Antenna for Photovoltaic Solar Panel Integration and RF Energy Harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 4, pp. 1844–1853, Apr. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2298044.

- [13] A. Mavaddat, S. H. M. Armaki, and A. R. Erfanian, "Millimeter-Wave Energy Harvesting Using 4×4 Microstrip Patch Antenna Array," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 515–518, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2370103.
- [14] W. C. Mok, S. H. Wong, K. M. Luk, and K. F. Lee, "Single-Layer Single-Patch Dual-Band and Triple-Band Patch Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 8, pp. 4341–4344, Aug. 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2260516.
- [15] Z. Chen and Z. Shen, "Planar helical antenna of circular polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4315–4323, 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2463746.
- [16] M. A. Ashraf, K. Jamil, A. Telba, M. A. Alzabidi, and A. R. Sebak, "Design and Development of a Wideband Planar Yagi Antenna Using Tightly Coupled Directive Element," *Micromachines*, vol. 11, no. 11, p. 975, Oct. 2020, doi: 10.3390/mi11110975.
- [17] A. Alex-Amor *et al.*, "RF energy harvesting system based on an archimedean spiral antenna for low-power sensor applications," *Sens. Switz.*, vol. 19, no. 6, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/s19061318.
- [18] H. S. Khaliq, M. Awais, W. Ahmad, and W. T. Khan, "A high gain six band frequency independent dual CP planar log periodic Antenna for ambient rf energy harvesting," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, vol. 2017-Novem, no. November, pp. 3024–3028, 2017, doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293652.
- [19] K. Çelik and E. Kurt, "Design and simulation of the antenna for RF energy harvesting systems," *Proc. - 2018 6th Int. Istanbul Smart Grids Cities Congr. Fair ICSG 2018*, pp. 148–150, 2018, doi: 10.1109/SGCF.2018.8408961.
- [20] X. V. L. Nguyen *et al.*, "Radio-Frequency Energy Harvesting Using Rapid 3D Plastronics Prototyping Approach: A Case Study," *J. Low Power Electron. Appl.*, vol. 13, no. 1, p. 19, Feb. 2023, doi: 10.3390/jlpea13010019.
- [21] A. Mouapi, N. Hakem, and N. Kandil, "A Performance Analysis of Schottky Diode to support RF Energy Harvesting," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA: IEEE, Jul. 2019, pp. 1169–1170. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888832.
- [22] M. Cansiz, D. Altinel, and G. K. Kurt, "Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review," *Energy*, vol. 174, pp. 292–309, May 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.100.
- [23] A. Saxena, D. Banerjee, M. Hashmi, and M. Auyenur, "A Dual-Band Impedance Transformer for Matching Frequency Dependent Complex Source and Load Impedances," in *2019 15th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, Lausanne, Switzerland: IEEE, Jul. 2019, pp. 173–176. doi: 10.1109/PRIME.2019.8787788.
- [24] A. Saxena, D. Banerjee, R. Gupta, and M. Hashmi, "Design of π -Structure Dual-Band Matching Network With Unequal Susceptance Cancellation Stubs," in *2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, Kolkata, India: IEEE, Nov. 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/IMaRC.2018.8877187.
- [25] S. J. Orfanidis, "A two-section dual-band Chebyshev impedance transformer," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 382–384, Sep. 2003, doi: 10.1109/LMWC.2003.817135.
- [26] S. J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves and Antennas".
- [27] C. Song *et al.*, "Matching Network Elimination in Broadband Rectennas for High-Efficiency Wireless Power Transfer and Energy Harvesting," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 5, pp. 3950–3961, May 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2645505.
- [28] G. C. Martins and W. A. Serdijn, "An RF Energy Harvester with MPPT Operating Across a Wide Range of Available Input Power," in *2018 IEEE International*

Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence: IEEE, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351011.

- [29] Texas Instruments, “bq25570 nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications.”
- [30] M. P. David, *Microwave Engineering*, 4th ed. 2012.
- [31] J. Žemgulytė *et al.*, “INDOOR RADIO FREQUENCY ENERGY HARVESTING.”
- [32] J. Žemgulytė *et al.*, “RADIO FREQUENCY ENERGY HARVESTER.”