



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Giedrė Šimkūnaitė

**GPS SEKIKLIO, NAUDOJANT SSAIL TECHNOLOGIJĄ, KŪRIMAS IR
TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND REASERCH OF A GPS TRACKER USING
SSAIL TECHNOLOGY**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

VILNIUS 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Giedrė Šimkūnaitė

**GPS SEKIKLIO, NAUDOJANT SSAIL TECHNOLOGIJĄ, KŪRIMAS IR
TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A GPS TRACKER USING
SSAIL TECHNOLOGY**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____prof. dr. Vaidotas Barzdėnas_____
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

Konsultantas _____
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Elektronikos inžinerija

Studijų programa: Elektronikos inžinerija , valstybinis kodas 6211EX050

Specializacija: Pažangiosios elektronikos projektavimas

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Vaidotas Barzdėnas

2025-06-02

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. PEPfm-23-10678

Vilnius

Studentas (-ė): Giedrė Šimkūnaitė

Baigiamojo darbo tema: GPS sekiklio, naudojant SSAIL technologiją, kūrimas ir tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo tikslas: Sukurti ir ištirti GPS sekiklį bei jo atskirus komponentus, pagamintus ant skirtingų dielektrikų naudojant SSAIL technologiją, siekiant įvertinti šios technologijos tikslumą, kuriant planarines antenas ir analizuojant dielektrikų savybes aukštuose dažniuose.

Baigiamojo darbo užduotis:

1. Atlikti pasirinktų dielektrikų parametrų stabilumo matavimus aukštuose dažniuose.
2. Sukurti iš ištirti GPS L1 dažnio planarines antenas ant skirtingų dielektrikų.
3. Sukurti GPS sekiklį ant skirtingų dielektrikų ir esant galimybei jį ištirti.

Aiškinamojo rašto turinys:

Įvadas

Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo uždaviniai

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo naujumas ir praktinė nauda

1. SSAIL technologijos ir jos pagrindu kuriamų elektronikos komponentų, dielektrinių medžiagų bei pagrindinių GPS sekiklio parametrų literatūros apžvalga;
2. GPS L1 planarinių antenų, naudojant SSAIL technologiją, kūrimas ir tyrimas;
3. GPS sekiklio kūrimas.

Apibendrinimas

Išvados

Literatūra

Priedai

Vadovas profesorius Vaidotas Barzdėnas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas	ISBN	ISSN
Elektronikos fakultetas	Egz. sk.	
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra	Data-.....-.....	

Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	GPS sekiklio, naudojant SSAIL technologiją, kūrimas ir tyrimas
Autorius	Giedrė Šimkūnaitė
Vadovas	Vaidotas Barzdėnas

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija
Šiame darbe kuriamas ir tiriamas GPS sekiklis, pagamintas taikant selektyvaus paviršiaus aktyvavimo, naudojant lazerį (SSAIL) technologiją. SSAIL technologija suteikia galimybę gaminti elektrines grandines ant įvairaus tipo dielektrikų ir leidžia elektrines grandines gaminti tiesiogiai ant įrenginio korpuso. Darbą sudaro 3 pagrindinės dalys: pasirinktų dielektrikų, esant aukštiems dažniams, parametrų stabilumo tyrimas, GPS L1 dažnio planariųjų antenų ir GPS sekiklio kūrimas ir tyrimas, naudojant SSAIL technologiją. Ištirtas PTFE ir PEEK medžiagų, esant aukštiems dažniams, parametrų stabilumas, sukurti ir ištirti GPS sekiklis ir GPS L1 dažnio antenos, pagaminti ant PTFE ir PEEK dielektrikų, bei atliktas gautų rezultatų apibendrinimas. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas; SSAIL technologijos, dielektrinių medžiagų bei pagrindinių GPS sekiklio parametrų apžvalga; GPS L1 planariųjų antenų, naudojant SSAIL technologiją, kūrimas ir tyrimas; GPS sekiklio kūrimas; išvados; literatūros sąrašas; priedai. Darbo apimtis - 122 p. teksto be priedų, 108 iliustracijos, 21 lentelės, 54 literatūros šaltiniai, 9 priedai.

Prasminiai žodžiai: ADS Keysight, Altium Designer, planarioji antena, aukštadažnis grandynas, dielektrikas, GPS L1, impedansas, lazerinis apdirbimas, TDR, S11 parametras, sekiklis, spausdintinė plokštė, SSAIL.
--

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Electronics</td></tr> <tr><td>Department of Computer Science and Communications Technologies</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Electronics	Department of Computer Science and Communications Technologies	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Copies No.</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Date-.....-.....</td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Electronics																			
Department of Computer Science and Communications Technologies																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Development and Research of a GPS Tracker Using SSAIL Technology</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Giedrė Šimkūnaitė</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Vaidotas Barzdėnas</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Development and Research of a GPS Tracker Using SSAIL Technology			Author	Giedrė Šimkūnaitė			Academic supervisor	Vaidotas Barzdėnas		
Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Development and Research of a GPS Tracker Using SSAIL Technology																		
Author	Giedrė Šimkūnaitė																		
Academic supervisor	Vaidotas Barzdėnas																		
		<table border="1"> <tr> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>		Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td> Annotation The Master's thesis presents research and development of a GPS tracker using Selective Surface Activation Induced by Laser (SSAIL) technology. The thesis contains 3 main parts: research of the stability of chosen dielectrics at high frequencies, research and development of GPS tracker and GPS L1 patch antennas using SSAIL technology. The research of the stability of PTFE and PEEK substrates at high frequencies was performed. GPS tracker and GPS L1 antennas were developed and fabricated on PTFE and PEEK and results were summarized. The thesis consists of 7 parts: an introduction; a review of SSAIL technology, dielectric materials and main parameters of the GPS tracker; a development and research of GPS L1 planar antennas using SSAIL technology; a development of the GPS tracker; conclusions; references; appendices. The scope of thesis - 122 p. of text excluding appendices, 108 illustrations, 21 tables, 54 references, 9 appendices. </td> </tr> </table>				Annotation The Master's thesis presents research and development of a GPS tracker using Selective Surface Activation Induced by Laser (SSAIL) technology. The thesis contains 3 main parts: research of the stability of chosen dielectrics at high frequencies, research and development of GPS tracker and GPS L1 patch antennas using SSAIL technology. The research of the stability of PTFE and PEEK substrates at high frequencies was performed. GPS tracker and GPS L1 antennas were developed and fabricated on PTFE and PEEK and results were summarized. The thesis consists of 7 parts: an introduction; a review of SSAIL technology, dielectric materials and main parameters of the GPS tracker; a development and research of GPS L1 planar antennas using SSAIL technology; a development of the GPS tracker; conclusions; references; appendices. The scope of thesis - 122 p. of text excluding appendices, 108 illustrations, 21 tables, 54 references, 9 appendices.															
Annotation The Master's thesis presents research and development of a GPS tracker using Selective Surface Activation Induced by Laser (SSAIL) technology. The thesis contains 3 main parts: research of the stability of chosen dielectrics at high frequencies, research and development of GPS tracker and GPS L1 patch antennas using SSAIL technology. The research of the stability of PTFE and PEEK substrates at high frequencies was performed. GPS tracker and GPS L1 antennas were developed and fabricated on PTFE and PEEK and results were summarized. The thesis consists of 7 parts: an introduction; a review of SSAIL technology, dielectric materials and main parameters of the GPS tracker; a development and research of GPS L1 planar antennas using SSAIL technology; a development of the GPS tracker; conclusions; references; appendices. The scope of thesis - 122 p. of text excluding appendices, 108 illustrations, 21 tables, 54 references, 9 appendices.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: ADS Keysight, Altium Designer, planar antenna, high-frequency circuit, dielectric, GPS L1, impedance, laser processing, TDR, S11 parameter, tracker, printed circuit board, SSAIL. </td> </tr> </table>				Keywords: ADS Keysight, Altium Designer, planar antenna, high-frequency circuit, dielectric, GPS L1, impedance, laser processing, TDR, S11 parameter, tracker, printed circuit board, SSAIL.															
Keywords: ADS Keysight, Altium Designer, planar antenna, high-frequency circuit, dielectric, GPS L1, impedance, laser processing, TDR, S11 parameter, tracker, printed circuit board, SSAIL.																			

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Giedrė Šimkūnaitė, 20185377

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, PEPfm-23

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2025 m. birželio 02 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „GPS sekiklio, naudojant SSAIL technologiją, kūrimas ir tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius daktaras Vaidotas Barzdėnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Giedrė Šimkūnaitė

(Vardas ir pavardė)

PADĖKA

Norėčiau padėkoti Karoliui Ratautui, Modestui Sadauskui ir Evaldui Kvietkauskui iš Lietuvos fizinių ir technologijos mokslų centro bei Artūrai Greičiui ir Tadiui Kildušiui iš įmonės AKONEER už konsultaciją lazerinių technologijų taikymo ir SSAIL technologijos įgyvendinimo klausimais. Bei suteikta galimybe pagaminti visus GPS sekiklio tyrimui ir kūrimui skirtus komponentus, naudojant SSAIL technologiją. Taip pat, Tadiui Kiaunei iš VilniusTech universiteto už pagalbą atliekant matavimus VilniusTech universiteto laboratorijoje bei Dariui Kančiui iš įmonės Elmereka už suteiktą įrangą ir konsultaciją GPS sekiklio litavimo klausimais.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	11
SANTRUMPOS	15
IVADAS.....	17
1. SSAIL TECHNOLOGIJOS IR JOS PAGRINDU KURIAMŲ ELEKTRONIKOS KOMPONENTŲ, DIELEKTRINIŲ MEDŽIAGŲ BEI PAGRINDINIŲ GPS SEKIKLIO PARAMETRŲ LITERATŪROS APŽVALGA.....	19
1.1. MID suformuoti jungiamieji įrenginiai	19
1.2. Skirtingų dielektrikų analizė.....	26
1.3. GPS komunikacijoje naudojami dažnių ruožai ir kodai	29
1.4. Pasirinktų GPS sekiklių analizė ir palyginimas.....	32
2. GPS L1 PLANARINIŲ ANTENŲ, NAUDOJANT SSAIL TECHNOLOGIJĄ, KŪRIMAS IR TYRIMAS	36
2.1. Stačiakampių planariųjų antenų parametrų skaičiavimai	38
2.2. Antenų modeliavimas	43
2.2.1. PA 2200 GPS L1 antenos modeliavimas.....	44
2.2.2. PTFE GPS L1 antenos modeliavimas	59
2.2.3. PEEK GPS L1 antenos modeliavimas.....	64
2.2.4. Apibendrinimas	69
2.3. Medžiagų elektrinių savybių tyrimas	69
2.3.1. Elektrodo impedanso matavimai	77
2.3.2. Elektrodo impedanso modeliavimas.....	81
2.3.3. Elektrodo matavimų ir modeliavimų rezultatų apibendrinimas	85
2.3.4. PTFE ir PEEK 50 Ω mikrojuostelinių linijų TDR modeliavimas	86
2.3.5. Antenų optimizavimas.....	88
2.4. SSAIL technologija sukurtų antenų testavimas.....	93
2.4.1. Antenų matavimai	94
2.4.2. Apibendrinimas	99
3. GPS SEKIKLIO KŪRIMAS	101
3.1. GPS sekiklio ir papildomų plokščių schemų kūrimas	103
3.2. Pagamintos GPA sekiklio ir papildomos schemos	108
3.3. Apibendrinimas	113
IŠVADOS	114

LITERATŪRA	118
PRIEDAI	123

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Plastikų klasių savybės (<i>Quadrant Engineering ...</i> , 2025).	28
1.2 lentelė. GPS signalų dažnių ruožai bei centriniai dažniai (Badran, 2022) (<i>Navigating the L1, L2 ...</i> , 2024).	30
1.3 lentelė. GALILEO GNSS signalų dažnių ruožai bei centriniai dažniai (Badran, 2022) (<i>Navigating the L1, L2 ...</i> , 2024).	31
1.4 lentelė. Šiuolaikinių GPS imtuvų priimami signalai (Badran, 2022) (<i>Navigating the L1, L2 ...</i> , 2024).	32
1.5 lentelė. GPS sekiklių pagrindinių parametrų palyginimas (<i>Tractive</i> , 2025) (<i>Jiobit Smart Tag</i> , 2025) (<i>Eureka Marco Polo ...</i> , 2025) (<i>Weenect XS</i> , 2025) (<i>Cube GPS Tracker</i> , 2025). .	33
2.1 lentelė. Pasirinktų medžiagų elektriniai ir vandens absorbcijos parametrai.	36
2.2 lentelė. Pasirinktų medžiagų šiluminiai parametrai.	37
2.3 lentelė. Pasirinktų medžiagų gamybos tipas ir mechaniniai parametrai bei savybės.	37
2.4 lentelė. JLPCB ir PCBWay gamintojų siūlomi 2 sluoksnių PCB su FR-4 dielektriku (<i>JLPCB</i> , 2025) (<i>PCBWay</i> , 2025).	38
2.5 lentelė. Apskaičiuoti GPS L1 dažnio elektromagnetinės bangos parametrai.	39
2.6 lentelė. Apskaičiuoti stačiakampių antenų, su skirtingais dielektrikais, parametrai.	42
2.7 lentelė. Apskaičiuotas PA 2200 tūrinis šiluminis talpumas.	45
2.8 lentelė. PA 2200 antenos schemos parametrų vertės.	47
2.9 lentelė. Galutiniai PA 2200 antenos matmenys.	59
2.10 lentelė. PTFE antenos schemos parametrų vertės.	60
2.11 lentelė. Galutiniai PTFE antenos matmenys.	64
2.12 lentelė. PEEK antenos schemos parametrų vertės.	65
2.13 lentelė. Galutiniai PEEK antenos matmenys.	69
2.14 lentelė. Galutiniai PTFE ir PEEK antenų matmenys.	90
2.15 lentelė. PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų matmenų atitikmenys TDR grafikų laiko ašyje.	97
3.1 lentelė. GPS sekiklio pagrindinių komponentų sąrašas.	101

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Dviejų etapų liejimo proceso etapai (<i>Two Shot Moulding</i> , 2025).	20
1.2 pav. Tiesioginio lazerinio struktūrizavimo proceso etapai (<i>Laser Direct Structuring</i> , 2025).....	21
1.3 pav. Įvairių terminio metalo purškimo procesų palyginimas pagal dalelių temperatūrą ir greitį (Kuroda et al., 2008).	22
1.4 pav. SSAIL proceso etapai (Ratautas, Vosylius, et al., 2020).	22
1.5 pav. Standartinių PCB gamybos proceso eiga (<i>PCB Manufacturing ...</i> , 2025).....	25
1.6 pav. Plastikų klasifikacija (<i>Quadrant Engineering ...</i> , 2025) (<i>Mitsubishi ...</i> , 2025).	27
1.7 pav. Centriniai dažniai bei dažnių ruožai skirti įvairiems GNSS Įrenginiams (<i>GNSSの理解</i> , 2025).....	29
2.1 pav. Stačiakampė planarioji antena su impedanso suderinamumo iškarpomis (Balanis, 2005).....	40
2.2 pav. Stačiakampės planariosios antenos ekvivalentinė schema (Balanis, 2005).....	40
2.3 pav. Stačiakampės planariosios antenos brėžinys pagal apskaičiuotus parametrus.	43
2.4 pav. PA 2200 medžiagos parametrų aprašymas (<i>ADS Keysight</i>).	44
2.5 pav. PA 2200 antenos schema (<i>ADS Keysight</i>).	45
2.6 pav. PA 2200 antenos schemos parametrų kintamieji (<i>ADS Keysight</i>).	46
2.7 pav. PA 2200 antenos topologija (<i>ADS Keysight</i>).	47
2.8 pav. PA 2200 antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (<i>ADS Keysight</i>).	48
2.9 pav. PA 2200 antenos topologijos modeliuojamas dažnių ruožas (<i>ADS Keysight</i>).....	48
2.10 pav. PA 2200 antenos schemtinis komponentas (<i>ADS Keysight</i>).	49
2.11 pav. PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (<i>ADS Keysight</i>).	49
2.12 pav. PA 2200 antenos schematinio komponento modeliavimo tipo keitimas (<i>ADS Keysight</i>).	49
2.13 pav. Pradiniai PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (<i>ADS Keysight</i>). ..	50
2.14 pav. PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimas [1 ; 6] GHz dažnių ruože (<i>ADS Keysight</i>).	51
2.15 pav. PA 2200 antenos modeliavimo tikslo aprašymas (<i>ADS Keysight</i>).	51
2.16 pav. PA 2200 antenos parametrų optimizavimas (<i>ADS Keysight</i>).	52
2.17 pav. Po optimizavimo atnaujinti PA 2200 antenos parametrai (<i>ADS Keysight</i>).	52
2.18 pav. Optimizuotos PA 2200 antenos S_{11} parametrais (<i>ADS Keysight</i>).	53
2.19 pav. Pakoreguoti PA 2200 antenos matmenys (<i>ADS Keysight</i>).	53

2.20 pav. Pakoreguotas PA 2200 antenos S_{11} parametras (ADS Keysight).	54
2.21 pav. PA 2200 antenos TDR modeliavimas (ADS Keysight).	54
2.22 pav. PA 2200 antenos TDR grafikas (ADS Keysight).	55
2.23 pav. Atnaujinti PA 2200 antenos matmenys (ADS Keysight).	55
2.24 pav. Atnaujintos antenos TDR grafikas (ADS Keysight).	56
2.25 pav. PA 2200 antenos S_{11} modeliavimas po TDR modeliavimo (ADS Keysight).	56
2.26 pav. Galutiniai pakoreguoti PA 2200 antenos parametrai (ADS Keysight).	57
2.27 pav. Vientisos PA 2200 antenos topologija (ADS Keysight).	57
2.28 pav. Vientisos PA 2200 antenos schematinis modelis (ADS Keysight).	58
2.29 pav. Galutiniai PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	58
2.30 pav. Galutiniai PA 2200 antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	58
2.31 pav. PTFE medžiagos parametrų aprašymas (ADS Keysight).	59
2.32 pav. PTFE antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (ADS Keysight).	60
2.33 pav. PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).	61
2.34 pav. Pradiniai PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	61
2.35 pav. Galutiniai pakoreguoti PTFE antenos parametrai (ADS Keysight).	62
2.36 pav. PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).	62
2.37 pav. Galutiniai PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	63
2.38 pav. Galutiniai PTFE antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	63
2.39 pav. PEEK medžiagos parametrų aprašymas (ADS Keysight).	64
2.40 pav. PEEK antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (ADS Keysight).	65
2.41 pav. PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).	66
2.42 pav. Pradiniai PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	66
2.43 pav. Galutiniai pakoreguoti PEEK antenos parametrai (ADS Keysight).	67
2.44 pav. PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).	67
2.45 pav. Galutiniai PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	68
2.46 pav. Galutiniai PEEK antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).	68
2.47 pav. PA 2200 (kairė), PA 2200 su juoda danga (vidurys) ir PTFE (dešinė).	71

2.48 pav. Pasirinktų geometrinių figūrų kūrimas naudojant SSAIL ant PA 2200 su juoda danga (kairė) ir PTFE (dešinė).	71
2.49 pav. PA 2200 su juoda danga ir PTFE plokščių pusės nemodifikuotos lazeriu.	72
2.50 pav. PTFE apdirbtas su pakeistais lazerinio apdirbimo parametrais: nefrezuota pusė (kairė), frezuota pusė (dešinė).	73
2.51 pav. Elektrodo viršutinis sluoksnis (kairė) ir apatinis sluoksnis (kairė).	74
2.52 pav. Ant PTFE medžiagos pagaminti elektrodai (1).	75
2.53 pav. Ant PTFE medžiagos pagaminti elektrodai (2).	75
2.54 pav. Ant PEEK medžiagos pagaminti elektrodai.	76
2.55 pav. Nepavykę PEEK elektrodai.	77
2.56 pav. Etaloninės 50 Ω mikrojuostelinės linijos TDR matavimas.	78
2.57 pav. PEEK ir PTFE elektrodų TDR matavimas.	78
2.58 pav. Etaloninės 50 Ω mikrojuostelinės linijos TDR.	79
2.59 pav. PTFE elektrodų TDR matavimai.	80
2.60 pav. PEEK elektrodų TDR matavimai.	81
2.61 pav. PTFE elektrodo schema (kairė) ir topologija (dešinė) su linijos pločio kintamuoju (ADS Keysight).	82
2.62 pav. Pakoreguoti PTFE medžiagos parametrai (ADS Keysight).	82
2.63 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos plokštės sandara (ADS Keysight).	83
2.64 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight).	83
2.65 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).	84
2.66 pav. PEEK mikrojuostelinės linijos plokštės sandara (ADS Keysight).	84
2.67 pav. PEEK mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).	85
2.68 pav. 50 Ω PTFE mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight). ..	87
2.69 pav. 50 Ω PTFE mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).	87
2.70 pav. 50 Ω PEEK mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight)...	88
2.71 pav. 50 Ω PEEK mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).	88
2.72 pav. Galutiniai optimizuoti PTFE antenos parametrai (ADS Keysight).	89
2.73 pav. Galutiniai optimizuoti PEEK antenos parametrai (ADS Keysight).	90
2.74 pav. Galutinės vientisos PTFE antenos S_{11} parametro grafikas (ADS Keysight).	91
2.75 pav. Galutinės vientisos PTFE antenos TDR grafikas (ADS Keysight).	91
2.76 pav. Galutinės vientisos PEEK antenos S_{11} parametro grafikas (ADS Keysight).	92
2.77 pav. Galutinės vientisos PEEK antenos TDR grafikas (ADS Keysight).	92
2.78 pav. SSAIL technologija pagaminta PTFE antenos: viršutinis sluoksnis (kairė), apatinis sluoksnis (dešinė).	93

2.79 pav. SSAIL technologija pagaminta PEEK antenos: viršutinis sluoksnis (kairė), apatinis sluoksnis (dešinė).	93
2.80 pav. Matavimams paruoštos PTFE antenos: viršus (kairė), apačia (dešinė).	95
2.81 pav. Matavimams paruoštos PEEK antenos: viršus (kairė), apačia (dešinė).....	95
2.82 pav. PTFE antenos S_{11} parametro grafikas.	96
2.83 pav. PEEK antenos S_{11} parametro grafikas	96
2.84 pav. PTFE antenos TDR grafikas.	98
2.85 pav. PEEK antenos TDR grafikas.	99
3.1 pav. nRF9160 modulio LTE-M tipo ir NB-IoT dažnių naudojimo sertifikavimas įvairiose šalyse: patvirtinta (mėlyna) ir patvirtinimas dar nebaigtas (žydra) (<i>nRF9160 Global ...</i> , 2025).	102
3.2 pav. GPS sekiklio nRF9160 modulio schema su reikiama periferija (<i>Altium 21.0.9</i>).....	103
3.3 pav. GPS sekiklio GPS L1 įėjimo signalo schema (<i>Altium 21.0.9</i>).....	104
3.4 pav. GPS sekiklio SIM kortelės schema (<i>Altium 21.0.9</i>).	104
3.5 pav. GPS sekiklio programavimo prieigos schema (Programming interface) ir maitinimo prijungimo schema (Power connector) (<i>Altium 21.0.9</i>).	105
3.6 pav. GPS sekiklio LTE antenos schema (LTE antenna interface) ir perkrovimo valdymo schema (Reset circuit) (<i>Altium 21.0.9</i>).	106
3.7 pav. GPS sekiklio spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) (<i>Altium 21.0.9</i>).	106
3.8 pav. GPS L1 antenos schema (kairė) ir π suderinimo grandinė (dešinė) (<i>Altium 21.0.9</i>).	107
3.9 pav. GPS L1 keraminės antenos spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) (<i>Altium 21.0.9</i>).	107
3.10 pav. GPS L1 suderinimo grandinės spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (viršus) ir PEEK (apačia) (<i>Altium 21.0.9</i>).	108
3.11 pav. PTFE GPS sekiklio plokštė: viršutinis (kairė) ir apatinis (dešinė) sluoksniai.	108
3.12 pav. PEEK GPS sekiklio plokštė: viršutinis (kairė) ir apatinis (dešinė) sluoksniai.	109
3.13 pav. PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) GPS L1 keraminės antenos plokštės: viršutinis (viršuje) ir apatinis (apačioje) sluoksniai.....	110
3.14 pav. PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) GPS L1 suderinimo grandinės plokštės: viršutinis (viršuje) ir apatinis (apačioje) sluoksniai.....	110
3.15 pav. GPS sekiklis sulituotas ant PEEK plokštės (viršutinis sluoksnis).	111
3.16 pav. GPS sekiklis sulituotas ant PEEK plokštės (apatinis sluoksnis).....	112

SANTRUMPOS

3D-MID – 3D suformuoti jungiamieji įrenginiai (angl. *3D Molded Interconnect Devices*).

2G – 2-os kartos mobiliojo ryšio tinklas (angl. *2nd generation of mobile network*).

3G – 3-ios kartos mobiliojo ryšio tinklas (angl. *3rd generation of mobile network*).

4G – 4-os kartos mobiliojo ryšio tinklas (angl. *4th generation of mobile network*).

5G – 5-os kartos mobiliojo ryšio tinklas (angl. *5th generation of mobile network*).

ABF – ajinomoto dielektriko medžiaga (angl. *Ajinomoto Build-Up Film*).

ABS – akrilnitrilo butadieno stirenas (angl. *Acrylonitrile Butadiene Styrene*).

Al₂O₃ – aliuminio oksido keramika (angl. *Aluminium oxide ceramic*).

BDS – BeiDou palydovinė navigacijos sistema (angl. *BeiDou Navigation Satellite System*).

C/A – grubus/igijimo (angl. *Coarse/Acquisition*).

CTE – šiluminio plėtimosi koeficientas (angl. *Coefficient of thermal expansion*).

eDRX – išplėstinio nutrūkstamo priėmimo režimas (angl. *Extended Discontinuous Reception*).

EMI – elektromagnetiniai trukdžiai (angl. *Electromagnetic Interference*).

ESD – elektrostatinė iškrova (angl. *Electrostatic Discharge*).

eSIM – integruotas abonemento tapatybės modulis (angl. *Embedded Subscriber Identity Module*).

FR-4 – antipirenas, stiklu sustiprintas epoksidinis laminatas (angl. *Flame-Retardant, Glass-Reinforced Epoxy Laminate*).

FTMC – Lietuvos fizinių ir technologijos mokslų centras (angl. *Center for Physical Sciences and Technology*).

GNSS – pasaulinės palydovinės navigacijos sistemos įrenginiai (angl. *Global Navigation Satellite System*).

GPS – globali pozicionavimo sistema (angl. *Global Positioning System*).

HGW – kietas audinys (angl. *Hard Fabric*).

HIPS – patvarus polistirenas (angl. *High-Impact Polystyrene*).

HVAF – didelio greičio oro degalai (angl. *High Velocity Air Fuel*).

HVOF – didelio greičio deguonies degalų purškimas (angl. *High Velocity Oxy-Fuel Coating Spraying*).

LDS – tiesioginis lazerinis struktūrizavimas (angl. *Laser Direct Structuring*).

LNA – mažus triukšmus generuojantis stprintuvas (angl. *Low-Noise Amplifier*).

LP – linijinė poliarizacija (angl. *Linear Polarization*).

MID – suformuoti jungiamieji įrenginiai (angl. *Molded Interconnect Device*).

PA – poliamidas (angl. *Polyamide*).

PAI – poliamidimididas (angl. *Polyamide-imide*).

PC – polikarbonatas (angl. *Polycarbonate*).

PCB – spausdintinė elektroninės plokštė (angl. *Printed Circuit Board*).

PE – polietilenas (angl. *Polyethylene*).

PEEK – polieterio eterketonas (angl. *Polyetheretherketone*).

PET – polietileno Tereftalatas (angl. *Polyethylene Terephthalate*).

PETG – polietileno tereftalato glikolis (angl. *Polyethylene Terephthalate Glycol*).

PEI – polieterimididas (angl. *Polyetherimide*).

PLA – polilakto rūgštis (angl. *Polylactic Acid*).

POM – polioskimetilenas (angl. *Polyoxymethylene*).

PP – polipropilenas (angl. *Polypropylene*).

PPS – tikslios padėties nustatymo paslauga (angl. *Precise Positioning Service*).

PPSU – polifenilsulfonas (angl. *Polyphenylsulfone*).

PSM – energijos taupymo režimas (angl. *Power Saving Mode*).

PSU – polisulfonas (angl. *Polysulfone*).

PU – poliuretanai (angl. *Polyurethane*).

PUR – poliuretanai (angl. *Polyurethane*).

PVA – polivinilo alkoholis (angl. *Polyvinyl Alcohol*).

PVDF – polivinilidenfluoridas (angl. *Polyvinylidene Fluoride*).

RHCP – dešinės pusės žiedinė poliarizacija (angl. *Right-Hand Circular Polarization*).

SAW – paviršinė akustinė banga (angl. *Surface Acoustic Wave*).

SITAL – kristalinė stiklo keramika (angl. *Sital CO-115M / Astrositall crystalline glass-ceramic*).

SIM – abonemento tapatybės modulis (angl. *Subscriber Identity Module*).

SPS – standartinė padėties nustatymo paslauga (angl. *Standard Positioning Service*).

SSAIL – selektyvus paviršiaus aktyvavimas, naudojant lazerį (angl. *Selective Surface Activation Induced by Laser*).

TDR – laiko srities reflektometrija (angl. *Time-Domain Reflectometry*).

TPU – termoplastinis poliuretanai (angl. *Thermoplastic Polyurethane*).

Wi-Fi – belaidis pastovumas (angl. *Wireless Fidelity*).

IRNSS – Indijos regioninė palydovinė navigacijos sistema (angl. *Indian Regional Navigation Satellite System*).

QZSS – kvazi-zenito palydovinė sistema (angl. *Quasi-Zenith Satellite System*).

VNA – vektorinis grandynų analizatorius (angl. *Vector Network Analyzer*).

IVADAS

Gaminant globalios pozicionavimo sistemos (angl. *Global Positioning System*, toliau GPS) elektronikos įrenginius įprastai naudojamos spausdintinės elektronikos plokštės (angl. *Printed Circuit Board*, toliau PCB). Tačiau tobulėjant technologijoms atsiranda vis didesnis poreikis sumažinti elektroninių įrenginių dydį bei kainą, tam kuriamos naujos elektros grandinių gamybos technologijos. Viena iš perspektyvių elektroninių įrenginių gamybos technologijų elektronikos srityje yra vadinama 3D suformuotų jungiamųjų įrenginių (angl. *3D Molded Interconnect Devices*, toliau 3D-MID) technologija. 3D-MID technologija yra naudojama, kuriant suformuotus jungiamuosius įrenginius (angl. *Molded Interconnect Device*, toliau MID).

MID – įrenginys, kuriame tiesiogiai integruojamos mechaninės ir elektrinės detalės, naudojant polimero arba stiklo (iš kurio pagamintas korpusas) bei vario sintezę (Tamari, 2021). Ši sintezė leidžia įrenginio korpuse išgraviruoti įvairaus tipo elektrines grandines.

Dažniausiai pasitaikantys MID įrenginiai turi plastikiniame korpuse integruotas elektros grandines. Tokių MID įrenginių pagrindinės rinkos yra buitinės elektronikos, telekomunikacijos, automobilių bei medicinos (*Molded Interconnect Device*, 2025).

Šiame darbe bus aptariamas GPS sekiklio kūrimas ir tyrimas. Sekiklis bus kuriamas naudojant selektyvaus paviršiaus aktyvavimo, naudojant lazerį technologiją (angl. *Selective Surface Activation Induced by Laser*, toliau SSAIL). SSAIL technologija gali būti naudojama viso įrenginio fizinių dydžių, tokių kaip: matmenys ir svoris, sumažinimui. SSAIL technologija leidžia perkelti visą elektros grandinę nuo atskiros PCB, tiesiai ant įrenginio korpuso. Tokiu būdu SSAIL technologijos taikymas leidžia sumažinti įrenginio dydį nebloginant esminių įrenginio parametrų arba juos iš esmės patobulinant.

Įrenginių patobulinimas gali būti atliekamas naudojant geresnį dielektriką, palyginus su įprastai PCB gamyboje naudojamais FR-4 dielektrikais. Naudojant SSAIL technologiją, galima kurti elektros grandines ant įvairiausių medžiagų, kurios ypač turi įtakos aukštadažnių elektros grandinių veikimui. SSAIL technologijos įgalinamas platus medžiagų pasirinkimas, leidžia laisviau pasirinkti korpuso medžiagą priklausomai nuo norimų dielektrinių parametrų. O gaminant standartines PCB plokštes, dielektrikų pasirinkimas yra dažniausiai ribotas ir priklausantis nuo to ką siūlo gamintojas.

Norint išanalizuoti SSAIL technologijos tinkamumą elektronikos grandinių gamyboje, šiame darbe, yra pasirenkamos kelios medžiagos aukštadažnių grandynų ir komponentų kūrimui bei analizei. Darbo tikslas – sukurti ir ištirti GPS sekiklį bei jo atskirus komponentus,

pagamintus ant skirtingų dielektrikų naudojant SSAIL technologiją, siekiant įvertinti šios technologijos tinkamumą aukštadažnių grandynų kūrime.

SSAIL technologija yra palyginti nauja. Pirmieji straipsniai susiję su SSAIL technologija pradėti skelbti 2016 metais (Gedvilas et al., 2016). Šios technologijos tikslas yra įgalinti tikslų varinių elektrinių takelių ir įvairių elektrodų nusodinimą ant plataus dielektrinių medžiagų spektro (SSAIL, 2025). SSAIL technologija turi potencialą daugumoje pramonės šakų, kuriose yra poreikis sumažinti įrenginių dydį ir/arba gaminti tikslias PCB. SSAIL technologijos pramonės šakos gali būti šios: automobilių, buitinės technikos, medicinos ir kitos.

Šiame darbe išsikelti pagrindiniai 3 uždaviniai:

1. Atlikti pasirinktų dielektrikų, esant aukštiesiems dažniams, parametrų stabilumo matavimus.
2. Sukurti iš ištirti GPS L1 dažnio planarines antenas, pagamintas ant skirtingų dielektrikų.
3. Sukurti GPS sekiklį ant skirtingų dielektrikų, ir esant galimybei jį ištirti.

Šiame darbe bus naudojamas laiko srities reflektometrija (angl. *Time-Domain Reflectometry*, toliau TDR) tyrimo metodas ir atliekamas S_{11} parametrų matavimas, naudojant SIGLENT SNA5032A vektorinį grandynų analizatorių (angl. *Vector Network Analyzer*, toliau VNA).

TDR tyrimo metodas – kurio metu, šaltinis prijungiamas prie elektrinio takelio pradžios ir generuojamas vienetinis impulsas. Vienetinis impulsas, atsispindi nuo elektrinio takelio pilnutinės varžos pokyčių netolygumų, ir grįžta į imtuvą. Gautas TDR impedanso grafikas parodo elektrinio takelio induktyvumo ir talpos netolygumus.

S_{11} parametras – antenos atspindžio koeficientas, nurodantis kokia įėjimo signalo dalis atspindima atgal į įėjimą. Taip pat, šis parametras nurodo antenos impedanso suderinamumą su charakteringąja sistemos varža, ties antenos centriniu dažniu (Denisowski, 2025).

Dielektrikų parametrų stabilumo matavimai atliekami SSAIL pagaminant mikrojuostelines linijas ant pasirinktų medžiagų, atliekant linijų impedansų matavimą, naudojant VNA, ir lyginant matavimo rezultatus su modeliavimo rezultatais *ADS Keysight* programoje. GPS L1 dažnio planarijų antenų kūrimas atliekamas modeliuojant ir optimizuojant antenas su *ADS Keysight* programa, matuojant SSAIL technologija pagamintų antenų įėjimo impedansus ir S_{11} parametrus bei lyginant matavimo ir modeliavimo rezultatus. O GPS sekiklio kūrimas atliekamas išsirenkant GPS sekiklio komponentus, nusibraižant schemas bei spausdintinių plokščių modelius su *Altium 21.0.9* programa ir sulituojuant SSAIL technologija pagamintų GPS sekiklio plokščių komponentus. Esant galimybei pratestuojamas GPS sekiklio veikimas.

1. SSAIL TECHNOLOGIJOS IR JOS PAGRINDU KURIAMŲ ELEKTRONIKOS KOMPONENTŲ, DIELEKTRINIŲ MEDŽIAGŲ BEI PAGRINDINIŲ GPS SEKIKLIO PARAMETRŲ LITERATŪROS APŽVALGA

GPS yra viena pagrindinių šiais laikais naudojamų sistemų, leidžianti įvairiems įrenginiams komunikuoti tarpusavyje ir identifikuoti vienas kito pozicijas visame pasaulyje.

Tobulėjant technologijoms ir keičiantis naudotojų poreikiams, rinkoje atsiranda paklausa naujiems, modernizuotiems GPS įrenginiams. Technologijų tobulėjimas ir beiškeičiantys naudotojų poreikiai reikalauja:

- Didesnio GPS įrenginių našumo;
- GPS įrenginių parametų patobulinimo, lyginant su jau sukurtais įrenginiais;
- GPS įrenginių fizinių parametų sumažinimo, tokių kaip įrenginio korpuso matmenys ir svoris.

1.1. MID suformuoti jungiamieji įrenginiai

Norint patenkinti naujai atsiradusius reikalavimus GPS įrenginiams, yra tobulinami pagrindiniai GPS įrenginių parametrai: fizinis dydis ir vieno iš pagrindinių komponentų – antenos – parametrai.

GPS antenų našumas ir parametų patobulinimas, įgyvendinami keičiant ir/arba tobulinant antenos pagrindo dielektriką, antenos formą bei periferinius antenos komponentus, tokius kaip antenos triukšmų filtrą, stiprintuvą ir kitus. O GPS įrenginių ir antenų parametų minimizavimas įgyvendinamas mažinant antenos dydį.

GPS antenų minimizavimas dažniausiai atliekamas antenas įkomponuojant į GPS siųstuvo/įmtuvo lustus arba į atskirą antenos lustą. Viso GPS įrenginio minimizavimas, atliekamas integruojant GPS siųstuvus-įmtuvus į mobiliojo ryšio lustus bei kaip įmanoma mažinant GPS antenos dydį, ją integruojant į lustus, kuriant keramines arba lanksčias antenas ir pan.

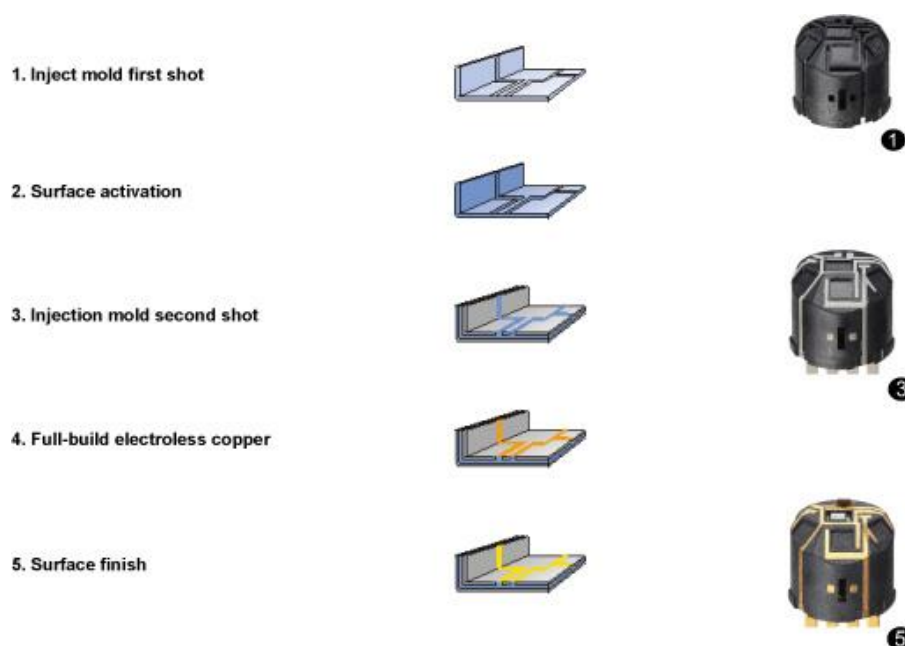
PCB alternatyva tampa 3D-MID technologija. Ši technologija naudojama, kuriant MID, kuriuose yra tiesiogiai integruojamos mechaninės ir elektrinės detalės, naudojant polimero, keramikos arba stiklo ir vario sintezę (SSAIL, 2025). Ši sintezė leidžia ant įrenginio korpuso pagaminti įvairaus tipo elektrines grandines ir taip ženkliai sumažinti gaminamo įrenginio dydį.

Dažniausiai naudojami MID įrenginių gamybos būdai (Tamari, 2021) ir naujas gamybos būdas išrastas Lietuvos Fizinių ir technologijos mokslų centre (toliau FTMC) yra šie:

- Dviejų etapų liejimo procesas (angl. *Two-Shot Molding Process*);
- Metalų puškimas (angl. *Metal Spraying*);
- Tiesioginis lazerinis struktūrizavimas (angl. *Laser Direct Structuring*, toliau LDS);
- SSAIL.

Dviejų etapų liejimo procesas susideda iš penkių etapų (1.1 pav.) (*Two Shot Moulding*, 2025):

1. Išliejamas įrenginio korpusas iš nemetalizuojamo plastiko.
2. Vykdomas korpuso paviršiaus cheminis aktyvavimas.
3. Elektrinės grandinės forma išliejama antruoju metalizuojamo plastiko sluoksniu.
4. Metalizuojamas plastiko sluoksnis padengiamas variu.
5. Variniai elektros grandinės takeliai padengiami pasirinkto pasyvinio metalo danga (Nikelio, Aukso-Nikelio, t. t.).

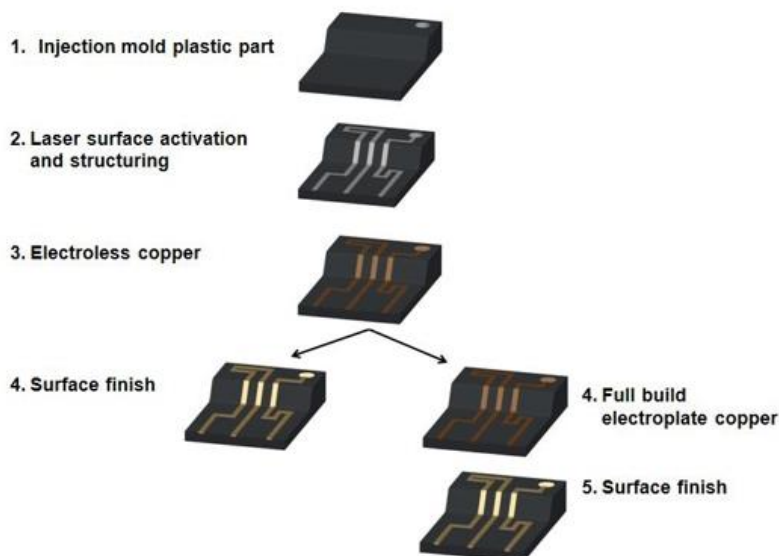


1.1 pav. Dviejų etapų liejimo proceso etapai (*Two Shot Moulding*, 2025).

LDS susideda iš penkių etapų (1.2 pav.) (*Laser Direct Structuring*, 2025):

1. Išliejamas įrenginio korpusas iš metalizuojamo plastiko.
2. Vykdomas korpuso paviršiaus dalies aktyvavimas su lazeriu ir gaunama elektrinės grandinės forma.
3. Lazeriu aktyvinto metalizuojamas plastiko sluoksnis padengiamas variu.

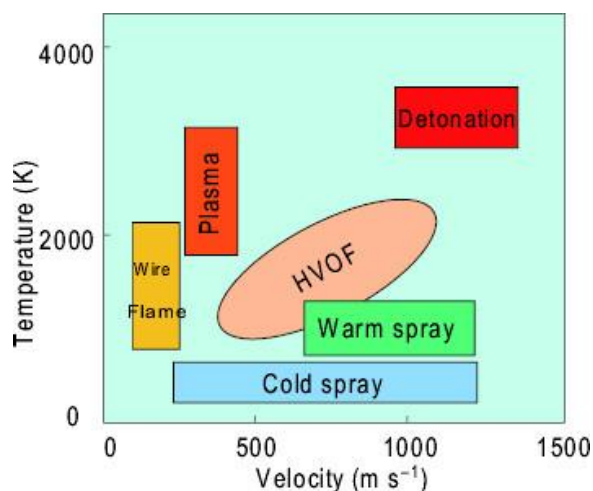
4. Variniai elektros grandinės takeliai padengiami pasirinkto pasyvinio metalo danga (Nikelio, Aukso-Nikelio, t. t.).



1.2 pav. Tiesioginio lazerinio struktūrizavimo proceso etapai (*Laser Direct Structuring*, 2025).

Metalo purškimo proceso metu, MID įrenginys gaminamas labai panašiai, kaip ir LDS metodu (Tamari, 2021), tačiau vario ir pasyvinio metalo sluoksnio nusodinimas vyksta padengiant paviršių metalo sluoksniu, naudojant prietaisus kurie purškia išlydytus metalus (1.3 pav.) (*Thermal Spraying*, 2024). Yra keli metalo purškimo būdai, tokie kaip (*Thermal Spraying*, 2024):

1. Plazmos purškimas;
2. Detonacinis purškimas;
3. Purškimas vielos lanku;
4. Liepsnos purškimas;
5. Didelio greičio deguonies degalų purškimas (HVOF);
6. Didelio greičio oro degalai (HVOF);
7. Šiltas purškimas;
8. Šaltas purškimas;
9. Purškimo ir saugiklio metodas.

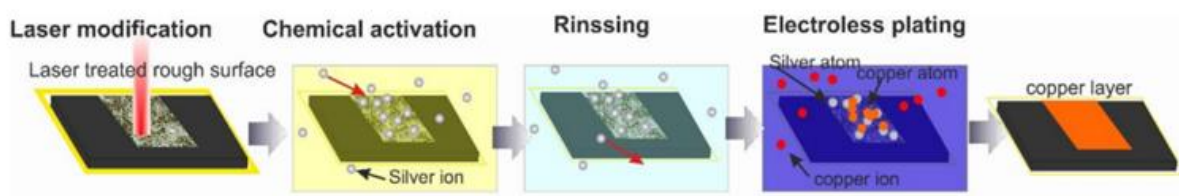


1.3 pav. Įvairių terminio metalo purškimo procesų palyginimas pagal dalelių temperatūrą ir greitį (Kuroda et al., 2008).

SSAIL procesas susideda iš pagrindinių trijų etapų (1.4 pav.) (Ratautas, Vosylius, et al., 2020):

1. Medžiagos paviršiaus modifikavimas naudojant lazerį.
2. Modifikuoto medžiagos paviršiaus cheminis aktyvavimas.
3. Medžiagos aktyvuotų paviršiaus dalių padengimas variu ir, esant poreikiui, pasyviuoju metalo sluoksniu (auksu, nikeliu arba sidabru), naudojant cheminį vario ir pasyvaus metalo sluoksnio nusodinimą.

Medžiagos valymas yra papildomas etapas skirtas pagerinti vario nusodinimo kokybę.



1.4 pav. SSAIL proceso etapai (Ratautas, Vosylius, et al., 2020).

Pagrindinis skirtumas tarp LDS ir metalo purškimo metodų yra vario ir pasyvinio metalo sluoksnių nusodinimo procesų pasirinkime. LDS naudoja cheminį elektros grandinės nusodinimo metodą, o metalo purškimas naudoja tiesioginį metalo užpurškimo metodą.

Dviejų etapų liejimo proceso esminis skirtumas nuo LDS yra dviejų tipų plastikų naudojimas korpuso kūrime. LDS procesas naudoja tik vieno tipo metalizuojamą plastiką įrenginio korpuso kūrime ir nereikalauja dviejų skirtingo tipo (metalizuojamų ir nemetalizuojamų) plastikų sujungimo, taip kaip daroma dviejų etapų liejimo proceso metu.

Tačiau šiuo metu yra dar viena technologija, sukurta FTMC, kuri, priešingai nuo LDS, nereikalauja įrenginio korpuso gaminti iš specifinės metalizuojamos medžiagos. Ši technologija

yra SSAIL. SSAIL technologija leidžia sukurti elektros grandinę ant polimerinio substrato (pvz., PC, ABS, FR-4, PEEK, ABF), keramikos (pvz., SITAL, Al₂O₃), stiklo arba silikono (SSAIL, 2025). SSAIL technologija geba išgauti 1–15 µm pločio vario takelius, priklausomai nuo apdirbamos medžiagos (SSAIL, 2025). Ši technologija leidžia gamintojui laisvai pasirinkti MID įrenginio medžiagą.

Iš aprašytų gamybos būdų matoma, kad LDS technologija yra paprastesnė negu dviejų etapų liejimo procesas, kadangi nereikalauja dviejų skirtingo tipo plastikų (metalizuojamų ir nemetalizuojamų). O LDS pranašumas už metalo purškimo procesą yra vario nusodinimas cheminiu būdu, kuris nereikalauja dirbti su išlydytais metalais. Galiausiai SSAIL technologijos pranašumas prieš visas aptartas technologijas yra platus medžiagų pasirinkimas ir cheminis vario bei pasyvinio metalo sluoksnių nusodinimas. Galima paminėti, kad naudojant SSAIL technologiją yra sukurti įrenginių tokių kaip:

1. Belaidžių jutiklių tinklas, skirtas aplinkos stebėsenai (Duobiene et al., 2022);
2. Gliukozės jutikliai, be fermentų (Khairullina et al., 2021).

Kuriant belaidžių jutiklių tinklą, naudojant SSAIL technologiją, sukurta planarioji Wi-Fi žemesniosios dažnių juostos antena, ant PREPERMTM PPE440 plastiko, (Duobiene et al., 2022) o tai parodo SSAIL technologijos gebėjimą kurti aukštų dažnių grandynus ant standartinių PCB gamyboje nenaudojamų dielektrikų. Gliukozės jutiklių, be fermentų, kūrimas parodo, kad, taikant SSAIL technologiją, galima sukurti stabilius ir jautrius gliukozės jutiklius (Khairullina et al., 2021), o tai rodo SSAIL technologijos potencialą medicinos srityje.

Visi anksčiau aptarti MID įrenginių gamybos būdai geba pagaminti daugiau dviejų sluoksnių elektrines grandines.

Esminis MID įrenginių pranašumas prieš standartinius PCB įrenginius yra dizaino lankstumas, kuris įgalina įvairesnių, mažesnių, lankstesnių įrenginių gamybą. Taip pat, palyginus su standartine PCB plokščių gamybos technologija MID įrenginių gamybos būdai turi daug mažiau gamybos etapų. Standartinės PCB gamybos etapai (1.5 pav.):

1. Gamybos duomenų tikrinimas prieš atliekant gamybą (angl. *pre-production engineering*).
2. Vidinių PCB sluoksnių elektrinių grandinių formos gamyba su fotorezistu (angl. *inner layer imaging*).
3. Vario ėsdinimas (angl. *etching*).
4. Fotorezisto pašalinimas (angl. *photoresist stripping*).
5. Plokštės tikrinimas ir surinkimas – vienas ant kito sudėjus sulygiuotus vidinių sluoksnių elektros grandinių plokštes (angl. *inspection and post-etch punch*).

6. Pasirinktinis plokštės išorinių vario sluoksnių dengimas oksido sluoksniu (angl. *alternative oxide coating*).
7. Plokštės laminavimas (angl. *lamination*).
8. Skylių gręžimas (angl. *drilling*).
9. Skylių metalizavimas (angl. *metallization of dielectric*).
10. Išorinių PCB sluoksnių elektrinių grandinių formos gamyba su fotorezistu (angl. *outer layer imaging*).
11. Vario ir plono alavo sluoksnių nusodinimas ant metalizuotų skylių ir išorinių vario sluoksnių (angl. *copper plating*).
12. Fotorezisto pašalinimas (angl. *photoresist stripping*).
13. Vario sluoksnio ėsdinimas (angl. *final etching*).
14. Alavo sluoksnio šalinimas nuo vario takelių (angl. *tin stripping*).
15. Litavimo kaukės dengimas (angl. *solder mask application*).
16. Pasyvinio metalo sluoksnio nusodinimas (angl. *surface finish*).
17. Šilkografija (angl. *silkscreen*).
18. Atliekamas plokštės elektrinis testavimas (angl. *electrical test*).
19. Plokščių pjaustymas į tinkamas formas (angl. *routing and v-scoring*).

PCB manufacturing process



1.5 pav. Standartinių PCB gamybos proceso eiga (PCB Manufacturing ..., 2025).

PCB įrenginiai buvo išrasti daug anksčiau, kas leido žymiai išsamiau išnagrinėti trūkumus ir patobulinti šiuos įrenginius bei jų gamybos metodus. O 3D-MID technologija ir MID įrenginiai yra palyginti nauji ir dar turi neišspręstų trūkumų bei dar nežinomų trikdžių, todėl nėra plačiai taikomi elektroninių įrenginių gamyboje.

Didžiausias MID įrenginių minusas yra elektroninės grandinės komponentų litavimas, kadangi MID įrenginiai, dėl savo 3D korpuso, yra netinkami standartinėms SMD surinkimo mašinoms. Dėl šilkografijos sluoksnio nebuvimo plokštės litavimas arba vizuali inspekcija gali, kai kuriais atvejais, tapti sudėtingesni. O dėl izoliacinio sluoksnio nebuvimo litavimas tampa sudėtingesnis, nes lydmetalis nuo litavimo aikštelės gali ištekti daug plačiau nei įprastose PCB su izoliaciniais sluoksniais. Taip pat svarbu paminėti, kad MID įrenginiai gali turėti daugiausia dviejų sluoksnių elektrinės grandinės, o tai limituoja MID įrenginių panaudojimo galimybes ir šių įrenginių elektrinių grandinių sudėtingumo lygį. Todėl standartinių PCB gamybos technologija yra pranašesnė palyginus su MID įrenginių gamybos technologija.

1.2. Skirtingų dielektrikų analizė

Renkantis GPS sekiklio dielektrikus buvo atsižvelgta į tokias medžiagas, iš kurių galima pagaminti vientisą korpusą. Taip pat buvo atsižvelgta į medžiagų dielektrinius parametrus, tokius kaip:

- Dielektrinę konstantą (ϵ_r) – tai medžiagos elektrinio laidumo ir laisvos erdvės (t. y. vakuumo) elektrinio laidumo santykis (*Relative Permittivity*, 2025).
- Dielektrinių nuotolių koeficientą/tangentą ($\tan\delta$) – fazės kampas tarp aktyviosios varžos (rezistanso) ir reaktyviosios varžos (kapasitanso) dielektrike (*PCB Stack-Up ...*, 2024).
- Dielektrinės konstantos ir dielektrinių nuostolių koeficiento matavimo dažnį.

Medžiagos dielektrinė konstanta turi būti stabili per visą detalės plotą ir esant aukštiesiems GHz eilės dažniams, norint stabilaus aukštadažnio įrenginio ir jo komponentų veikimo. O dielektrinių nuotolių koeficientas/tangentas turi būti kuo mažesnis norint greito įrenginio veikimo. (Peterson, 2020b) (Yogendrappa, 2021)

Taip pat svarbus dielektrinės medžiagos parametras yra vandens absorbcija. Vandens absorbcija – tai medžiagos masės padidėjimas, po to kai medžiaga buvo pamerkta į vandenį (Kumar et al., 2025). Jeigu dielektrinė medžiaga turi didelę vandens absorbciją, tai rodo, kad medžiagos elektriniai ir/arba mechaniniai parametrai gali žymiai pakisti priklausomai nuo aplinkos drėgmės, o tai sukuria įrenginio veikimo nestabilumą.

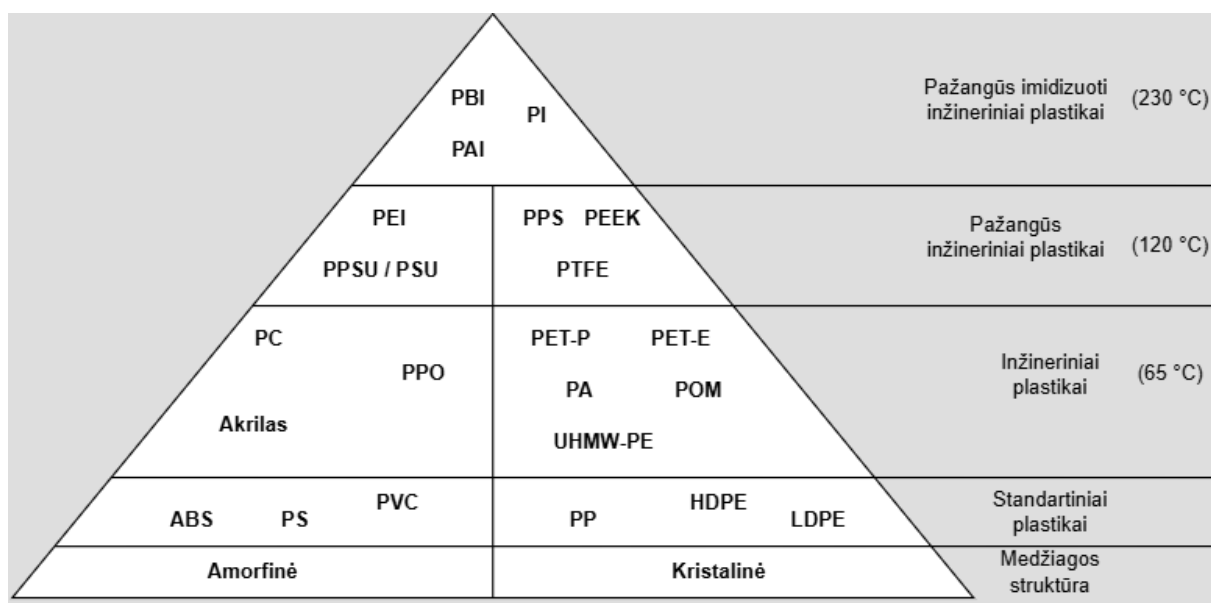
Be elektrinių parametrų yra itin svarbūs medžiagos šiluminiai parametrai, tokie kaip (*PCB Stack-Up ...*, 2024):

- Suminkštėjimo temperatūra (T_g);
- Lydymosi temperatūra (T_d);
- Šiluminis plėtimosi koeficientas (angl. *Coefficient of thermal expansion*, toliau CTE);
- Šiluminis laidumas (k).

Suminkštėjimo temperatūra – riba, ties kuria medžiaga pradeda minkštėti, t. y. prarasti savo kietą struktūrą, šis procesas yra grįžtamasis. Lydymosi temperatūra – riba ties kuria medžiaga pradeda minkštėti, tačiau tai yra negrįžtamasis procesas. CTE – nurodo medžiagos gebėjimą plėstis kylant temperatūrai ir išreiškiamas milijoninėmis dalimis vienam Celsijaus laipsniui (ppm/°C). Šiluminis laidumas – parametras nurodantis, kaip greitai medžiaga geba perduoti šilumą. Šiluminio laidumo matavimo vienetai išreiškiami vatais metrui vienam Kelvino laipsniui (W/(m·K)). (*PCB Stack-Up ...*, 2024) (Yogendrappa, 2021)

Renkantis GPS sekiklio korpusą svarbu atsižvelgti ir į medžiagos gamybos būdus, tokius kaip 3D spausdinimas ir liejimas. Atspausdinti plastiką įvairiomis 3D spausdinimo technologijos yra daug paprasčiau negu išlieti vientisą detalę. Tačiau išlieta detalė dažniausiai turi stabilesnius parametrus per visą detalės plotą ir gylį negu atspausdinta detalė. Detales gaminant 3D spausdinimo technologija, medžiagos parametrų nestabilumą gali sukelti detalės viduje esančios oro ertmės, spausdinimo metu netolygiai pasiskirstę plastiko sluoksniai (pvz., plastiko sluoksniai vienoje detalės vietoje yra tarpusavyje sulipę geriau nei kitoje), detalės storio variacijos per visą detalės plotą ir pan.

Tiek 3D spausdinamos, tiek liejamos medžiagos yra skirstomos į 3 klases: didelio našumo, inžinerines, standartines (1.6 pav.).



1.6 pav. Plastikų klasifikacija (*Quadrant Engineering ...*, 2025) (*Mitsubishi ...*, 2025).

Medžiagų klasifikacija atliekama pagal medžiagų savybes ir darbinės temperatūras. Standartinės 3D spausdinimo medžiagos yra PLA, ABS, PA ir kitos. Didesnė dalis standartinių plastikų yra aprašyti A priede. 3D spausdinimui taip pat gali būti naudojami plastikai su įvairiomis priemaišomis, pavyzdžiui: metalo, medžio, anglies pluošto. (*What Materials Are ...*, 2023).

Dalis 3D spausdinimui skirtų medžiagų gali būti priskiriamos prie techninių/inžinerinių medžiagų, kurios yra atsparios apkrovoms bei kurių darbinė temperatūra yra didesnė nei 100 °C. Inžineriniai plastikai yra PA, POM, PU ir kiti. Didesnė dalis inžinerinių plastikų yra aprašyti A priede. (*Techniniai plastikai*, 2025) (*Inžineriniai plastikai ...*, 2025) (Yıldızhan, 2021)

Plastikų klasių savybės aprašytos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Plastikų klasių savybės (*Quadrant Engineering ...*, 2025).

Medžiagos struktūra Plastikų klasė	Amorfinė	Kristalinė
Standartiniai	Geras plastikų formavimas ir sukibimas (su kitais plastikais ir tarpusavyje); Taikymas su nedidelėmis apkrovomis;	Geras cheminis atsparumas; Skirti nedidelės apkrovos taikymams;
Inžineriniai	Geras plastikų formavimas ir sukibimas (su kitais plastikais ir tarpusavyje); Formuojami aukštos temperatūros; Gali atlaikyti didesnę apkrovą nei standartiniai plastikai.	Vidutinis atsparumas trinčiai ir dėvimuisi; Geras cheminis atsparumas;
Pažangūs inžineriniai	Atsparūs karštam vandeniui ir garams; Formuojami aukštos temperatūros; Skaidrūs/Permatomi;	Itin geras cheminis atsparumas; Geras atsparumas dėvimuisi;
Pažangūs imidizuoti inžineriniai	Taikymas esant ekstremalioms sąlygoms; Atlaiko aukštas temperatūras; Itin nedidelis priemaišų kiekis; Geras cheminis atsparumas;	

Kaip matoma iš 1.1 lentelės duomenų ir 1.6 pav., standartiniai plastikai turi prasčiausias, o imidizuoti inžineriniai plastikai – geriausias, cheminio atsparumo, atsparumo aukštomis temperatūroms, mechaninio dėvimosi ir apkrovos palaikymo savybes.

Kaip minėta anksčiau, renkantis GPS sekiklio dielektrinio medžiagą buvo atsižvelgta į medžiagos dielektrines savybes bei darbinę temperatūrą. Šiame darbe buvo pasirinkti PTFE ir PEEK inžineriniai plastikai dėl gana didelės darbinės temperatūros bei lengvo prieinamumo įsigyti plastikines detales. Svarbu paminėti, kad skirtingų gamintojų PTFE ir PEEK plastikai turi skirtingas dielektrines ir šilumines savybes. Papildomai buvo pasirinktas trečias GPS sekiklio dielektrikas – 3D spausdinama medžiaga PA 2200.

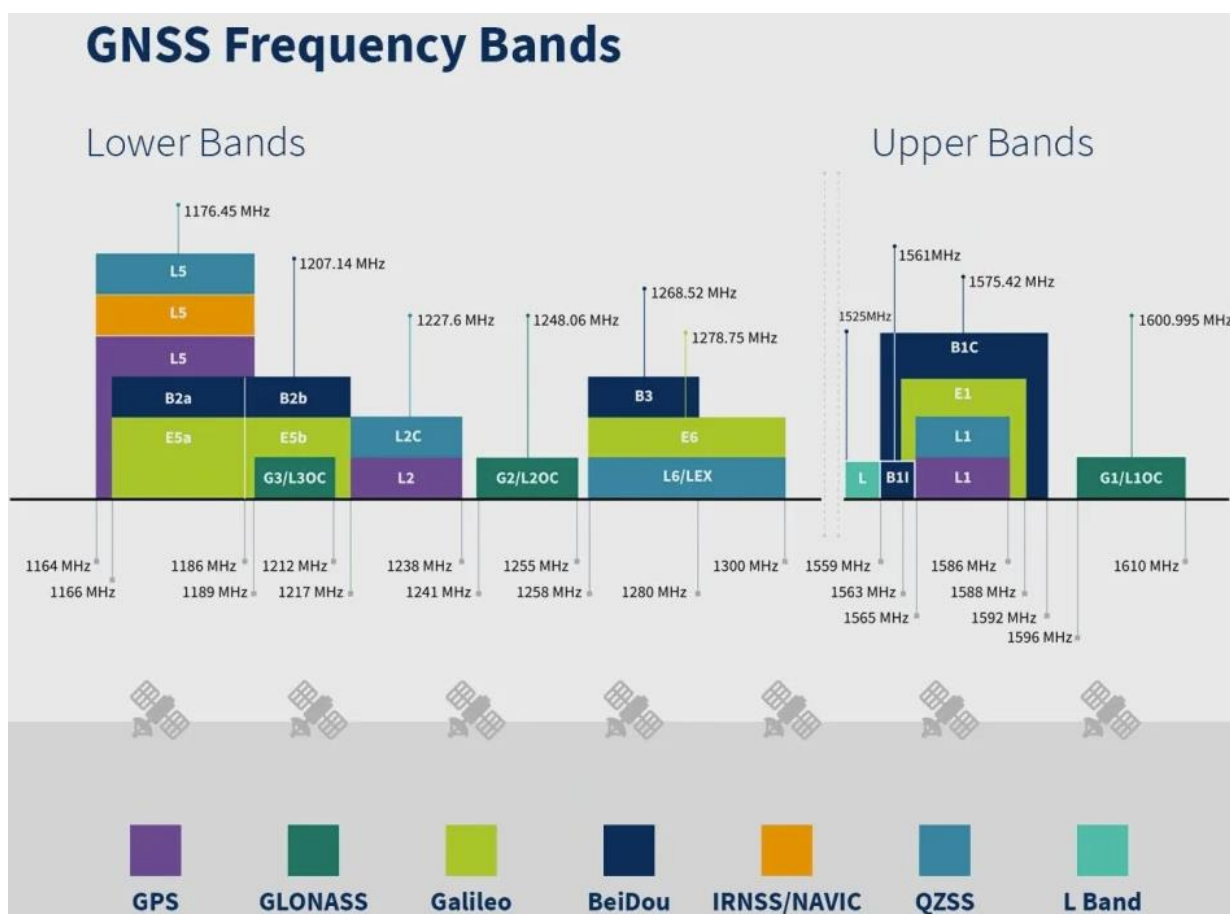
Taip pat PTFE ir PEEK plastikai pasižymi gerais dielektriniais parametrais nes turi mažus dielektrinius nuotolius ir mažas dielektrines konstantas (Peterson, 2020a) (Lu et al., 2019). PEEK plastikai nėra itin plačiai naudojami, kaip spausdintinių plokščių dielektrikai (Hornak et al., 2024). Tačiau PEEK plastikų dielektrinių parametrų panašumas su PTFE

plastikų parametrais parodo, kad PEEK medžiagos turėtų būti tinkamos aukštadažnių įrenginių plokščių gamyboje.

PA 2200 buvo pasirinkta konsultuojantis su įmone, kuri teikia 3D spausdinimo paslaugas. PA 2200 plastikas turi vienus geriausių dielektrinių parametrų iš 3D spausdinamų plastikų. Svarbu paminėti, kad dauguma 3D spausdinimui skirtų medžiagų neturi aprašytų dielektrinių parametrų arba turi aprašytus ne visus reikiamus parametrus aukštadažnių grandinių gamybai. PA 2200 medžiaga buvo pasirinkta, norint pratestuoti ar galima pagaminti kokybišką aukštadažnę grandinę su SSAIL technologija, naudojant 3D spausdinimo technologija pagamintą korpusą.

1.3. GPS komunikacijoje naudojami dažnių ruožai ir kodai

Pasaulinės palydovinės navigacijos sistemos įrenginių (angl. *Global Navigation Satellite System*, toliau GNSS) GPS antenos turi priimti vieną iš GPS L-tipo dažnių ruožų: L1, L2 arba L5 (1.7 pav.).



1.7 pav. Centriniai dažniai bei dažnių ruožai skirti įvairiems GNSS įrenginiams (GNSSの理解, 2025).

L1 dažnių ruožas yra dažnai naudojamas daugumoje visuomenei prieinamų GPS įrenginių ir valstybės reikmėms. L2 dažnių ruožas yra naudojamas itin tiksliai komunikacijai ir priskiriamas valstybės reikmėms bei visuomenės poreikiams patenkinti. L5 dažnių ruožas yra pažangiausias dabar egzistuojantis GPS dažnių ruožas, naudojamas tiek aviacijoje, tiek visuomenei prieinamuose GPS įrenginiuose. Žemiau pateikta lentelė aprašanti L1, L2 ir L5 GPS dažnių ruožus bei jų centrinius dažnius. (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ..., 2024*)

1.2 lentelė. GPS signalų dažnių ruožai bei centriniai dažniai (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ..., 2024*).

Parametrai Dažnių ruožo tipas	Dažnių ruožas, MHz	Centrinis dažnis, MHz
L1 / L1C	1565–1586	1575,42
L2 / L2C	1217–1238	1227,6
L5	1164–1189	1176,45

L1 dažnių ruožas naudoja C/A ir P(Y) komunikacijos kodus (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ..., 2024*). C/A komunikacijos kodo greitis yra 1.023 Mb/s ir yra 10 kartų lėtesnis už P(Y) kodą, kurio greitis 10.23 Mb/s (Jan Van Sickle, 2025). C/A komunikacijos kodas susideda iš 1023 bitų duomenų signalo ir yra prieinamas visuomenei bei naudojamas standartinės padėties nustatymo paslaugos įrenginiuose (angl. *Standard Positioning Service*, toliau SPS) įrenginiuose, kurie yra kuriami visuomenės poreikiams patenkinti. O P(Y) kodas yra naudojamas tikslios padėties nustatymo paslaugos įrenginiuose (angl. *Precise Positioning Service*, toliau PPS) įrenginiuose, kurie yra naudojami valstybės poreikiams. P(Y) komunikacijos kodas yra atitinkamai užšifruotas bei jo naudojimą reguliuoja atitinkamos valstybinės įstaigos. C/A kodas yra skirtas tik L1 dažnių ruožui ir jo tikslumas siekia ± 20 m horizontalėje bei ± 40 m vertikalėje (Jan Van Sickle, 2025). Šiuo metu L1 dažnių ruožas yra išskirstytas į dvi grupes L1C – visuomenės poreikiams, ir L1M – valstybės poreikiams. L1C dažnių ruožas bei centrinis dažnis yra analogiški L1 (1.2 lentelė). (Jan Van Sickle, 2025) (*GPS Signals, 2025*)

L2 dažnių ruožas suteikia tikslesnę informaciją negu L1. L2 dažnių ruožas taip pat yra išskirstytas į dvi grupes: L2C (visuomenės poreikiams) ir L2M (valstybės reikmėms). L2C yra naudojama daugiau kliūčių turinčioje aplinkoje, nes jo signalai yra stipresni ir lėtesni. L2C signalai nemoduliuojami jokių kodų. L2 dažnių ruožo signalų imtuvai, skirti visuomenės reikmėms, naudoja kelių tipų signalus buvimo vietai nustatyti: L1 ir L2C. L1 signalas yra priimamas pirmas ir tada įrenginio buvimo vieta patikslinama priimant L2C dažnių ruožo

signalą. Taip pat šie imtuvai gali priimti tiesiogiai L2C dažnių ruožo signalą, nepriklausomai nuo L1. (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ...*, 2024)

L5 dažnių ruožo signalai yra pažangiausi iš visų aptartų. Šie signalai yra didelės galios ir žemo dažnio palyginus su L1C ir L2C dažnio signalais. Šio dažnių ruožo signalai yra atsparesni triukšmams. (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ...*, 2024)

Svarbu paminėti, kad visi GPS L1, L2 ir L5 signalai yra dešinės pusės žiedinės poliarizacijos (angl. *Right-Hand Circular Polarization*, RHCP).

Pagrindiniai skirtumai tarp visuomenės ir valstybės reikmėms skirtų GPS signalų yra jų fazės poslinkis bei šifravimas. Visuomenės poreikiams pritaikyti GPS signalai nėra šifruojami, o valstybės reikmėms – šifruojami. Tarp visuomenės ir valstybės reikmėms skirtų GPS signalų yra 90° fazės poslinkis (*GPS Signals*, 2025).

Kuriant GPS sekiklį pravartu kurti antenas, kurios priima daugiau nei vieno tipo GNSS signalus, tam, kad sekiklis negebėdamas identifikuoti GPS signalo, turėtų galimybę identifikuoti pavyzdžiui GALILEO GNSS signalus. GALILEO yra Europos Sąjungos GNSS (*Galileo | EU Agency ...*, 2025). Šių signalų dažnių ruožai bei centriniai dažniai pateikti 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. GALILEO GNSS signalų dažnių ruožai bei centriniai dažniai (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ...*, 2024).

Parametrai GALILEO	Dažnių ruožas, MHz	Centrinis dažnis, MHz
E1	1563–1588	1575,42
E6	1258–1300	1278,75
E5	1166–1217	1191,5
E5a	1166–1186	1176,5
E5b	1186–1217	1207,14

Iš 1.3–1.4 lentelės bei 1.7 pav. matoma, kad artimiausias GPS L1 dažnių ruožui yra Europos sąjungos GALILEO E1 bei Kinijos BeiDou palydovinės navigacijos sistemos (angl. *BeiDou Navigation Satellite System*, toliau BDS) B1C signalų dažnių ruožai. Taip pat matoma, kad BDS B1C yra plačiausias dažnių ruožas ties 1575.42 MHz centriniu dažniu, o GPS L1 – siauriausias. GPS L2 signalų ruožui nėra analogų arba to paties centrinio dažnio signalų tiek GALILEO, tiek BDS GNSS. O GPS L5 signalų dažnių ruožui yra artimiausi GALILEO E5a bei BDS B2a signalų dažnių ruožai. Matoma, kad E5a ir B2a signalai turi analogiškus dažnių ruožus bei centrinius dažnius, o L5 signalų dažnių ruožas yra plačiausias ties 1176.45 MHz centriniu dažniu. Taip pat matoma, kad Japonijos kvazi-zenito palydovinės sistemos (angl.

Quasi-Zenith Satellite System, toliau QZSS), L1, L2C bei L5 signalai ir GPS L1, L2 ir L5 signalai turi analogiškus dažnių ruožus bei centrinius dažnius.

Yra ir daugiau GNSS, sukurtų kitų šalių, tokių kaip:

- GALONASS. Šalis: Rusija;
- IRNSS – Indijos regioninė palydovinė navigacijos sistema (angl. *Indian Regional Navigation Satellite System*). Šalis: Indija.

Šiuolaikiniai, modernūs GPS imtuvai geba priimti signalus pavaizduotus 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Šiuolaikinių GPS imtuvų priimami signalai (Badran, 2022) (*Navigating the L1, L2 ..., 2024*).

GNSS Įrenginiai	GPS	GALONASS	BDS	GALILEO	QZSS	IRNSS
Komerciniai/Industriiniai	L1, L1C, L2C	L1, L2OF	B1, B2	E1, E5b	-	-
Naudotojo/Komerciniai	L1, L1C, L5	L1	B1	E5b	-	-
Naudotojo/Komerciniai (tik Indijos subkontinentui)	L1, L1C	L1	B1	E5a	-	L1C, L5
Didelio tikslumo	L1, L1C, L2, L2C	L1, L2	B1, B2, B3	E1, E5, E6	L1C, L6	L1C, L5

Galima paminėti, kad dauguma rinkoje randamų visuomenės reikmėms naudojamų įrenginių naudoja GPS L1 signalą (*Navigating the L1, L2 ..., 2024*).

1.4. Pasirinktų GPS sekiklių analizė ir palyginimas

Šiuo metu rinkoje yra daug lengvų ir palyginti nedidelių GPS sekiklių, pagamintų naudojant PCB. Pagrindiniai tokie įrenginiai yra skirti naminių gyvūnų priežiūrai, mažiausi tokie įrenginiai yra skirti naminiams gyvūnams – katėms. Toliau bus lyginami išsirinkti keli GPS sekikliai:

- Tractive CAT Mini;
- Jiobit Smart Tag;
- Eureka Marko Polo Pet;
- Weenect XS;
- Cube GPS Tracker.

1.5 lentelėje palyginami pagrindiniai GPS sekiklių parametrai, tokie kaip:

- Dydis: ilgis x plotis x storis, mm;
- Svoris: g;

- Ryšio tipas: 2G, 3G, 4G, 5G, Bluetooth, Wi-Fi;
- Baterijos veikimo laikas: val.;
- Atsparumas drėgmei;
- Valdymas: išmaniojo telefono programėle arba valdymo pultu.
- Veikimo atstumas: ribotas arba neribotas.

Visi 1.5. lentelėje aprašomi sekiklių parametrai buvo gauti iš gamintojų tinklapių .

Lentelės simbolių paaiškinimas:

- Pateiktas parametras: ✓ ;
- Nepateiktas parametras: ✗ ;
- Nėra informacijos: ■ .

1.5 lentelė. GPS sekiklių pagrindinių parametų palyginimas (*Tractive*, 2025) (*Jiobit Smart Tag*, 2025) (*Eureka Marco Polo ...*, 2025) (*Weenect XS*, 2025) (*Cube GPS Tracker*, 2025).

Gamintojas Parametrai	Tractive	Jiobit	Eureka	Weenect	Cube
Dydis, mm	55 x 28 x 17	37 x 50 x 12	127 x 25.4 x 12.7	60.5 x 24.5 x 15	69.9 x 39.9 x 16.3
Svoris, g	25	18	22.7	27	63
2G	✓	✗	■	✓	✗
3G	✗	✗	■	✗	✗
4G	✓	✓	■	✓	✓
5G	✗	✓	■	✓	✗
Bluetooth	✓	✓	■	✗	✗
Wi-Fi	✓	✓	■	✗	✗
Baterijos veikimo laikas, val.	iki 168	iki 720	iki 1080	iki 240	iki 1440
Apsaugos kodas	IPX7	✓	IP67	IP68	IP67
Valdymas	Programėlė	Programėlė	Pultas	Programėlė	Programėlė
Veikimo atstumas	Neribotas	Neribotas	Ribotas	Neribotas	Neribotas

Iš 1.5 lentelės duomenų matoma, kad mažiausias GPS sekiklis yra Tractive CAT Mini, o didžiausias – Eureka Marko Polo Pet. Mažiausio svorio sekiklis yra Jiobit Smart Tag, o sunkiausias – Cube GPS Tracker.

Nepaisant to, kad visų sekiklių baterijų veikimo laikai iš pirmo žvilgsnio atrodo ganėtinai ilgi, tačiau šie duomenys nurodo maksimalius baterijų veikimo laikus, kai įrenginiai yra mažos energijos veikimo būsenose. Visų įrenginių baterijų veikimo laikai ženkliai sumažėja, kai įrenginiai veikia visu pajėgumu, t. y. įrenginiai yra sekimo režimuose. Eureka Marko Polo Pet ir Weenect XS sekikliai sekimo režime gali veikti iki 3 dienų, kitų sekiklių gamintojai specifinių baterijos veikimo laikų sekimo režimuose nenurodo. Iš gamintojų pateiktų duomenų matoma, kad sekiklių baterijų veikimo laikai priklausys nuo naudotojo nustatytų parametrų ir naudojimo tipo.

Visi sekikliai išskyrus Eureka Marko Polo Pet yra valdomi naudojant programėles ir turi neribotus veikimo atstumus, nes šie sekikliai turi įdiegtas SIM korteles. GPS sekiklių, kurie yra valdomi programėlėmis, naudotojai privalo turėti gamintojų programėlių mokamas prenumeratas, norėdami naudotis įrenginiais. O Eureka Marko Polo Pet sekiklis yra valdomas pultu ir neturi mokamos prenumeratos, tačiau šis sekiklis turi limituotą valdymo atstumą – priemiesčio zonose ~610 m; atvirame, kalvotame reljefe su mažai kliūčių iki ~1.6 km ; atvirame, plokščiame reljefe su mažai kliūčių iki ~3.2 km (*Eureka Marco Polo ...*, 2025). Iš gamintojo pateiktų Eureka Marko Polo Pet valdymo atstumų matoma, kad sekiklis itin prastai veiktų miestuose, nes veikimui trukdytų pastatai. Dalis gamintojų nurodo sekiklių lokacijos nustatymo tikslumą. Jiobit Smart Tag sekiklio lokacijos nustatymo tikslumas yra nuo ~0.3 m iki ~15.2 m, Cube GPS Tracker sekiklio – iki ~305 m (*Jiobit Smart Tag*, 2025).

Visi aptarti sekikliai yra atsparūs drėgmei ir dalis iš jų turi atitinkamą apsaugą nuo išorinių kietųjų dalelių (*IP Code*, 2025). Tractive CAT Mini, Eureka Marko Polo Pet ir Cube GPS Tracker sekikliai turi apsaugos kodus atitinkamai IPX7, IP67 ir IP67, kurie nurodo, kad įrenginiai gali būti panardinti į vandenį iki 1–1,5 m gylio, 30 min, be jokios žalos įrenginiams (*IP Code*, 2025). Tačiau Tractive CAT Mini sekiklis neturi apsaugos nuo kietųjų dalelių, o Cube GPS Tracker ir Eureka Marko Polo Pet turi maksimalų apsaugos nuo kietųjų dalelių lygį.

Weenect XS sekiklis, su apsaugos kodu IP68, gali būti panardintas į vandenį ~1 – 3 m 1.5 m gylio, daugiau nei 30 min, be jokios žalos įrenginiui bei turi maksimalų apsaugos nuo kietųjų dalelių lygį (*IP Code*, 2025). O Jiobit Smart Tag sekiklio gamintojas nurodo, kad įrenginys yra atsparus drėgmei, tačiau nenurodo specifinio IP indekso, todėl, tikėtina, šio įrenginio atsparumas drėgmei ir kietosioms dalelėms yra daug mažesnis, palyginus su visais kitais aptartais sekikliais.

Visi sekikliai valdomi programėlėmis yra valdomi naudojant išmanųjį telefoną su Android arba iOS operacinėmis sistemomis. Tačiau Weenect XS sekiklis turi galimybę būti valdomas naudojant internetinį tinklą visose naršyklėse. Visos valdymo programėlės, internetiniai tinklapiai ir valdymo pultai duoda naudotojui galimybę nustatyti virtualias

saugumo zonas, kurias augintiniui peržengus iššaukiami įspėjimai. Sekikliai valdomi programėlėmis arba internetiniais tinklapiais duoda galimybę prie įrenginių prisijungti neribotam skaičiui naudotojui. O Eureka Marko Polo Pet sekiklis, valdomas pultu, duoda galimybę prie įrenginio prisijungti daugiausia 3 naudotojams. Visi sekikliai turintys Bluetooth ir Wi-Fi komunikaciją turi galimybę atitinkamai geriau identifikuoti sekiklio lokaciją įrenginiui esant arti naudotojo (Bluetooth ryšys) bei taupyti baterijos energiją (Wi-Fi ryšys). Svarbu paminėti, kad visi aptarti GPS sekikliai yra pagaminti naudojant PCB.

Šiame darbe aprašomas GPS sekiklis, norint kaip įmanoma sumažinti sekiklio dydį, yra gaminamas naudojant SSAIL technologiją. Siekiamas GPS sekiklio svoris yra ne didesnis nei 30 g. Taip pat sekiklyje bus integruotas SIM kortelės laikiklis, leidžiantis naudotojui įdėti norimo lokalaus tiekėjo SIM kortelę.

Sekiklio ryšio galimybės yra 2G, 3G, 4G ir, esant galimybei, 5G. Platus ryšio pasirinkimas užtikrina galimybę naudotojui komunikuoti su sekikliu vadinamose ryšio duobėse, kur komunikacija dėl kliūčių yra silpna ir todėl to reikia naudoti 2G, 3G ir 700 MHz dažnio 4G komunikacijos ryšius, kurie geriau prasiskverbia per kliūtis (*Frequency Range of 2g 3g 4g 5g*, 2023). Siekiama, sukurto GPS sekiklio, minimalų baterijos veikimo laiką turėti ilgesnį nei 7 dienas, taip užtikrinant naudotojui nedažno baterijos krovimo galimybę. Ilgesnis nei 7 parų veikimo laikotarpis gali būti užtikrinamas programuojant GPS sekiklį siųsti naudotojui duomenis tik gavus užklausą ir neiekvoti baterijos resursų nuolatiniam duomenų siuntimui.

2. GPS L1 PLANARINIŲ ANTENŲ, NAUDOJANT SSAIL TECHNOLOGIJĄ, KŪRIMAS IR TYRIMAS

Prieš projektuojant GPS L1 dažnio antenas buvo išsirinktos PA 2200, PTFE ir PEEK medžiagos. Pasirinktų medžiagų elektriniai, vandens absorbcijos, šiluminiai ir mechaniniai parametrai gauti iš gamintojų aprašymų, kurie buvo pateikti tiekėjų, ir aprašyti 2.1–2.3 lentelėse.

Kaip matoma, iš 2.1 lentelės duomenų PA 2200 pasižymi prasčiausiomis elektrinėmis savybėmis palyginus su PTFE ir PEEK, nes šios medžiagos dielektrinė konstanta ir dielektrinių nuotolių koeficientas yra matuojama palyginti žemuose dažniuose (1 kHz) bei dielektrinių nuotolių koeficientas (0,05–0,09) ir vandens absorbcija (0,52–1,93 %) yra dideli palyginus su PTFE ir PEEK medžiagų parametrais (PEEK $\tan\delta = 3 \cdot 10^{-3}$, vandens absorbcija 0,4 %). Svarbu paminėti, kad PTFE dielektrinių nuotolių koeficiento ir vandens absorbcijos parametrai yra laikoma itin mažais (pvz., PTFE vandens absorbcija 0 %, $\tan\delta = 2 \cdot 10^{-4}$), todėl dauguma gamintojų šių parametru neaprašinėja (Zarobsky, 2023) (*Dissipation Factor ...*, 2025).

2.1 lentelė. Pasirinktų medžiagų elektriniai ir vandens absorbcijos parametrai.

Dielektrikas Parametrai	PA 2200	PTFE G400	PEEK
Gamintojas	EOS GmbH	Guarniflon® S.p.A	GEHR Plastics Inc.
ϵ_r režiai	3,8	2,05–2,1	3,2
Dielektrinių nuotolių ($\tan\delta$) režiai	0,05–0,09	-	0,003
ϵ_r ir $\tan\delta$ matavimo dažnis	1 kHz	60 Hz–1 MHz	1 MHz
Pasirinkta ϵ_r	3,8 (1 kHz)	2,075 (1 MHz)	3,2 (1 MHz)
Pasirinktas $\tan\delta$	0,07 (1 kHz)	-	0,003 (1 MHz)
Vandens absorbcija, %	0,52–1,93	-	0,4

Analizuojant pasirinktų medžiagų šiluminius parametrus (2.2 lentelė), matoma, kad geriausius šiluminius parametrus turi PEEK ir PTFE (maksimali darbinė temperatūra 260 °C). O PA 2200 turi prasčiausius šiluminius parametrus ($T_d = 176$ °C) palyginus su PTFE ir PEEK medžiagų šiluminiais parametrais (PEEK $T_d = 340$ °C). Nepaisant to, kad gamintojas neaprašo PTFE lydymosi temperatūros, tačiau iš darbinės temperatūros diapazono matoma, kad PTFE lydymosi temperatūra yra didesnė negu 260 °C.

2.2 lentelė. Pasirinktų medžiagų šiluminiai parametrai.

Dielektrikas Parametrai	PA 2200	PTFE G400	PEEK
Darbinė temperatūra, °C	-	-200–260	260 (max)
T_g , °C	163–181	-	143
T_d , °C	176	-	340
CTE ppm/°C	-	120–130 (25–100 °C)	47
Šiluminis laidumas (paralelei dielektriko plokštumai), (W/(m·K))	0,127	-	0,25
Šiluminis laidumas (statmenai dielektriko plokštumai), (W/(m·K))	0,144		

Kaip matoma iš 2.3 lentelės, PA 2200 dielektrikas yra pagamintas naudojant 3D spausdinimo technologiją. PTFE dielektrikas pagamintas iš 2 mm storio PTFE lakštų, juos supjausčius į 100x100 mm plokšteles ir frezuojant vieną plokštelės pusę, tol kol plokštelės storis gaunamas 1,2 mm. PEEK dielektrikas pagamintas iš 5 mm storio PEEK lakštų, juos supjausčius į 100x100 mm plokšteles ir frezuojant abi plokštelės puses, tol kol plokštelės storis gaunamas 1,2 mm. PEEK plastiko plokštelės frezuotos iš abiejų pusių, nes kitaip plokštelių kraštai pradeda lūžinėti.

2.3 lentelė. Pasirinktų medžiagų gamybos tipas ir mechaniniai parametrai bei savybės.

Dielektrikas Parametrai	PA 2200	PTFE G400	PEEK
frezuotas	Ne	Taip	Taip
Išlietas	Ne	Taip	Taip
3D spausdintas	Taip	Ne	Ne
Paviršiaus smėliavimas	Taip	Ne	Ne
Paviršiaus dažymas	Dalis plokščių taip	Ne	Ne
Pradinis medžiagos storis, mm	1,2	2	5
Galutinis medžiagos storis (h), mm	1,2		

Dielektrikas Parametrai	PA 2200	PTFE G400	PEEK
Plokštės plotis, mm	100		
Plokštės ilgis, mm	100		

1,2 mm medžiagų storiai pasirinkti, atsižvelgiant į standartinių PCB (su FR-4 dielektriku) gamintojų pateiktus leidžiamus storius dviejų sluoksnių plokštėms su FR-4 dielektriku. 2.4 lentelėje pateikti pasirinktų JLPCB ir PCBWay gamintojų siūlomi 2 sluoksnių PCB su FR-4 dielektriku. Kadangi norima sukurti kaip įmanoma mažesnę GPS sekiklį, tačiau suderinti sekiklio dydį su patvarumu, buvo pasirinktas 1,2 mm storio dielektrikas.

2.4 lentelė. JLPCB ir PCBWay gamintojų siūlomi 2 sluoksnių PCB su FR-4 dielektriku (*JLPCB*, 2025) (*PCBWay*, 2025).

Gamintojas	PCB storiai, mm
JLPCB	0,4 ; 0,8 ; 1,0 ; 1,2 ; 1,6 ; 2,0
PCBWay	0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1,0 ; 1,2 ; 1,6 ; 2,0 ; 2,4 ; 2,6 ; 2,8 ; 3,0 ; 3,2

2.1. Stačiakampių planariųjų antenų parametrų skaičiavimai

Visi antenų parametrų skaičiavimai buvo atliekami remiantis skaičiavimų eigoje nurodytais šaltiniais ir naudojant *MATLAB Online* programą, programos kodas pateiktas B priede.

Pirmiausia atliekami GPS L1 dažnio elektromagnetinių bangų parametrų skaičiavimai (Balanis, 2005):

$$f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{1575,42 \cdot 10^6} = 190,425 \text{ mm}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2)$$

čia:

f_0 – elektromagnetinės bangos dažnis, MHz;

c – šviesos greitis;

λ_0 – elektromagnetinės bangos ilgis;

k_0 – elektromagnetinės bangos skaičius.

2.5 lentelė. Apskaičiuoti GPS L1 dažnio elektromagnetinės bangos parametrai.

f_0, Hz	$c, \text{m/s}$	λ_0, m	$k_0, \text{rad/s}$
$1575,72 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^8$	$190,425 \cdot 10^{-3}$	32,996

Apskaičiavus GPS L1 dažnio elektromagnetinės bangos parametrus (2.5 lentelė). Toliau skaičiuojami stačiakampės planariosios antenos ilgis (L) bei plotis (W) remiantis Balanio aprašyta planariųjų antenų teorija (Balanis, 2005) ir dielektrikų parametrų 2.1 lentelė.

Apskaičiuojamas antenos plotis:

$$f_r = f_0 \quad (3)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

čia:

f_r – antenos centrinis dažnis;

W – antenos plotis.

Apskaičiuojamas antenos ilgis:

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}} \quad (5)$$

$$\Delta L = h \cdot 0,412 \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (7)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} - 2 \cdot \Delta L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} - 2 \cdot \Delta L \quad (8)$$

čia:

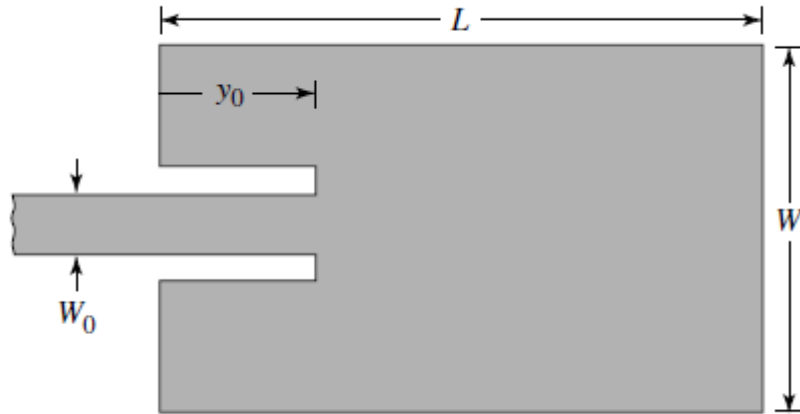
$\epsilon_{r_{eff}}$ – dielektriko efektinė dielektrinė konstanta kai $\frac{W}{h} > 1$;

ΔL – skirtumas tarp antenos efektinio ir realaus ilgio;

λ – elektromagnetinės bangos ilgis dielektrike;

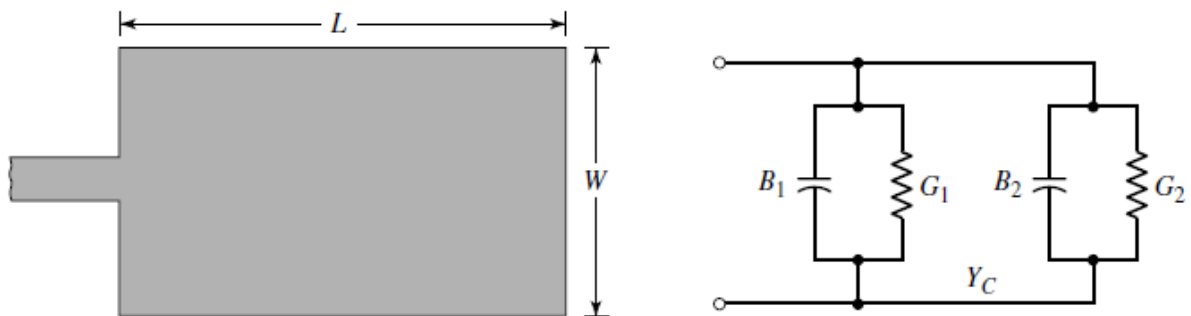
h – dielektriko storis.

Norint suderinti stačiakampės planariosios antenos įėjimo impedansą su maitinimo mikrojuostelinės linijos impedansu (50Ω), padaromos impedanso suderinamumo iškarpos tarp mikrojuostelinės maitinimo linijos kraštų bei antenos (2.1 pav.).



2.1 pav. Stačiakampė planarioji antena su impedanso suderinamumo iškarpomis (Balanis, 2005).

Impedanso suderinamumo iškarpų parametrų skaičiavimas yra atliekamas remiantis Balanio aprašyta planariųjų antenų teorija (Balanis, 2005). Pradžioje, yra analizuojama ekvivalentinė mikrojuostelinės antenos schema (2.2 pav.).



2.2 pav. Stačiakampės planariosios antenos ekvivalentinė schema (Balanis, 2005).

Iš 2.2 pav. ekvivalentinės schemos matoma, kad planarioji stačiakampė antena yra sudaryta iš susceptansų B_1 ir B_2 bei konduktansų G_1 ir G_2 . B_1 ir G_1 yra antenos įėjimo grandinės dalis, o B_2 ir G_2 yra antenos išėjimo grandinės dalis. Mikrojuostelinės antenos pilnutinis admitansas yra žymimas Y_C . (Balanis, 2005)

Mikrojuostelinės stačiakampės antenos išpjovos skaičiavimas yra atliekamas remiantis Balanio aprašyta planariųjų antenų teorija (Balanis, 2005):

$$G_1 = \frac{I_1}{120 \cdot \pi^2} \quad (9)$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (10)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120 \cdot \pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (11)$$

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (12)$$

$$L_0 = y_0 = \frac{\arccos\left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}}}\right) L}{\pi} \quad (13)$$

čia:

G_1 – antenos įėjimo konduktansas;

I_1 – antenos įėjimo srovė;

G_{12} – antenos abipusis konduktansas;

R_{in} – antenos įėjimo varža;

L_0 – impedanso suderinamumo iškarpos ilgis.

Galiausiai apskaičiuojamas 50 Ω planariosios antenos maitinimo linijos plotis ir ilgis remiantis atitinkamai (Alam et al., 2019) ir šaltiniais (Balanis, 2005) (Ali et al., 2011) (Ellingson, 2018). Pradžioje apskaičiuojamas mikrojuostelinės maitinimo linijos susceptansas:

$$B = \frac{60 \cdot \pi^2}{50 \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (14)$$

čia:

B – antenos įėjimo konduktansas.

Šiuo atveju susceptanco formulė yra modifikuota, taip kad teoriniai mikrojuostelinės linijos pločio skaičiavimai, ku labiau atitiktų internetinio impedanso skaičiuotuvo išduodamus rezultatus (*Impedance Calculator ...*, 2025). Todėl, vietoje efektinės dielektrinės konstantos, lygtyje yra naudojama dielektrinė konstanta:

$$B = \frac{60 \cdot \pi^2}{50 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (15)$$

Toliau skaičiuojami mikrojuostelinės maitinimo linijos plotis, minimalus bei rekomenduojamas ilgiai:

$$W_m = W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (16)$$

$$L_f = \frac{6h}{2} \quad (17)$$

$$L_m = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (18)$$

čia:

W_m – mikrojuostelinės maitinimo linijos plotis;

L_f – mikrojuostelinės maitinimo linijos minimalus ilgis;

L_m – mikrojuostelinės maitinimo linijos rekomenduojamas ilgis;

Papildomai apskaičiuojami antenos pagrindo minimalūs ilgis bei plotis (Ali et al., 2011):

$$W_g = 6h + W \quad (19)$$

$$L_g = 6h + L \quad (20)$$

čia:

W_g – antenos pagrindo minimalus plotis.

L_g – antenos pagrindo minimalus ilgis.

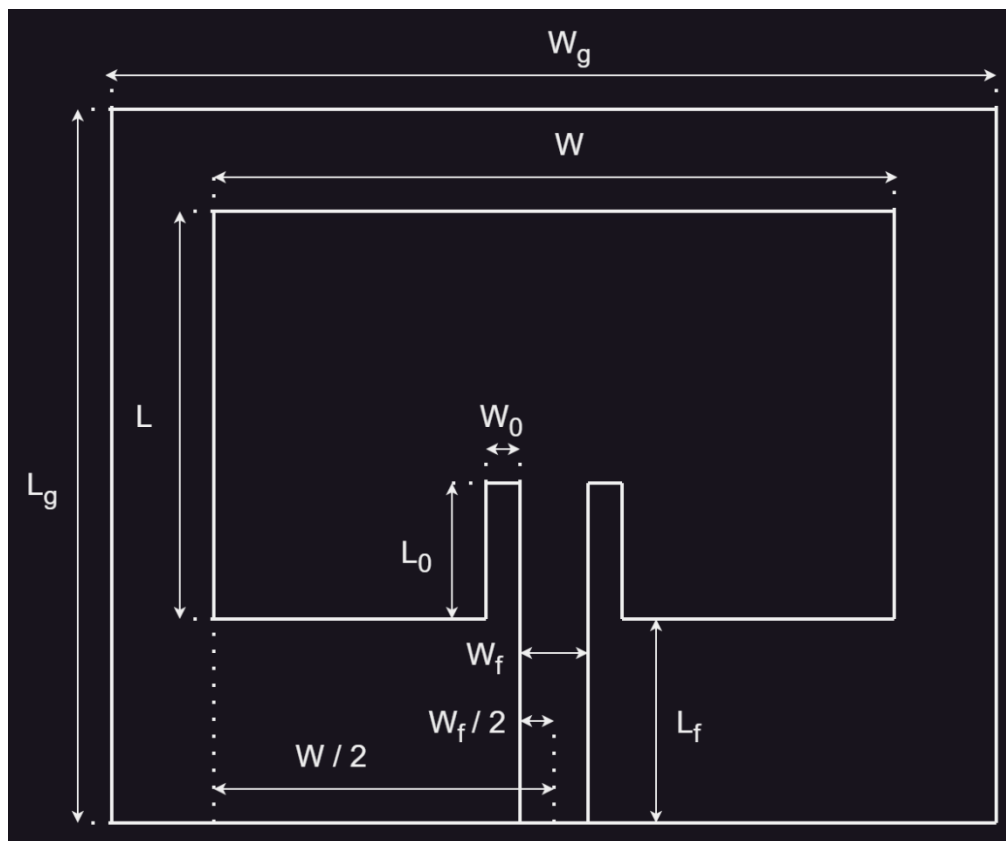
Iš pateiktų formulių apskaičiuojami stačiakampių planarijų antenų parametrai remiantis antenų pagrindo medžiagų 2.1, 2.3 ir 2.5 lentelėmis. Šios antenos projektuojamos ant PA 2200, PTFE G400 ir PEEK dielektrikų. Apskaičiuoti stačiakampių planarijų antenų parametrai aprašyti 2.6 lentelėse ir antenų projektavimui skirtas brėžinys pavaizduotas 2.3 pav.

Svarbu paminėti, kad planarijų stačiakampių antenų impedanso suderinamumo iškarpų plotis W_0 yra pasirinktas, remiantis (Ijmter, 2014) šaltinio optimizuotais iškarpų pločiais.

2.6 lentelė. Apskaičiuoti stačiakampių antenų, su skirtingais dielektrikais, parametrai.

Dielektrikas	PA 2200	PTFE G400	PEEK
Antenų parametrai			
f_r , MHz	1575,42		
ϵ_r	3,8	2,1	3,2
h , mm	1,2		
W , mm	61,46	76,477	65,703
L , mm	48,628	65,141	52,938
L_0 , mm	17,795	22,846	19,076
W_0 , mm	1		
W_m , mm	2,557	3,81	2,886

Dielektrikas Antenų parametrai	PA 2200	PTFE G400	PEEK
L_m , mm	24,884	33,213	27,055
L_f , mm	3,6	3,6	3,6
W_g , mm	68,66	83,677	72,903
L_g , mm	55,828	72,341	60,138



2.3 pav. Stačiakampės planariosios antenos brėžinys pagal apskaičiuotus parametrus.

2.2. Antenų modeliavimas

Antenų modeliavimas atliekamas, naudojant *ADS Keysight 2025* programinę įrangą. Modeliavimo tikslas – patikrinti ar teoriškai apskaičiuoti antenų matmenys gali būti naudojami GPS L1 dažnio antenų kūrimui be papildomų modeliavimų.

Modeliavimo metu bus analizuojami du pagrindiniai antenų parametrai: antenos įėjimo impedansas ir S_{11} parametras. Teoriškai apskaičiuotų antenų matmenų tinkamumas GPS L1

dažnio antenoms bus analizuojamas, remiantis S_{11} parametro verte tie GPS L1 centriniu dažniu ir antenos jėgimo impedanso suderinamumu su $50\ \Omega$ šaltinio impedansu.

Modeliavimas atliekamas keliais etapais:

1. Sukuriama antenos schema;
2. Schemoje aprašomi antenos parametrų kintamieji su teoriškai apskaičiuotais antenos parametrais;
3. Sukuriamas antenos topologijos modelis su pasirinktu dielektriku;
4. Nustatomi antenos elektromagnetinio modeliavimo parametrai: pasirenkamas dielektrikas, modeliuojamas dažnių ruožas ir kiti;
5. Atliekamas antenos topologijos modelio elektromagnetinis modeliavimas ir sukuriama antenos elektromagnetinis modelis ir schematinis komponentas.
6. Nusibraižoma S_{11} parametro modeliavimo schema, kurioje bus modeliuojami ir, esant poreikiui, optimizuojami pasirinktos antenos parametrai.
7. Nusibraižoma TDR modeliavimo schema, kurioje bus modeliuojami ir, esant poreikiui, optimizuojami pasirinktos antenos parametrai.

2.2.1. PA 2200 GPS L1 antenos modeliavimas

Iš pradžių *ADS Keysight* programoje aprašomi PA 2200 medžiagos elektriniai ir šiluminiai parametrai (2.4 pav.). Pagrindiniai medžiagų parametrai, tokie kaip dielektrinė konstanta ir dielektrinių nuotolių tangentas, aprašomi remiantis 2.1–2.3 lentelėmis.

Material Definitions						
View Technology for this Library: Discontinuity_lib						
Conductors Dielectrics Semiconductors Superconductors Surface Roughness						
Material		Permittivity (ϵ_r)			Permeability (μ_r)	
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary
PA2200	Discontinuity_lib	3.8		0.07	1	

Djordjevic				Thermal Properties		
Type	TanD Freq	Low Freq	High Freq	Conductivity (k)	Z Conductivity (k)	Heat Capacity (Cv)
Svensson/Djordjevic	1 KHz	0.1 KHz	1 THz	0.127 W/mK	0.144 W/mK	2185.5E+6 J/m³K

2.4 pav. PA 2200 medžiagos parametrų aprašymas (*ADS Keysight*).

PA 2200 dielektrikui papildomai apskaičiuojamas tūrinio šiluminio talpumo (angl. *Heat Capacity*) parametras (*Volumetric Heat Capacity*, 2025) (*Specific Heat Capacity*, 2025):

$$C_v = \rho \cdot C_p \quad (21)$$

čia:

C_v – tūrinis šiluminis talpumas;

ρ – medžiagos tankis;

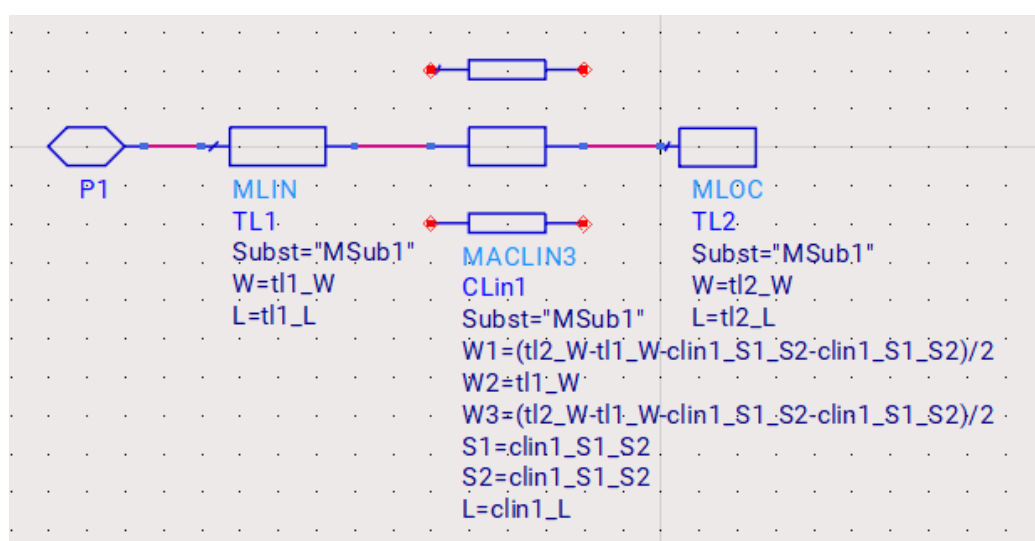
C_p – specifinis šiluminis talpumas/specifinis šiluminis parametras.

2.7 lentelė. Apskaičiuotas PA 2200 tūrinis šiluminis talpumas.

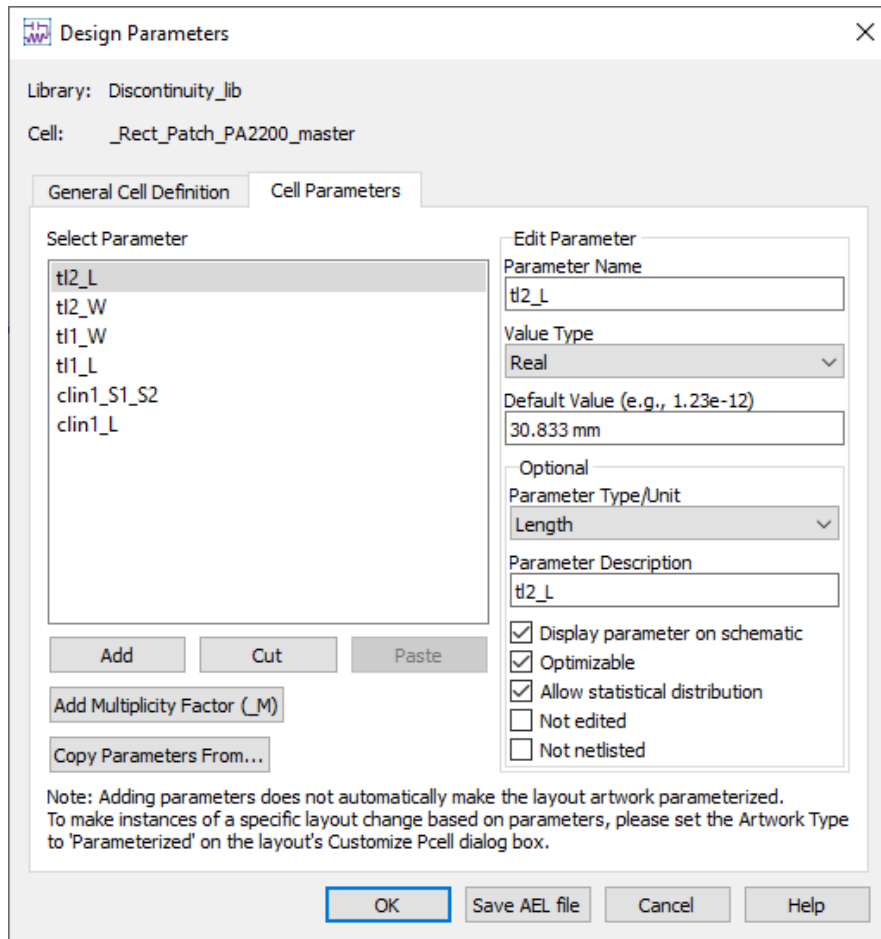
$C_v, \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$C_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$
$2185,5 \cdot 10^6$	$930 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$

Papildomi PA 2200 medžiagos parametrai, tokie kaip tankis ir specifinis šiluminis talpumas, gaunami iš gamintojo aprašymo. Tūrinis šiluminis talpumas – tai energijos kiekis, kuris turi būti pridėtas šilumos pavidalu prie 1 m^3 medžiagos tūrio, kad medžiagos temperatūra padidėtų vienu kelvinu (*Volumetric Heat Capacity*, 2025). Specifinis šiluminis talpumas – tai šilumos kiekis, kuris turi būti pridėtas prie 1 kg medžiagos, kad medžiagos temperatūra padidėtų vienu kelvinu (*Specific Heat Capacity*, 2025). Apskaičiuotas PA 2200 medžiagos tūrinis šiluminis talpumas aprašytas 2.7 lentelėje. Aprašius medžiagų parametrus *ADS Keysight* programoje, pradedamas antenų modeliavimas.

Iš pradžių sukuriami stačiakampės planariosios antenos schema, naudojant schemas mikrojuostelinių linijų komponentus (2.5 pav.). Schemoje sukuriami antenos parametrų kintamieji (2.6 pav.) su teoriškai apskaičiuotomis PA 2200 antenos parametrų vertėmis (2.6 lentelė.)



2.5 pav. PA 2200 antenos schema (*ADS Keysight*).



2.6 pav. PA 2200 antenos schemos parametrų kintamieji (ADS Keysight).

PA 2200 antenos schemoje aprašytų parametrų kintamųjų (2.6 pav.) ir teoriškai apskaičiuotų antenos parametrų (2.3 pav., 2.6 lentelė) sąryšio funkcijos yra šios:

$$tl1_W = W_f \quad (22)$$

$$tl1_L = L_f \quad (23)$$

$$clin1_S1_S2 = W_0 \quad (24)$$

$$clin1_L = L_0 \quad (25)$$

$$tl2_W = W \quad (26)$$

$$tl2_L = L - L_0 \quad (27)$$

Antenos MACLIN3 schematinio komponento $W1$ ir $W3$ pločiai apskaičiuojami naudojant šią funkciją:

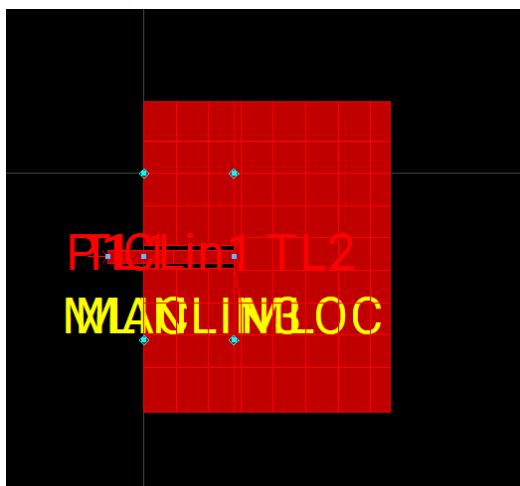
$$W1 = W3 = \frac{tl2_W - tl1_W - clin1_S1_S2 - clin1_S1_S2}{2} \quad (28)$$

PA 2200 antenos schemos parametrų kintamieji apskaičiuojami naudojant *MATLAB Online* programą (B priedas). Gautos antenos kintamųjų vertės pavaizduotos 2.8 lentelėje. Sukūrus PA 2200 antenos schemą ir nustačius reikiamas kintamųjų vertes generuojama antenos topologija (2.7 pav.).

2.8 lentelė. PA 2200 antenos schemos parametrų vertės.

PA 2200 antenos schemos parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
<i>tl1_W</i>	2,557
<i>tl1_L</i>	7,089
<i>clin1_S1_S2</i>	1
<i>clin1_L</i>	17,795
<i>tl2_W</i>	61,459
<i>tl2_L</i>	30,833
MACLIN3 W1, W3	28,451

Kaip matoma iš 2.8 ir 2.6 lentelės antenos plotis yra sumažinamas 1 μm , tam, kad antenos MACLIN3 komponento W1 ir W2 pločiai būtų apskaičiuojami su baigtiniu skaitmenų skaičiumi po kablelio.



2.7 pav. PA 2200 antenos topologija (ADS Keysight).

Prieš atliekant antenos topologijos elektromagnetinį modeliavimą, nustatomi modeliavimo parametrai, tokie kaip:

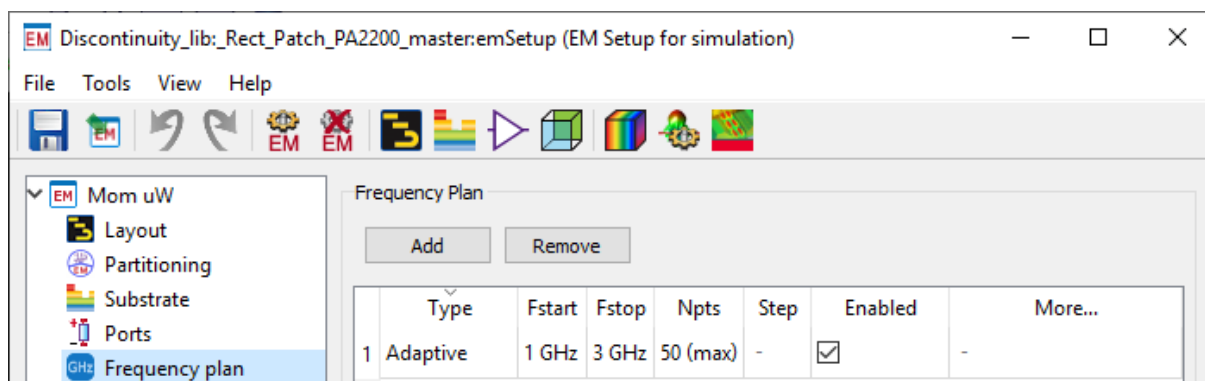
- Dielektrinė medžiaga (2.8 pav.);
- Spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (2.8 pav.);
- Analizuojamas dažnių ruožas (2.9 pav.);
- Schematinis komponentas (2.10 pav.).



Substrate Layer Stackup				
	Type	Name	Material	Thickness
	Dielectric		AIR	
1	Conductor Layer	cond (2)	Copper	7 um
	Dielectric		PA2200	1.2 mm
	Cover		Copper	7 um

2.8 pav. PA 2200 antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (ADS Keysight).

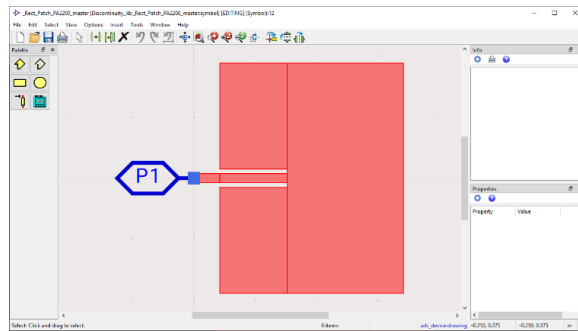
Kaip matoma iš 2.8 pav. antena kuriama ant dviejų sluoksnių 1,2 mm storio PA 2200 plokštės. Numatomas vario sluoksnio storis yra 7 μm .



2.9 pav. PA 2200 antenos topologijos modeliujamas dažnių ruožas (ADS Keysight).

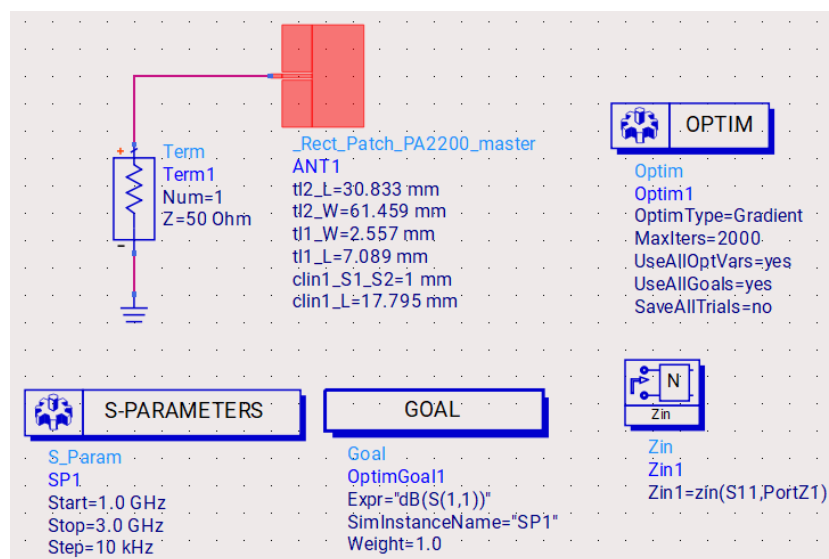
Kaip matoma iš 2.9 pav. PA 2200 antena modeliuojama [1 ; 3] GHz dažnių ruože. Šis dažnių ruožas pasirinktas taip, kad neprailgtų antenos modeliavimo trukmė ir GPS L1 dažnių ruožas įeitų į modeliuojamą dažnių ruožą.

Atlikus PA 2200 antenos modeliavimą gaunamas antenos schematinis komponentas (2.10 pav.) ir elektromagnetinis modelis.



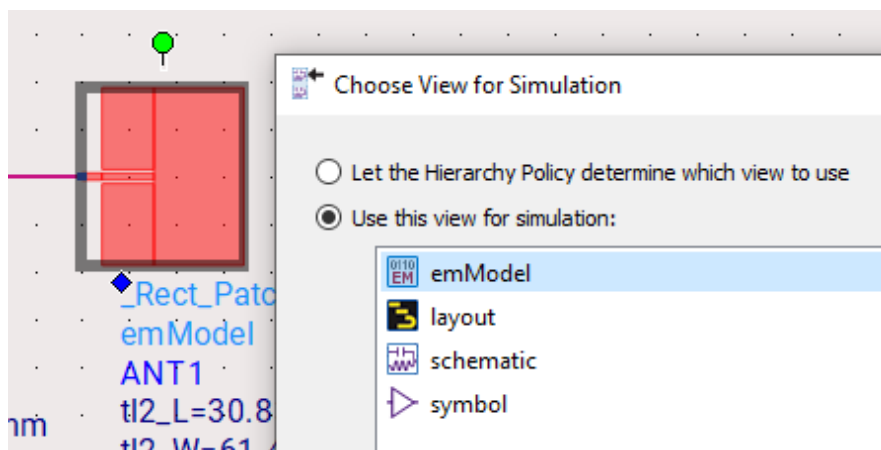
2.10 pav. PA 2200 antenos schemtinis komponentas (ADS Keysight).

Sugeneravus antenos elektromagnetinį modelį atliekamas antenos S_{11} parametro modeliavimas (2.11 pav.).



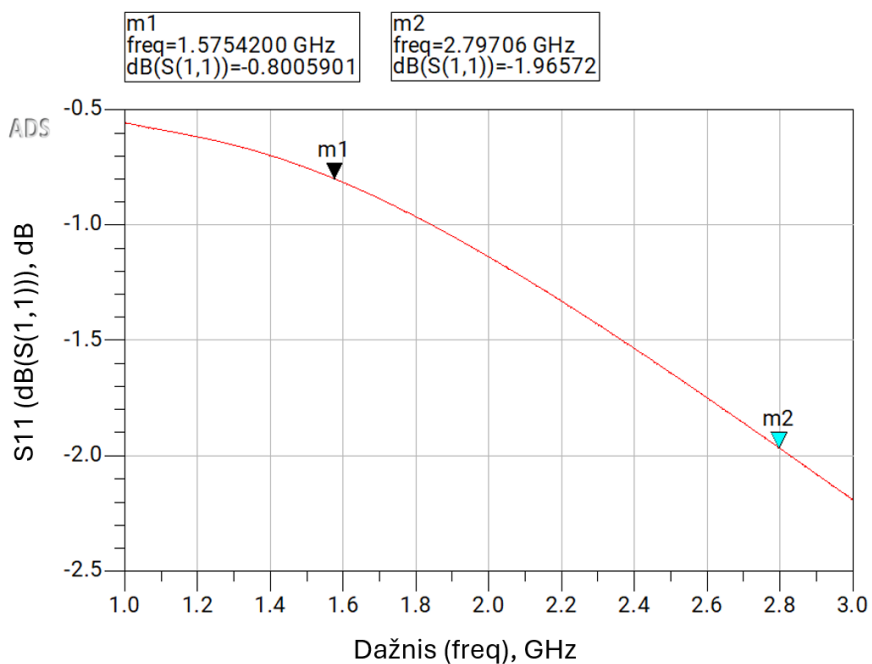
2.11 pav. PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).

Prieš atliekant S_{11} parametro modeliavimą, antenos schematinio komponento modeliavimo tipas pakeičiamas iš schematinio į elektromagnetinį modelį (2.12 pav.).



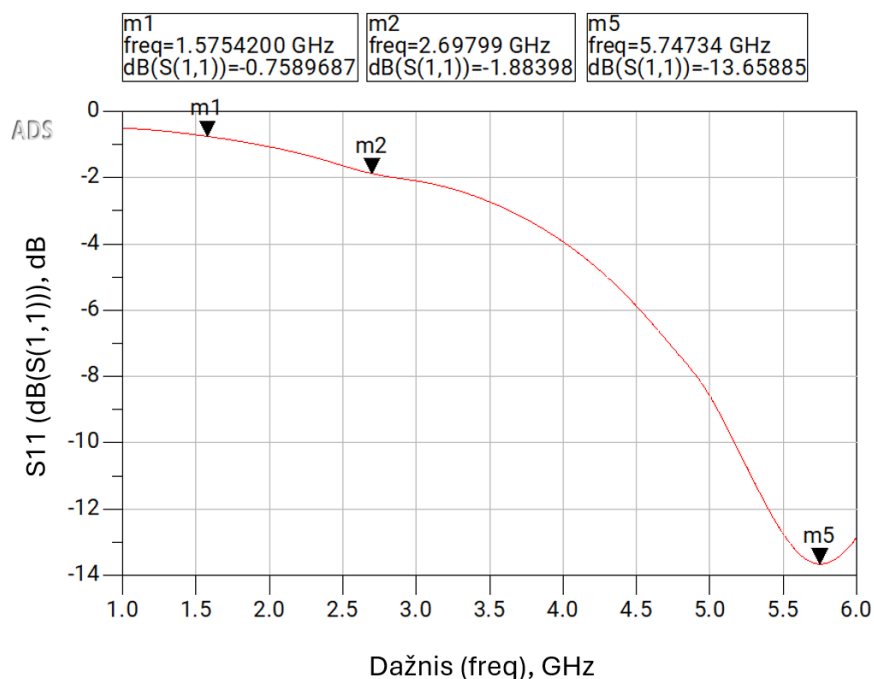
2.12 pav. PA 2200 antenos schematinio komponento modeliavimo tipo keitimas (ADS Keysight).

Atliekamas pradinis antenos modeliavimas [1 ; 3] GHz dažnių ruože ir gaunami rezultatai (2.13 pav.) Iš modeliavimo duomenų matoma, kad reikalingas antenos parametrų optimizavimas, nes nėra nė vieno S_{11} parametro piko [1 ; 3] GHz dažnių ruože.



2.13 pav. Pradiniai PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Prieš optimizuojant PA 2200 anteną, randamas toks modeliuojamas dažnių ruožas kuriame antena turi bent vieną S_{11} parametro piką. Modeliuojamas dažnių ruožas keičiamas tiek topologijos elektromagnetiniame modeliavime, tiek S_{11} parametro modeliavimo schemoje. Šiuo atveju tai yra [1 ; 6] GHz dažnių ruožas. Atlikus PA 2200 antenos modeliavimą pasirinktame dažnių ruože matomas S_{11} parametro -13,66 dB pikas ties 5,747 GHz (m_5) (2.14 pav.)



2.14 pav. PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimas [1 ; 6] GHz dažnių ruože (ADS Keysight).

Radus dažnių ruožą, kuriame matomas bent vienas S_{11} parametro pikas, pradedamas antenos optimizavimas. Pradžioje nustatomas S_{11} parametro optimizavimo tikslas (2.15 pav.), nurodomi optimizuojami parametrai: $tl2_L$, $tl2_W$ ir $clin1_L$, ir atliekamas antenos optimizavimas (2.16 pav.). Iš nurodytų optimizuojamų parametrų matoma, kad pasirinkta optimizuoti antenos ilgį ir plotį.

Iš 2.15 pav. matoma, kad PA 2200 antenos modeliavimo tikslas yra gauti antenos S_{11} parametą [1575,3 ; 1575,5] GHz dažnių ruože ne didesnę negu -20 dB.

Optim Goal Input:13

ads_simulation:Goal Instance Name
OptimGoal1

Goal Information Display

Expression: dB(S(1,1)) Help on Expressions

Analysis: SP1

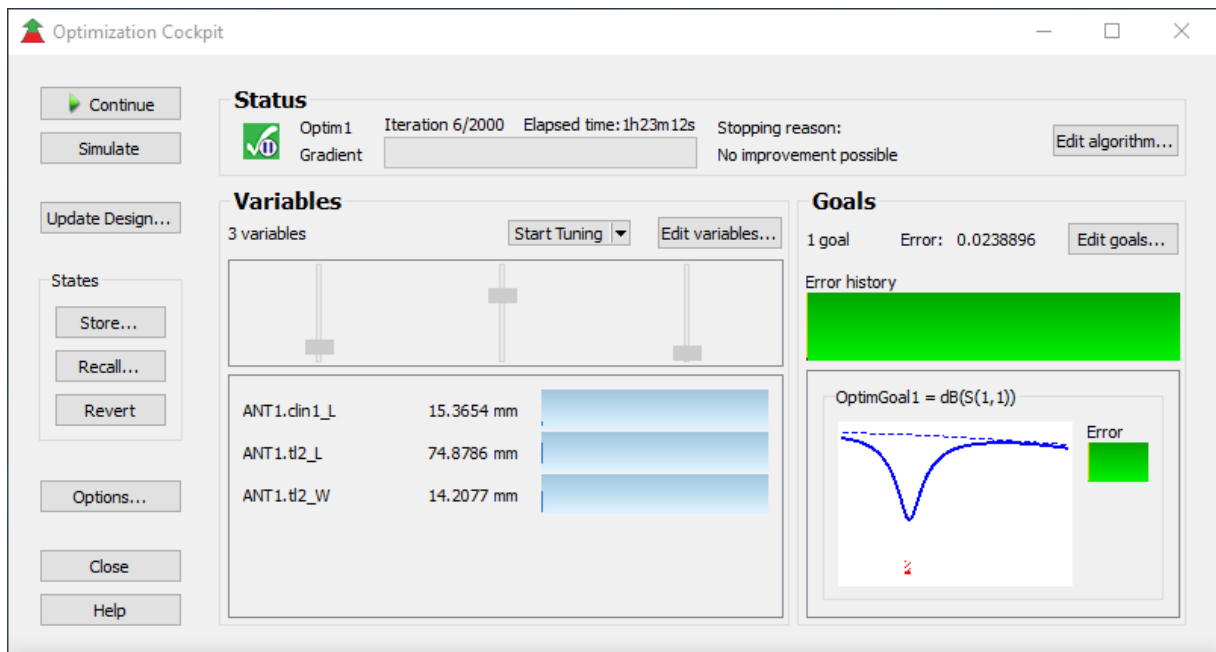
Weight: 1.0

Sweep variables: freq ☒ freq ☐ time Edit...

Limit lines

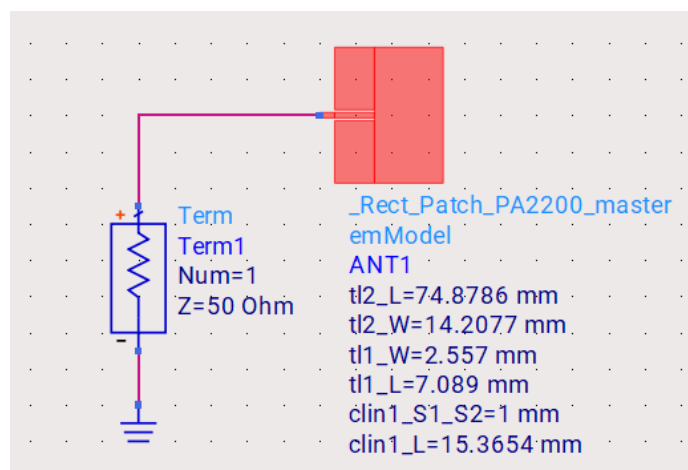
	Name	Type	Min	Max	Weight	freq min	freq max
1	limit1	<		-20	1.0	1.5753G	1.5755G

2.15 pav. PA 2200 antenos modeliavimo tikslo aprašymas (ADS Keysight).

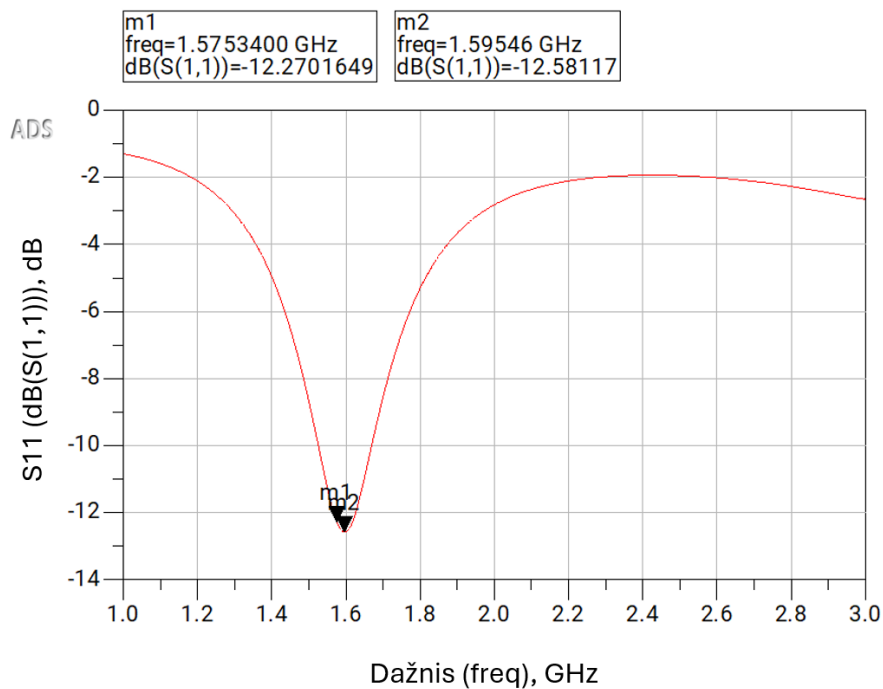


2.16 pav. PA 2200 antenos parametrų optimizavimas (ADS Keysight).

Po sėkmingo optimizavimo atnaujinami antenos parametrai (2.17 pav.) ir kartojamas S_{11} parametro modeliavimas (2.18 pav.) sumažintame [1 ; 3] GHz dažnių ruože. Dažnių ruožas pakeičiamas tiek PA 2200 antenos topologijos modeliavimo parametruose, tiek S_{11} modeliavimo schemoje.



2.17 pav. Po optimizavimo atnaujinti PA 2200 antenos parametrai (ADS Keysight).

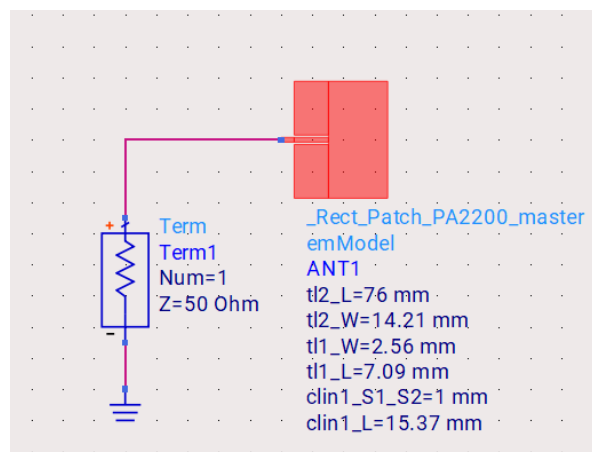


2.18 pav. Optimizuotos PA 2200 antenos S_{11} parametrais (ADS Keysight).

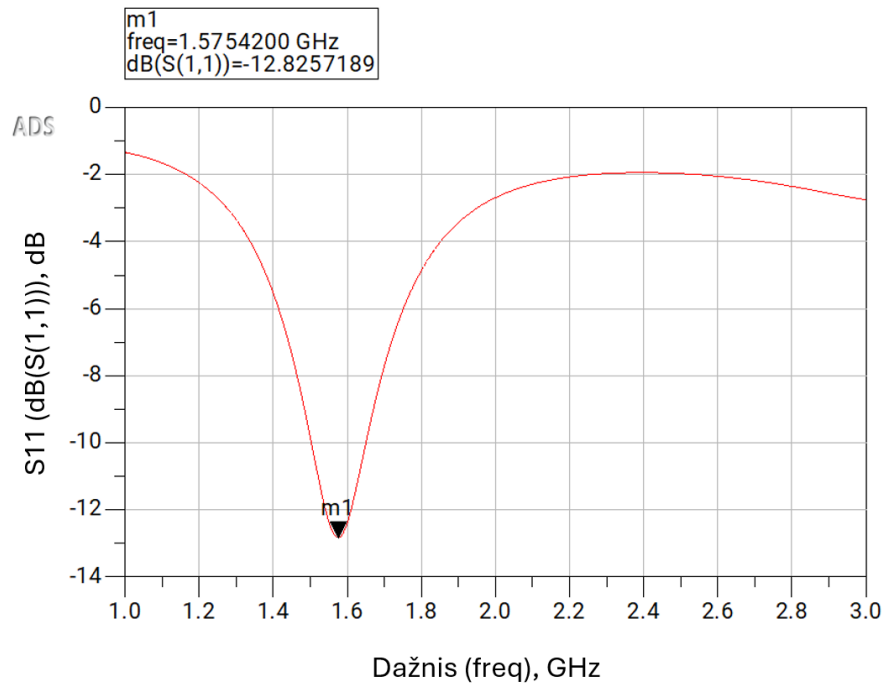
Kaip matoma iš 2.18 pav. optimizuotos PA 2200 antenos centrinis dažnis yra ties 1,596 GHz ($m_2 = -12,58$ dB). Toliau atliekamas antenos S_{11} antenos parametro koregavimas, norint, kad antenos centrinis dažnis būtų ties GPS L1 signalo centriniu dažniu. Antenos S_{11} parametro koregavimas atliekamas keliais žingsniais:

1. Antenos matmenys suapvalinami iki 2 skaičių po kablelio.
2. Keičiamas antenos $tl2_L$ (ilgio) parametras 10 μm tikslumu.

Pastebėta, kad didinant antenos ilgį, antenos S_{11} parametro piko dažnis mažėja (S_{11} pikas slenka į grafiko kairę pusę). Ir atvirkščiai – mažinant antenos ilgį S_{11} parametro piko dažnis didėja (S_{11} pikas slenka į grafiko dešinę pusę). Po optimizavimo pakoreguoti antenos matmenys ir S_{11} parametras pavaizduoti 2.19–2.20 pav.

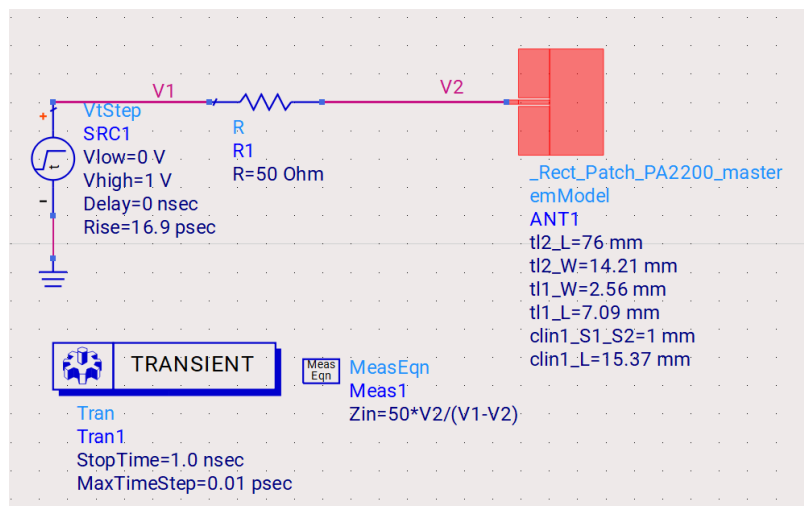


2.19 pav. Pakoreguoti PA 2200 antenos matmenys (ADS Keysight).

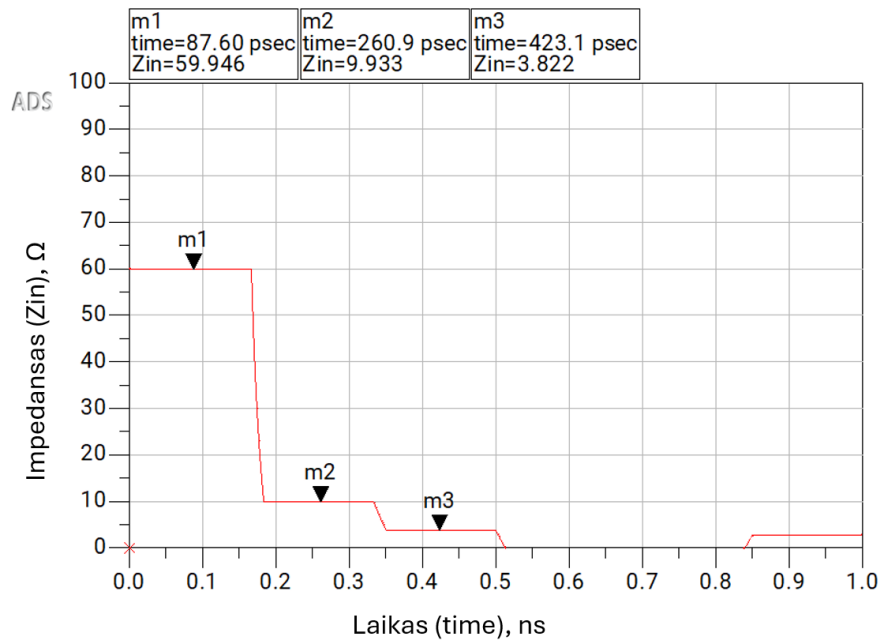


2.20 pav. Pakoreguotas PA 2200 antenos S_{11} parametras (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.20 pav. antenos S_{11} parametro -12,83 dB pikas yra ties GPS L1 signalo centriniu dažniu ($m_1 = 1,57542$ GHz). Toliau atliekamas PA 2200 antenos TDR modeliavimas (2.21 pav.) ir gaunamas antenos įėjimo impedanso kitimo grafikas (2.22 pav.).

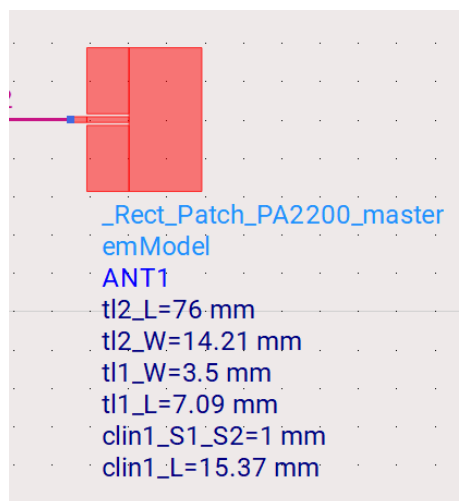


2.21 pav. PA 2200 antenos TDR modeliavimas (ADS Keysight).

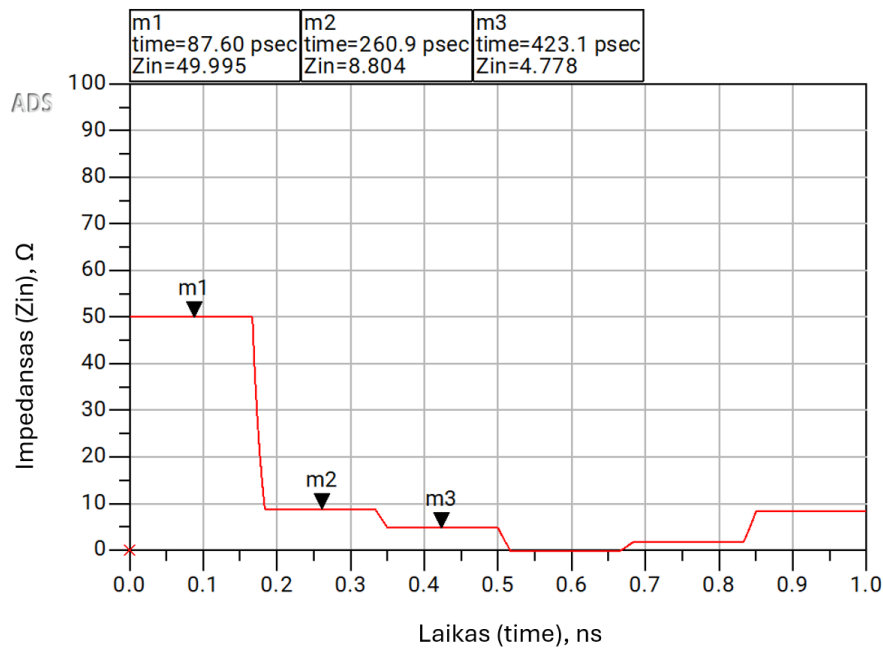


2.22 pav. PA 2200 antenos TDR grafikas (ADS Keysight).

Iš 2.22 pav. matoma, kad antenos įėjimo impedanso vertė yra 59,946 Ω (m_1). Norint pakoreguoti antenos įėjimo impedanso vertę koreguojamas antenos maitinimo linijos storis ($tl1_W$), tol kol gaunamas artimas 50 Ω antenos įėjimo impedansas. Didinant antenos maitinimo linijos plotį antenos įėjimo impedansas mažėja. Ir atvirkščiai – mažinant plotį impedansas didėja. Pakoregavus antenos $tl1_W$ parametą 2.23 pav. pavaizduoti atnaujinti antenos matmenys ir 2.24 pav. pavaizduotas naujas antenos TDR grafikas.

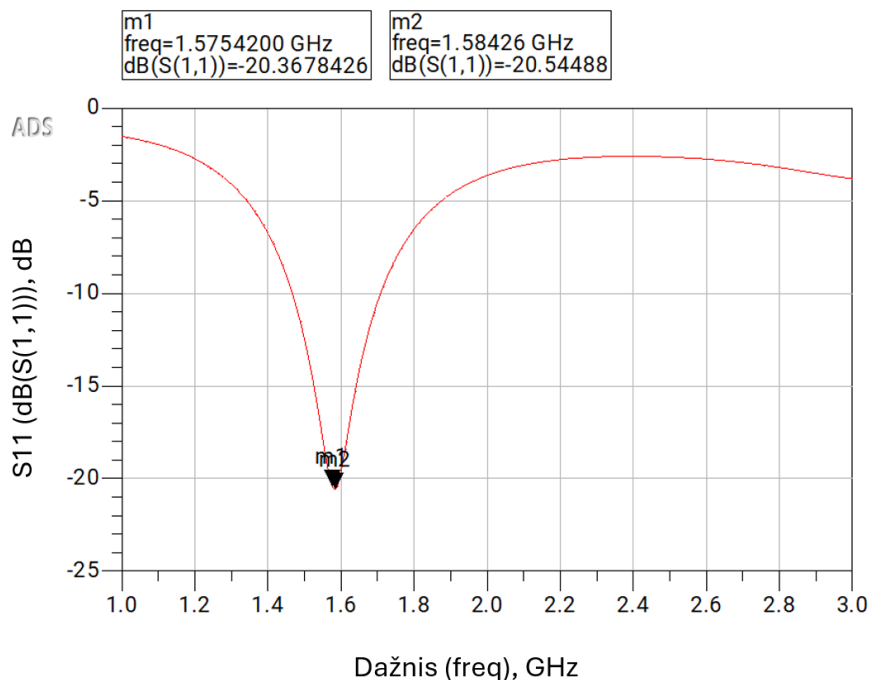


2.23 pav. Atnaujinti PA 2200 antenos matmenys (ADS Keysight).



2.24 pav. Atnaujintos antenos TDR grafikas (ADS Keysight).

Pakoregavus antenos $tl1_W$ parametą gaunamas antenos įėjimo impedansas lygus arba artimas $50\ \Omega$ ($m_1 = 49,995\ \Omega$). Po TDR modeliavimo pakoregavus antenos $tl1_W$ parametą atliekamas dar vienas papildomas S_{11} parametro modeliavimas (2.25 pav.).

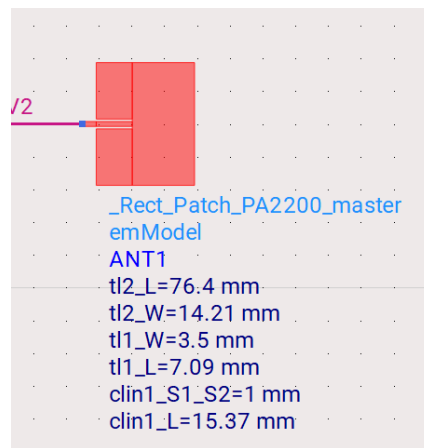


2.25 pav. PA 2200 antenos S_{11} modeliavimas po TDR modeliavimo (ADS Keysight).

Kaip matoma, pakeitus antenos maitinimo linijos storį, pakito antenos S_{11} parametro piko dažnis iš GPS L1 signalo centrinio dažnio (m_1) į 1,58426 GHz (m_2). Todėl papildomai atliekami šie veiksmai:

1. Koreguojamas antenos $tl2_L$ parametras ir atliekamas S_{11} parametro modeliavimas, tol, kol S_{11} parametro pikas tampa kaip įmanoma artimesnis GPS L1 signalo centriniam dažniui.
2. Papildomai atliekamas TDR modeliavimas ir, esant poreikiui, pakoreguojamas antenos $tl1_W$ parametras, kad antenos įėjimo impedansas taptų lygus arba artimas $50\ \Omega$.
3. Jeigu po antenos $tl1_W$ parametro koregavimo antenos S_{11} parametro piko dažnis pasislenka nuo GPS L1 signalo centrinio dažnio papildomai atliekami 1–2 žingsniai, tol, kol antenos S_{11} parametro pikas gaunamas kaip įmanoma artimesnis arba lygus GPS L1 signalo centriniu dažniu ir antenos įėjimo impedansas gaunamas lygus arba artimas $50\ \Omega$.

Po antenos parametrų koregavimo gaunami galutiniai antenos parametrai (2.26 pav.).



2.26 pav. Galutiniai pakoreguoti PA 2200 antenos parametrai (ADS Keysight).

Toliau atliekamas antenos topologijos atskirų 3 mikrojuostelinių linijų sujungimas tarpusavyje į vientisą anteną (2.27 pav.), sukuriamas vientisos antenos schematinis modelis (2.28 pav.).

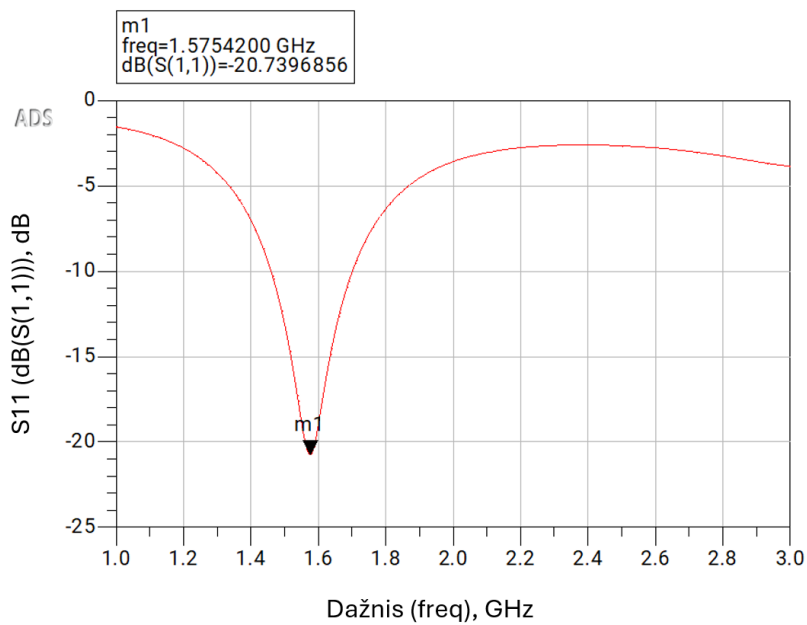


2.27 pav. Vientisos PA 2200 antenos topologija (ADS Keysight).

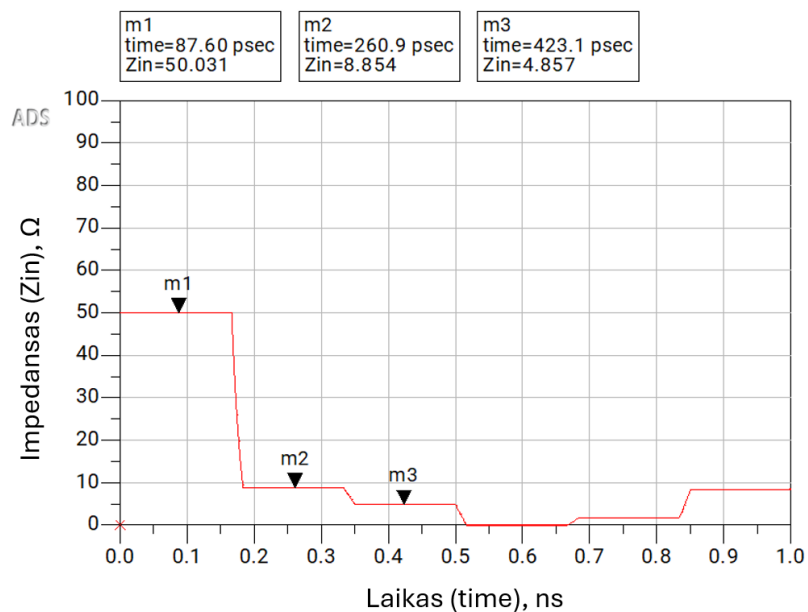


2.28 pav. Vientisos PA 2200 antenos schematinis modelis (ADS Keysight).

Galiausiai atliekami galutiniai antenos S_{11} parametro (2.29 pav.) ir TDR (2.30 pav.) modeliavimai



2.29 pav. Galutiniai PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).



2.30 pav. Galutiniai PA 2200 antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.29–2.30 pav. antenos modeliavimo rezultatų antenos S_{11} -20,74 dB pikas yra lygus GPS L1 signalo centriniu dažniu ($m_1 = 1,57542$ GHz), o antenos įėjimo impedansas yra lygus $50,031 \Omega$ (m_1). Galutiniai antenos matmenys surašyti 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. Galutiniai PA 2200 antenos matmenys.

PA 2200 antenos schemos parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
$tl1_W$	3,5
$tl1_L$	7,09
$clin1_S1_S2$	1
$clin1_L$	15,37
$tl2_W$	14,21
$tl2_L$	76,4
MACLIN3 $W1, W3$	4,355

2.2.2. PTFE GPS L1 antenos modeliavimas

Iš pradžių ADS Keysight programoje aprašomi PTFE medžiagos elektriniai ir šiluminiai parametrai (2.31 pav.). Pagrindiniai medžiagų parametrai, tokie kaip dielektrinė konstanta ir dielektrinių nuotolių tangentas, aprašomi remiantis 2.1–2.2 lentelėmis.

Material Definitions						
View Technology for this Library: Discontinuity_lib						
Conductors Dielectrics Semiconductors Superconductors Surface Roughness						
Material		Permittivity (Er)			Permeability (MUr)	
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary
PTFE_G400	Discontinuity_lib	2.075			1	

Djordjevic				Thermal Properties		
Type	TanD Freq	Low Freq	High Freq	Conductivity (k)	Z Conductivity (k)	Heat Capacity (Cv)
Svensson/Djordjevic	1 MHz	1 KHz	1 THz			

2.31 pav. PTFE medžiagos parametrų aprašymas (ADS Keysight).

Papildomi PTFE medžiagos parametrai, tokie kaip: paralelus ir statmenas plokštumai šiluminis laidumas bei tūrinis šiluminis talpumas negalėjo būti įvesti dėl informacijos trūkumo gamintojo medžiagos aprašyme.

Aprašoma PTFE spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (2.32 pav.).



Substrate Layer Stackup				
	Type	Name	Material	Thickness
	Dielectric		AIR	
1	Conductor Layer	cond (2)	Copper	7 um
	Dielectric		PTFE_G400	1.2 mm
	Cover		Copper	7 um

2.32 pav. PTFE antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (ADS Keysight).

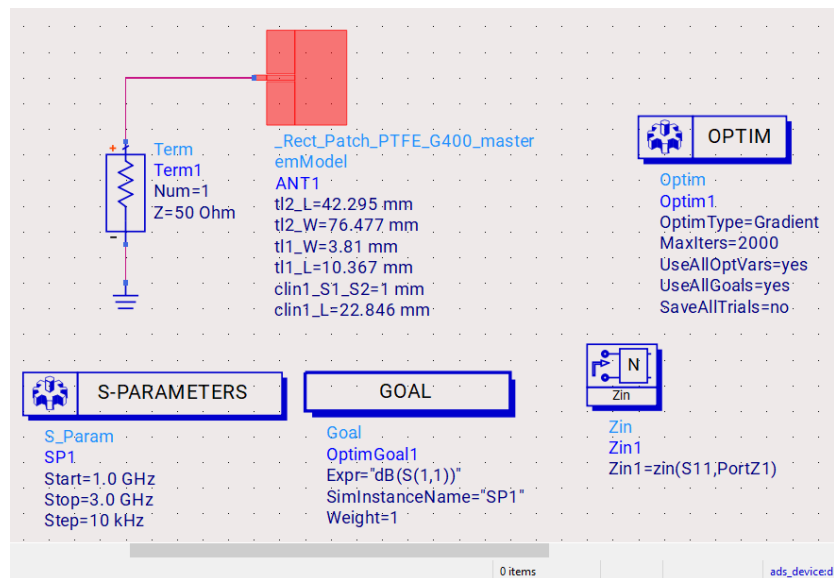
Kaip matoma iš 2.32 pav. antena kuriama ant dviejų sluoksnių 1,2 mm storio PTFE plokštės. Numatomas vario sluoksnio storis yra 7 μm .

PTFE antenos schema ir jos kūrimas atliekami analogiškai, kaip ir PA 2200 antenos (2.5 pav.). PTFE antenos schemas parametrų kintamųjų ir teoriškai apskaičiuotų antenos parametrų sąryšio funkcijos ir skaičiavimai atliekami analogiškai kaip ir PA 2200 antenos (22–28 funkcijos). PTFE antenos kintamųjų vertės aprašytos 2.10 lentelėje.

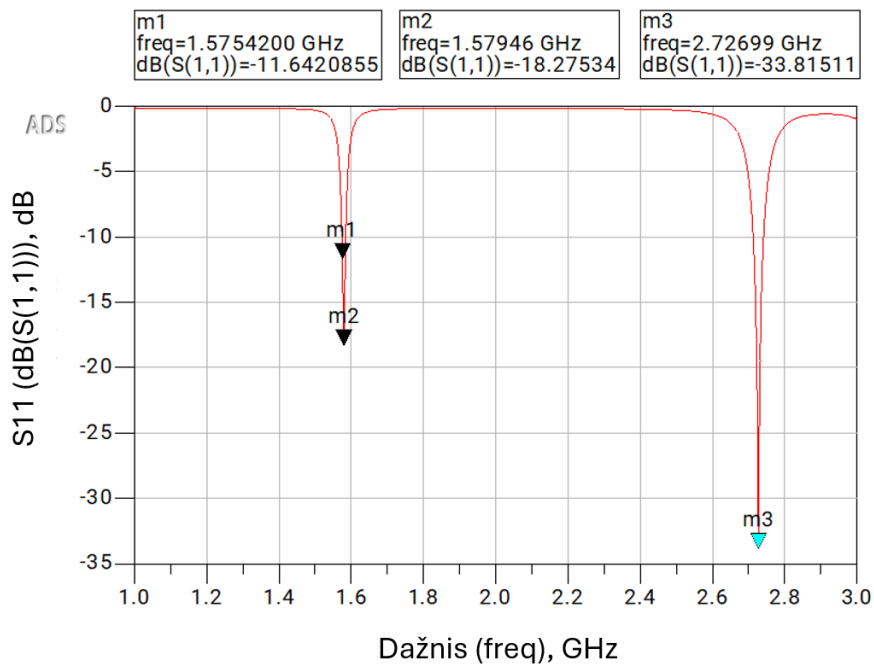
2.10 lentelė. PTFE antenos schemas parametrų vertės.

PTFE antenos schemas parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
<i>tl1_W</i>	3,81
<i>tl1_L</i>	10,367
<i>clin1_S1_S2</i>	1
<i>clin1_L</i>	22,846
<i>tl2_W</i>	76,477
<i>tl2_L</i>	42,295
MACLIN3 W1, W3	35,3335

Toliau kuriama PTFE antenos topologija, modeliuojamas antenos elektromagnetinis modelis [1 ; 3] GHz dažnių ruože ir sukuriamas antenos schematinis simbolis taip pat, kaip buvo daroma modeliuojant PA 2200 anteną. Atliekamas PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimas [1 ; 3] GHz dažnių ruože su tokia pačia schema ir parametrais kaip ir PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimai [1 ; 3] GHz dažnių ruože (2.33–2.34 pav.).

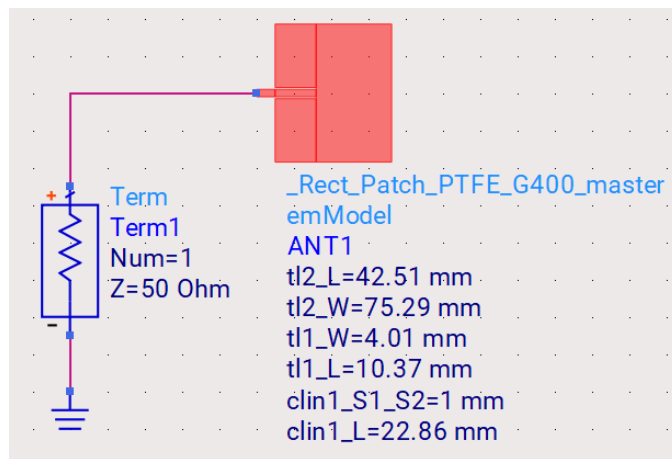


2.33 pav. PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).



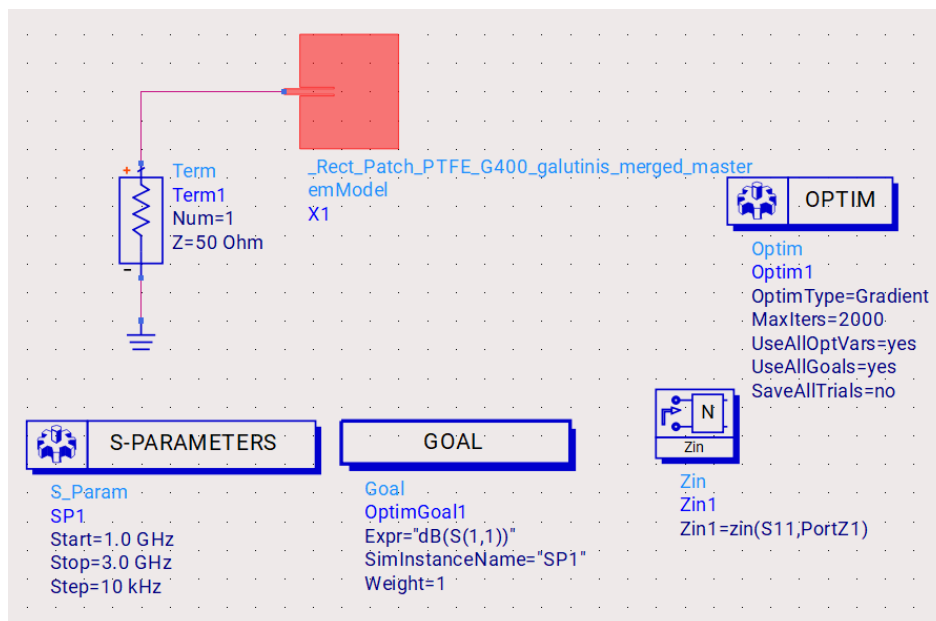
2.34 pav. Pradiniai PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.34 pav. 1–3 GHz dažnių ruože gaunami du PTFE antenos S_{11} parametro pikai: -18,275 dB ($m_2 = 1,57946$ GHz) ir -33,815 dB ($m_3 = 2,727$ GHz). Tačiau nė vienas pikas nėra ties GPS L1 signalo centriniu dažniu. Todėl atliekamas papildomas PTFE antenos optimizavimas 1–3 GHz dažnių ruože, su tokiais pat optimizavimo tikslais, kaip ir PA 2200 antenos optimizavimo metu (2.15 pav.). Po optimizavimo atnaujinti PTFE antenos parametrai suapvalinami iki 2 skaitmenų po kablelio bei atliekami pakartotiniai S_{11} ir TDR modeliavimai. Taip pat, esant poreikiui, koreguojami $tl1_W$ ir $tl2_L$ parametrai. Galutiniai PTFE antenos matmenys pavaizduoti 2.35 pav.

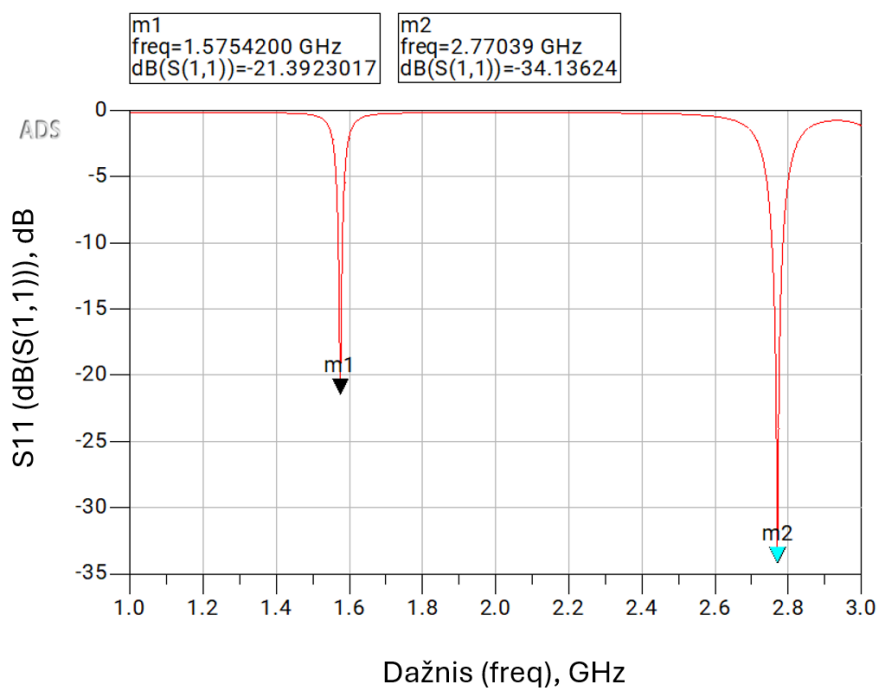


2.35 pav. Galutiniai pakoreguoti PTFE antenos parametrai (ADS Keysight).

Sujungus PTFE antenos topologijos atskiras 3 mikrojuostelines linijas tarpusavyje, atliekami galutiniai S_{11} parametro (2.36–2.37 pav.) ir TDR (2.38 pav.) modeliavimai, naudojant tokias pat modeliavimui skirtas schemas kaip ir PA 2200 antenos modeliavimo metu (2.11 pav., 2.21 pav.).

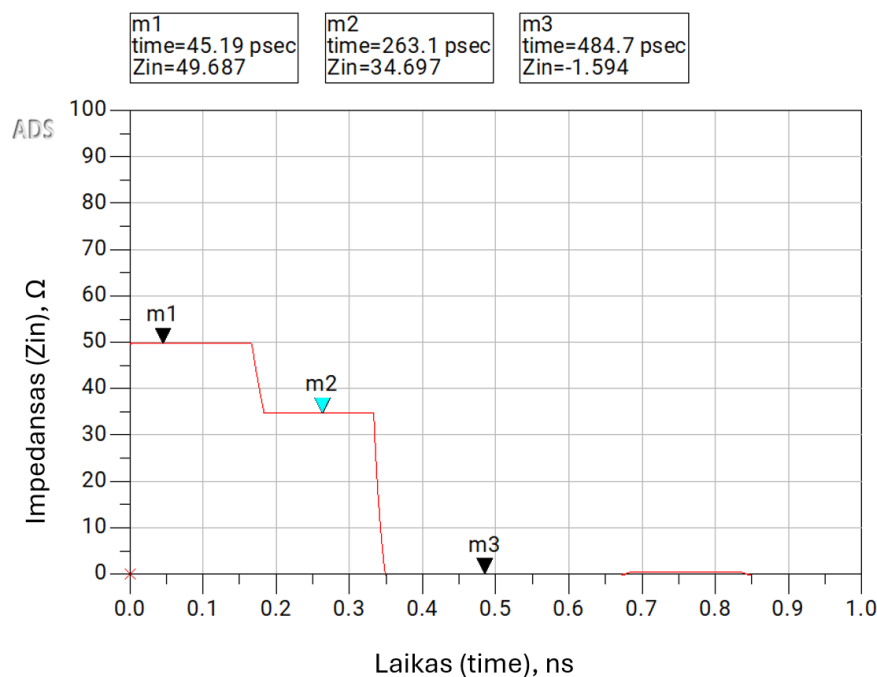


2.36 pav. PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).



2.37 pav. Galutiniai PTFE antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.37 pav. 1–3 GHz dažnių ruože gaunami du PTFE antenos S_{11} parametro pikai: -21,392 dB ($m_1 = 1,57542$ GHz) ir -34,136 dB ($m_2 = 2,77$ GHz). Pirmasis antenos S_{11} parametro pikas (m_1) yra lygus GPS L1 signalo centriniu dažniu.



2.38 pav. Galutiniai PTFE antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.38 pav. PTFE antenos įėjimo impedansas yra lygus (m_1) 49,687 Ω. Galutiniai PTFE antenos matmenys surašyti 2.11 lentelėje.

2.11 lentelė. Galutiniai PTFE antenos matmenys.

PTFE antenos schemos parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
<i>tl1_W</i>	4,01
<i>tl1_L</i>	10,37
<i>clin1_S1_S2</i>	1
<i>clin1_L</i>	22,86
<i>tl2_W</i>	75,29
<i>tl2_L</i>	42,51
MACLIN3 W1, W3	34,64

Vėliau, atliekant medžiagų savybių tyrimą aprašytą 2.3 poskyryje pastebėta, kad PTFE antenos modeliavimo eigoje įsivėlė klaida. Aprašant *ADS Keysight* PTFE dielektriką, dielektrinė konstanta buvo aprašyta kaip 2,075 (2.31 pav.), o ne teoriniuose skaičiavimuose naudota 2,1 vertės dielektrinė konstanta (2.6 lentelė). Ši klaida buvo ištaisyta atliekant antenų optimizavimą po medžiagų tyrimo (2.3.5 poskyris).

2.2.3. PEEK GPS L1 antenos modeliavimas

Iš pradžių *ADS Keysight* programoje aprašomi PEEK medžiagos elektriniai ir šiluminiai parametrai (2.39 pav.). Pagrindiniai medžiagų parametrai, tokie kaip dielektrinė konstanta ir dielektrinių nuotolių tangentas, aprašomi remiantis 2.1–2.2 lentelėmis.

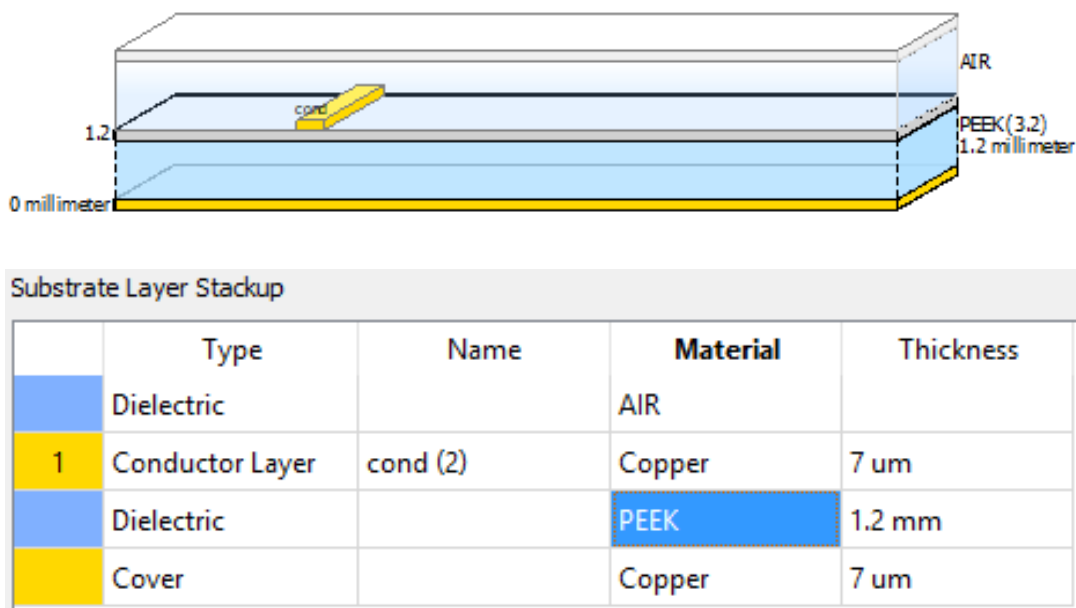
Material Definitions						
View Technology for this Library: Discontinuity_lib						
Conductors Dielectrics Semiconductors Superconductors Surface Roughness						
Material		Permittivity (Er)			Permeability (MUr)	
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary
PEEK	Discontinuity_lib	3.2		0.003	1	

Djordjevic				Thermal Properties		
Type	TanD Freq	Low Freq	High Freq	Conductivity (k)	Z Conductivity (k)	Heat Capacity (Cv)
Svensson/Djordjevic	1 MHz	1 KHz	1 THz			

2.39 pav. PEEK medžiagos parametrų aprašymas (*ADS Keysight*).

Papildomi PEEK medžiagos parametrai, tokie kaip: paralelus ir statmenas plokštumai šiluminis laidumas bei tūrinis šiluminis talpumas negalėjo būti įvesti dėl informacijos trūkumo

gamintojo medžiagos aprašyme. Aprašoma PEEK spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (2.40 pav.).



2.40 pav. PEEK antenos dielektrinė medžiaga bei spausdintinės plokštės sandara ir parametrai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.40 pav. antena kuriama ant dviejų sluoksnių 1,2 mm storio PEEK plokštės. Numatomas vario sluoksnio storis yra 7 μm .

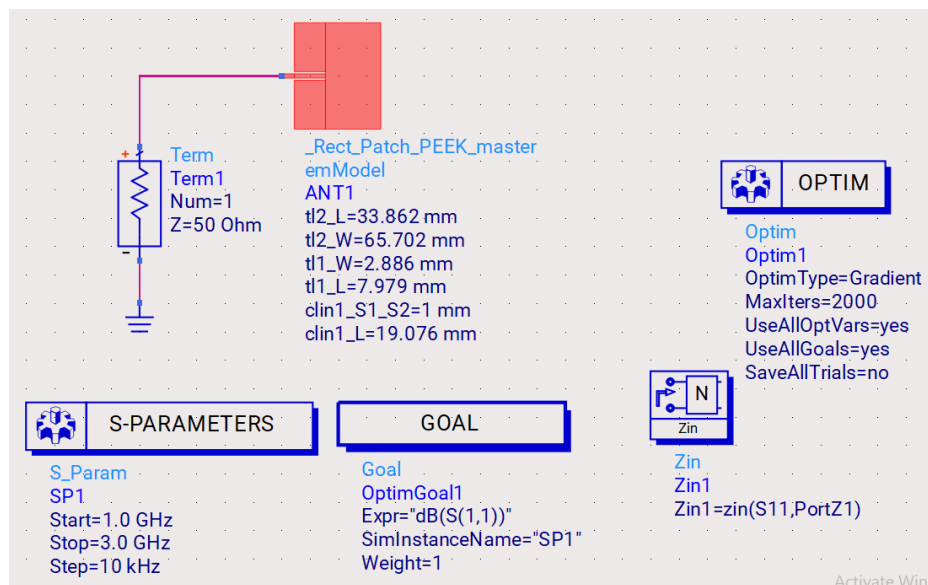
PEEK antenos schema ir jos kūrimas atliekami analogiškai, kaip ir PA 2200 antenos (2.5 pav.). PEEK antenos schemas parametrų kintamųjų ir teoriškai apskaičiuotų antenos parametrų sąryšio funkcijos ir skaičiavimai atliekami analogiškai kaip ir PA 2200 antenos (22–28 funkcijos). PEEK antenos kintamųjų vertės aprašytos 2.12 lentelėje.

2.12 lentelė. PEEK antenos schemas parametrų vertės.

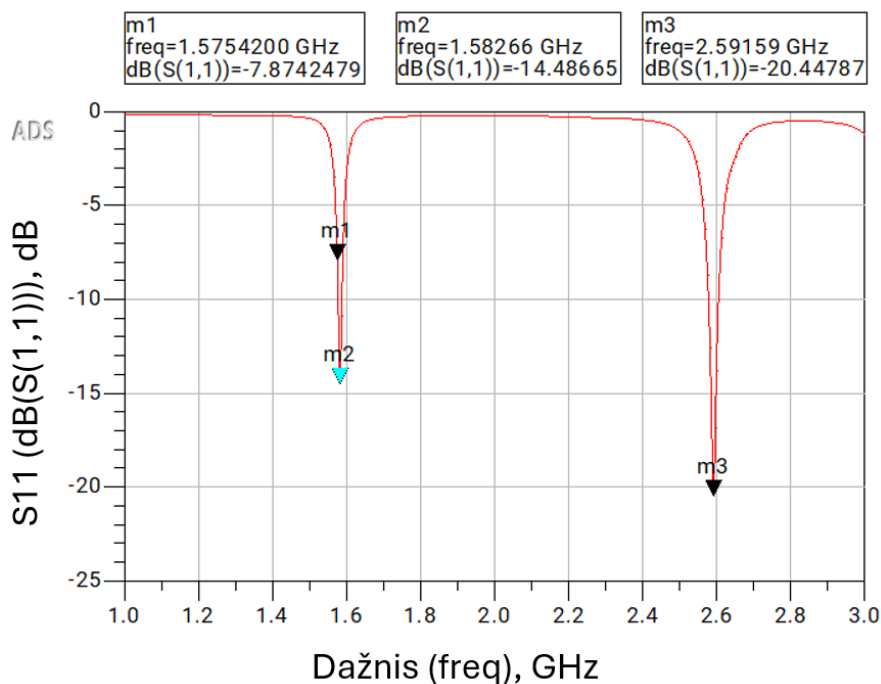
PEEK antenos schemas parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
<i>tl1_W</i>	2,886
<i>tl1_L</i>	7,979
<i>clin1_S1_S2</i>	1
<i>clin1_L</i>	19,076
<i>tl2_W</i>	65,702
<i>tl2_L</i>	33,862
MACLIN3 W1, W3	30,408

Toliau kuriama PEEK antenos topologija, modeliuojamas antenos elektromagnetinis modelis [1 ; 3] GHz dažnių ruože ir sukuriamas antenos schematinis simbolis taip pat, kaip buvo daroma modeliuojant PA 2200 anteną. Atliekamas PEEK antenos S_{11} parametro

modeliavimas [1 ; 3] GHz dažnių ruože su tokia pačia schema ir parametrais kaip ir PA 2200 antenos S_{11} parametro modeliavimai [1 ; 3] GHz dažnių ruože (2.41–2.42 pav.).



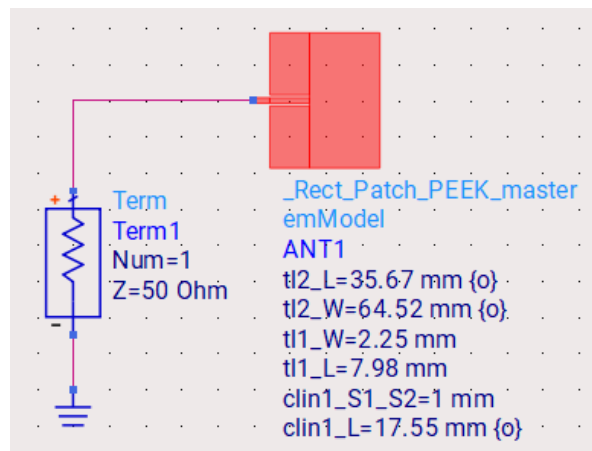
2.41 pav. PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).



2.42 pav. Pradiniai PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

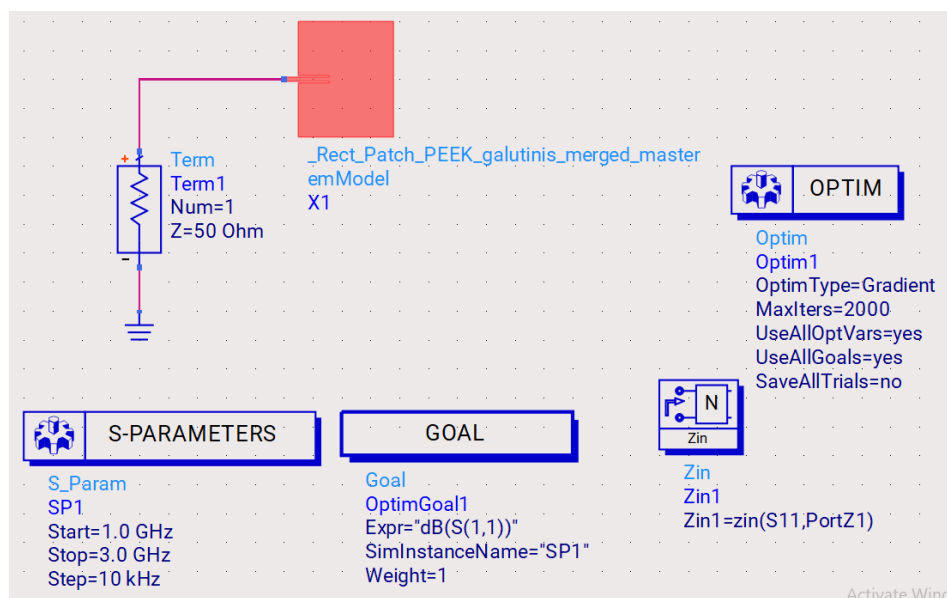
Kaip matoma iš 2.42 pav. 1–3 GHz dažnių ruože gaunami du PEEK antenos S_{11} parametro pikai: -14,487 dB ($m_2 = 1,58266$ GHz) ir -20,448 dB ($m_3 = 2,59159$ GHz). Tačiau nė vienas pikas nėra ties GPS L1 signalo centrinių dažniu. Todėl atliekamas papildomas PEEK antenos optimizavimas 1–3 GHz dažnių ruože, su tokiais pat optimizavimo tikslais, kaip ir PA 2200 antenos optimizavimo metu (2.15 pav.). Po optimizavimo atnaujinti PEEK antenos

parametrai suapvalinami iki 2 skaitmenų po kabelio bei atliekami S_{11} ir TDR modeliavimai. Taip pat, esant poreikiui, koreguojami $tl1_W$ ir $tl2_L$ parametrai. Galutiniai PEEK antenos matmenys pavaizduoti 2.43 pav.

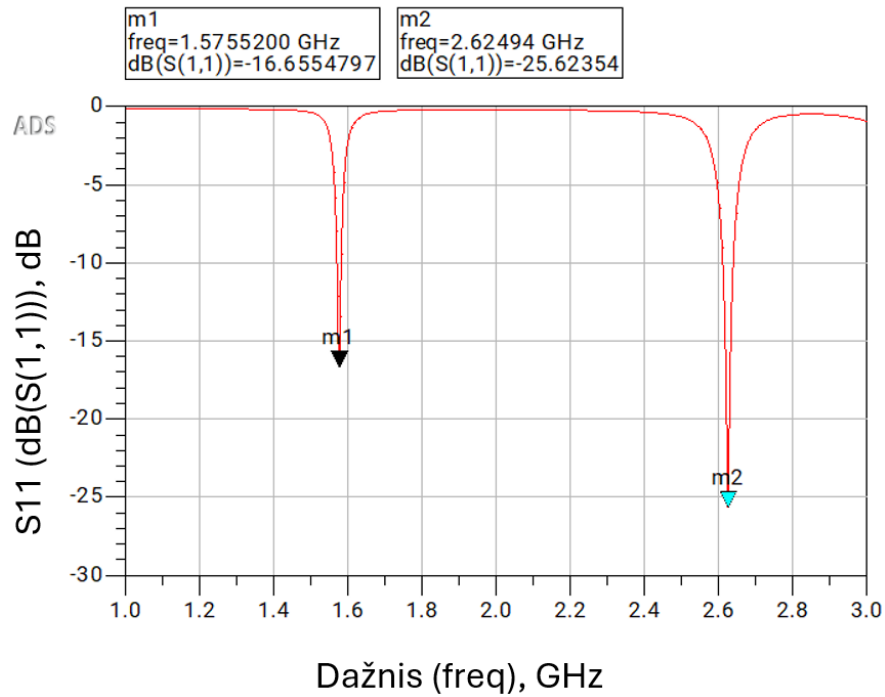


2.43 pav. Galutiniai pakoreguoti PEEK antenos parametrai (ADS Keysight).

Sujungus PEEK antenos topologijos atskiras 3 mikrojuostelines linijas tarpusavyje, atliekami galutiniai S_{11} parametro (2.44–2.45 pav.) ir TDR (2.46 pav.) modeliavimai, naudojant tokias pat modeliavimui skirtas schemas kaip ir PA 2200 antenos modeliavimo metu (2.11 pav., 2.21 pav.).

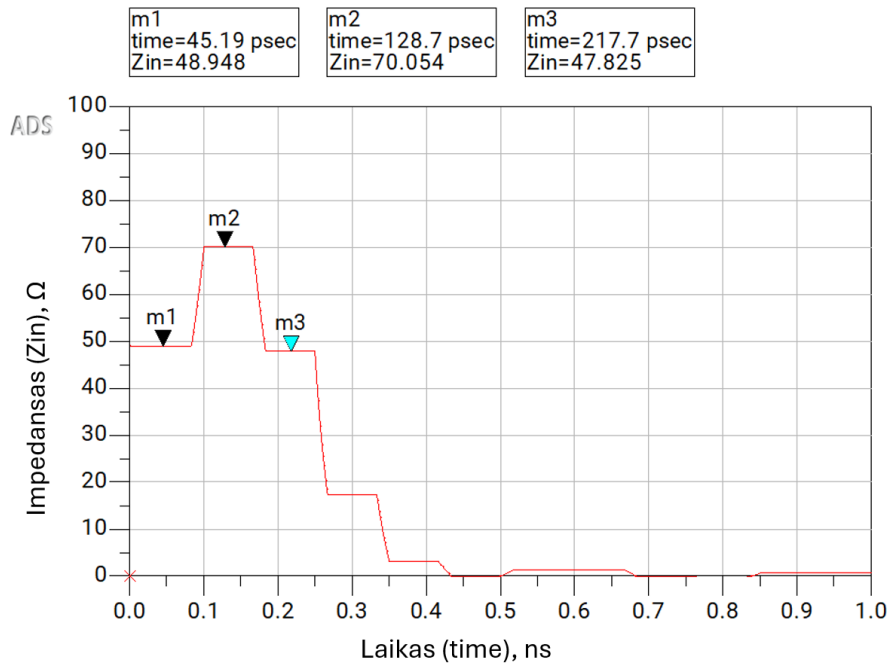


2.44 pav. PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo schema (ADS Keysight).



2.45 pav. Galutiniai PEEK antenos S_{11} parametro modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.45 pav. 1–3 GHz dažnių ruože gaunami du PEEK antenos S_{11} parametro pikai: -16,656 dB ($m_1 = 1,57552$ GHz) ir -25,624 dB (2,625 GHz). Pirmasis antenos S_{11} parametro pikas (m_1) yra artimas GPS L1 signalo centriniam dažniui bei įeina į GPS L1 signalo dažnių ruožą (1.2 lentelė).



2.46 pav. Galutiniai PEEK antenos įėjimo impedanso modeliavimo rezultatai (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.46 pav. PEEK antenos įėjimo impedansas yra lygus $48,948 \Omega$ (m_1). Galutiniai antenos matmenys surašyti 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė. Galutiniai PEEK antenos matmenys.

PEEK antenos schemos parametrai	Apskaičiuotos vertės, mm
<i>tl1_W</i>	2,25
<i>tl1_L</i>	7,98
<i>clin1_S1_S2</i>	1
<i>clin1_L</i>	17,55
<i>tl2_W</i>	64,52
<i>tl2_L</i>	35,67
MACLIN3 <i>W1</i> , <i>W3</i>	30,135

Vėliau, atliekant medžiagų savybių tyrimą aprašytą 2.3 poskyryje pastebėta, kad PEEK vario storis turi būti pakeistas iš $7 \mu\text{m}$ į $3,75 \mu\text{m}$. Kadangi PEEK plokštės bus dengiamos $3,5\text{--}4 \mu\text{m}$ vario sluoksniu. Vario storio korekcija buvo daroma atliekant antenų optimizavimą po medžiagų tyrimo (2.3.5 poskyris).

2.2.4. Apibendrinimas

Modeliuojant planariąsias GPS L1 dažnio antenas pastebėta, kad koreguojant antenos ilgį atitinkamai keičiasi antenos S_{11} parametro dažnis. Didinant antenos ilgį, antenos S_{11} parametro piko dažnis mažėja, mažinant – didėja. Taip pat pastebėta, kad medžiagos su didesne dielektrine konstanta leidžia suprojektuoti mažesnių matmenų GPS L1 anteną. Projektuojant anteną ant medžiagos turinčios dielektrinę konstantą ir dielektrinius nuostolius išmatuotus žemuose dažniuose (PA 2200, 1 kHz) bei palyginti didelius dielektrinius nuostolius (PA 2200), antena sumodeliuojamos neproporcingai ilga palyginti su gautu antenos pločiu.

Taip pat, pastebėta kad vien tik teoriškai apskaičiuotų antenų parametrų neužtenka norint sukurti kokybiškas GPS L1 dažnio antenas, todėl turi būti atliekami papildomi antenų parametrų optimizavimai.

2.3. Medžiagų elektrinių savybių tyrimas

Svarbu paminėti, kad SSAIL technologijos gamybos parametrai yra konfidenciali informacija, todėl, aprašant SSAIL technologija gaminamus įrenginius/komponentus nebus gilinamasi į naudotus specifinius lazerinio apdirbimo parametrus. Galima paminėti, kad medžiagų apdirbimui naudojamos lazerinės sistemos, kurių pagrindiniai komponentai yra:

- Femtosekundinis lazeris;

- Optinis lazerio spindulio kelias;
- Trijų ašių (X, Y, Z) pozicionavimo stalai;
- Galvanometrini lazerio spindulio skeneris;
- Programinė įranga skirta visų sistemos įrenginių veikimo sinchronizavimui tarpusavyje;
- Lieto metalo arba granito pagrindas.

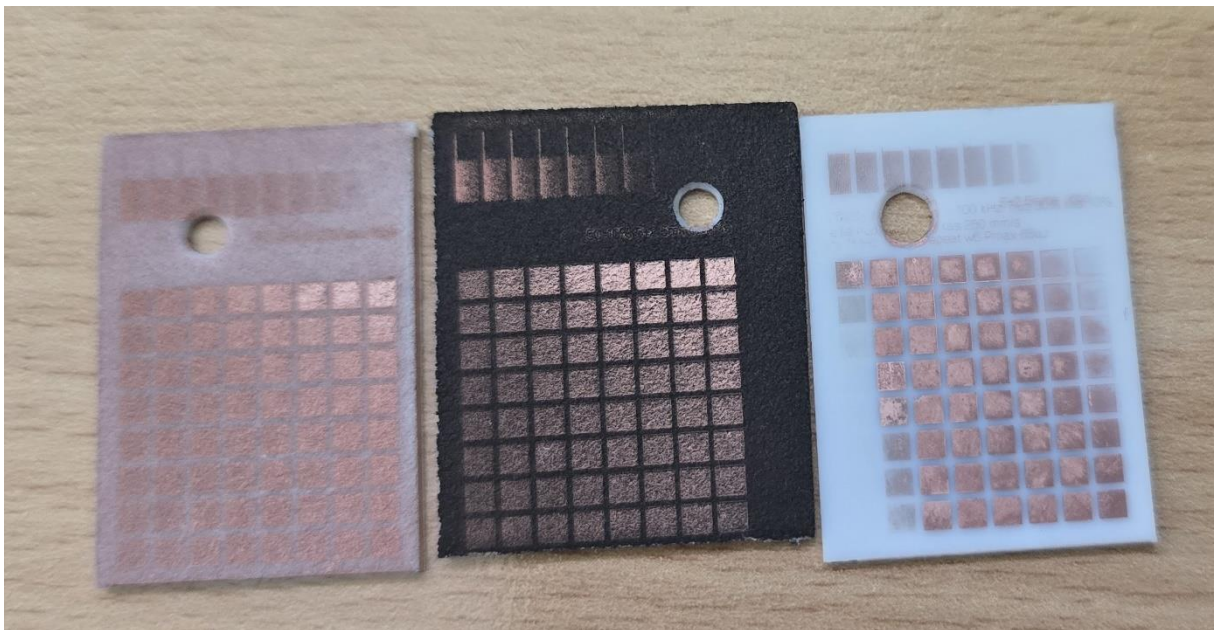
Igyvendinant SSAIL technologiją yra svarbūs tokie lazerinio apdirbimo parametrai kaip:

- Lazerio spindulio diametras fokuse;
- Lazerio impulsų trukmė;
- Lazerio impulsų dažnis;
- Maksimalus medžiagos apdirbamo lauko dydis;
- Lazerio spindulio skenavimo greitis;
- Medžiagos apdirbimo tipas.

SSAIL technologija gaminamų įrenginių/komponentų vario ir pasyvinio metalo sluoksnio storis priklauso nuo cheminio metalo sluoksnio nusodinimo greičio. Vario nusodinimo greitis yra 3,5 $\mu\text{m/h}$, nikelio – 20–22 $\mu\text{m/h}$. Standartinės plokštės vario storis būna 7 μm , nikelio sluoksnio storis $\sim 2 \mu\text{m}$, aukso – 50–100 nm.

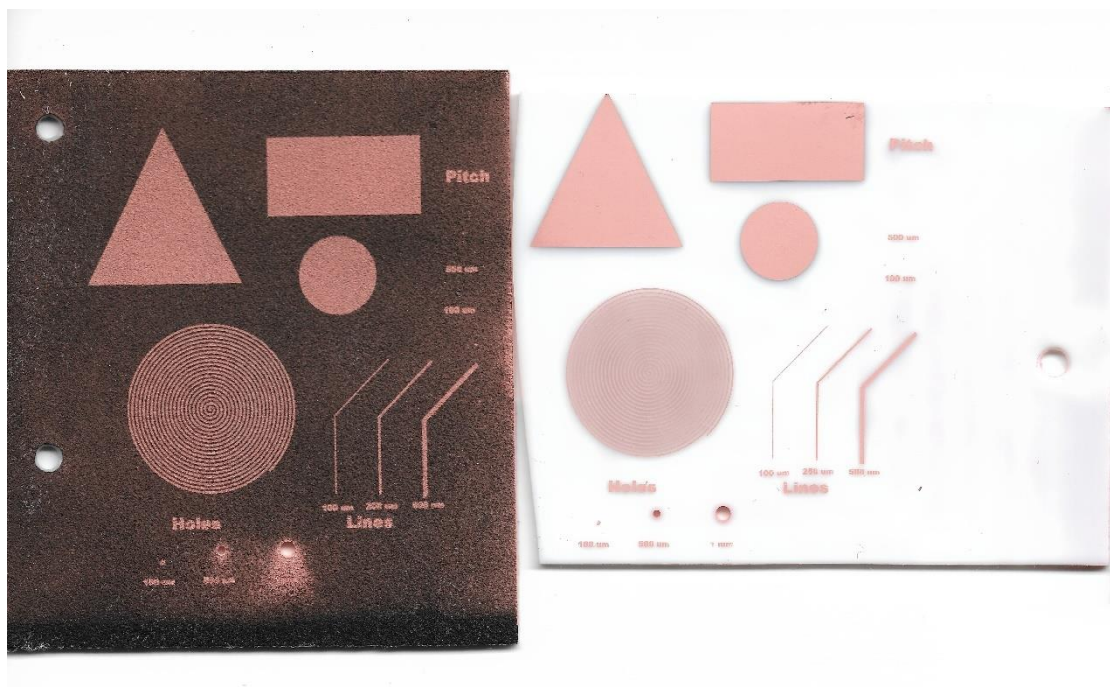
Prieš gaminant antenas naudojant SSAIL technologiją. Pradžioje atliekami SSAIL testavimai ant pasirinktų medžiagų. Testavimai atliekami ant PTFE ir PA 2200. PEEK medžiagos apdirbimo parametrai yra žinomi. Nepaisant to, kad PTFE medžiagos apdirbimo parametrai yra žinomi, atliekamas papildomas PTFE testavimas naudojant SSAIL technologiją. Kadangi, PTFE medžiagos apdirbimo parametrai itin priklauso nuo apdirbamos PTFE medžiagos inertiškumo lygio ir sandaros.

Testavimai atliekami nubraižant stačiakampių matricą, kurioje X ir Y kryptinis yra keičiami du lazerinio apdirbimo parametrai, pvz., medžiagos apdirbimo greitis ir lazerio spindulio energija arba kiti, ir su šiais parametrais yra apdirbamas medžiagos paviršius. Apdirbus medžiagą su lazeriu vykdomas medžiagos cheminis aktyvavimas ir vario sluoksnio cheminis nusodinimas (2.47 pav.). Svarbu paminėti, kad antenų kūrimo pradžioje PA 2200 medžiaga buvo pasirinkta dviejų tipų: gryna PA 2200, PA 2200 su juoda danga. PA 2200 medžiaga su juoda danga buvo pasirinkta, norint gauti kuo lygesnį PA 2200 plokštės paviršių ir taip pat pratestuoti ar paviršiaus dažymas gali sumažinti medžiagos vandens absorbciją.

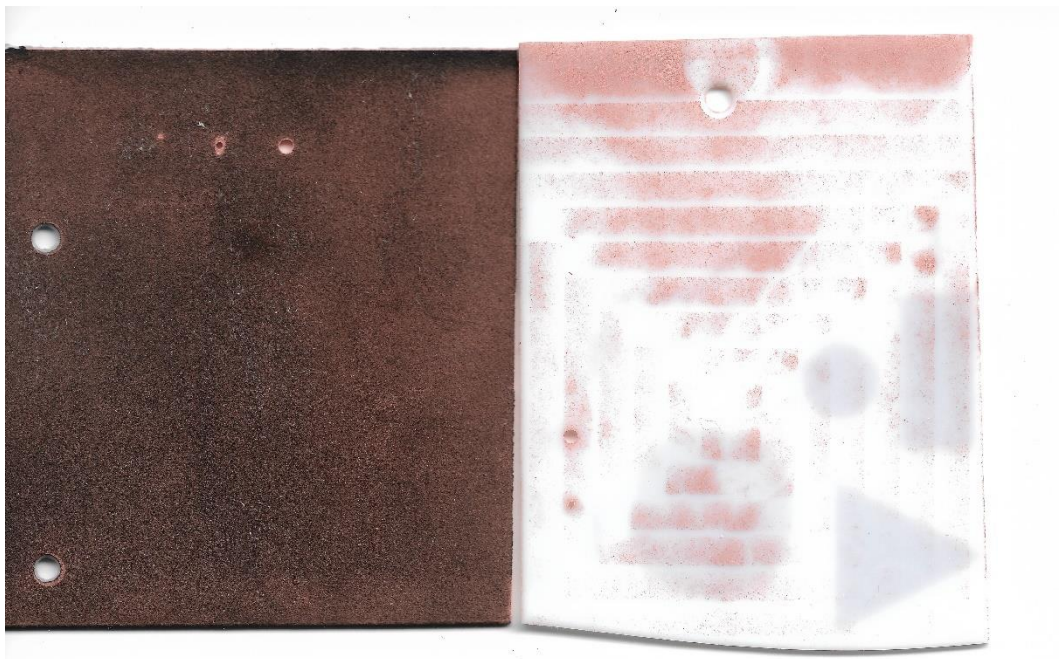


2.47 pav. PA 2200 (kairė), PA 2200 su juoda danga (vidurys) ir PTFE (dešinė).

Nustačius tinkamiausius medžiagų lazerinio apdirbimo parametrus ant plokštelių nusodinamos pasirinktos geometrinės figūros, kad būtų galima vizualiai analizuoti vario adheziją priklausomai nuo geometrinės figūros dydžio. 2.48–2.49 pav. iš abiejų pusių pavaizduotos PTFE ir PA 2200 (su juoda danga) plokštės, su SSAIL technologija gautomis geometrinėmis figūromis.



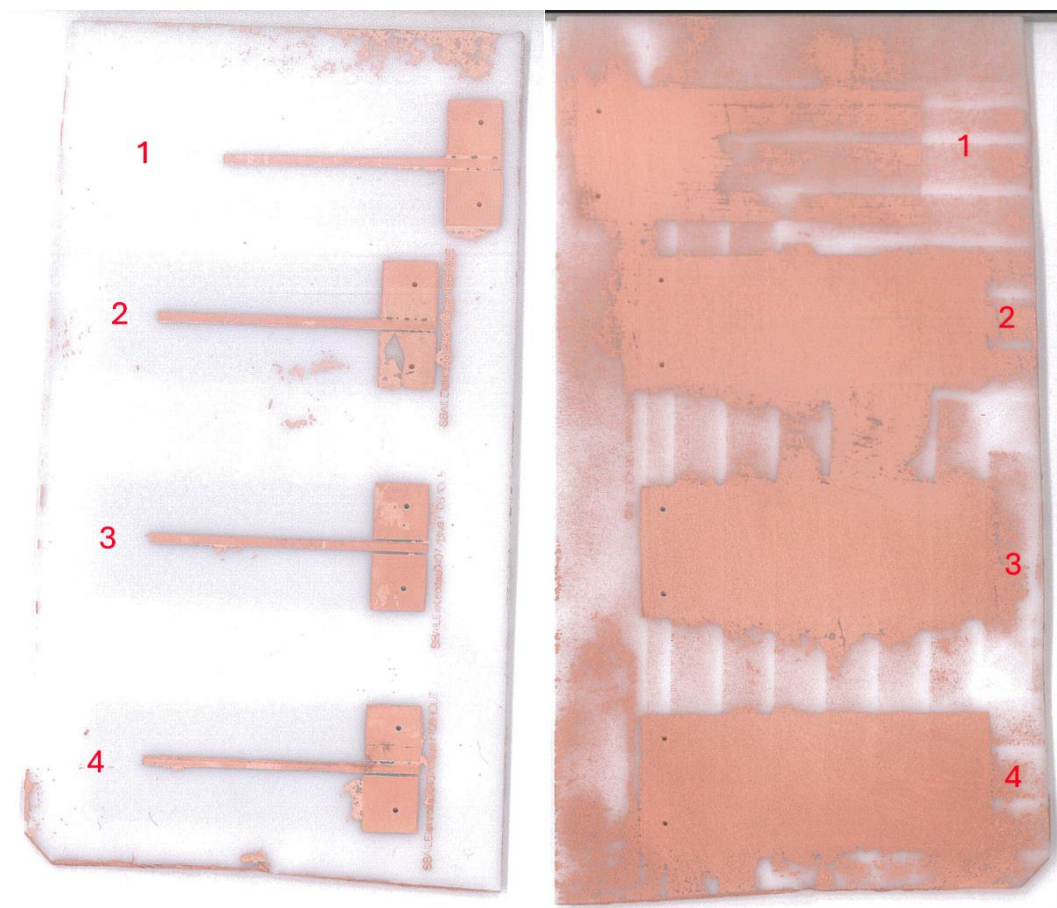
2.48 pav. Pasirinktų geometrinių figūrų kūrimas naudojant SSAIL ant PA 2200 su juoda danga (kairė) ir PTFE (dešinė).



2.49 pav. PA 2200 su juoda danga ir PTFE plokščių pusės nemodifikuotos lazeriu.

Kaip matoma iš 2.48–2.49 pav. kad tiek gryna PA 2200, tiek PA 2200 medžiaga su juoda danga yra netinkamos SSAIL technologijai taikyti, nes turi šiurkštų paviršius, dėl kurio medžiaga pasidengia variu ir tose medžiagos vietose, kurios nėra apdirbtos lazeriu. PA 2200 plokštės yra visos pasidengusios variu dėl savo šiurkštaus paviršiaus, o PTFE plokštės nefrezuota pusė yra pasidengusi variu tik ten kur paviršiu modifikuotas lazeriu, o frezuota pusė yra truputį pasidengusi variu dėl šiurkštaus paviršiaus. Kadangi PTFE plokštės frezuota pusė bus naudojama GPS sekiklio komponentų žemės sluoksnio kūrimui, šios pusės pasidengimas variu be lazerio modifikavimo, nėra itin didelė projektavimo problema, nes be lazerio modifikavimo pasidengusios vietos gali būti pašalinamos medžiagą nuvalant su šiurkščia kempine arba naudojant lazerį.

Norint parodyti lazerinio apdirbimo parametrų svarbą įgyvendinant SSAIL technologiją (Ratautas, Jagminienė, et al., 2020), galima parodyti su pakeistais apdirbimo parametrais padengtą PTFE (2.50 pav.)

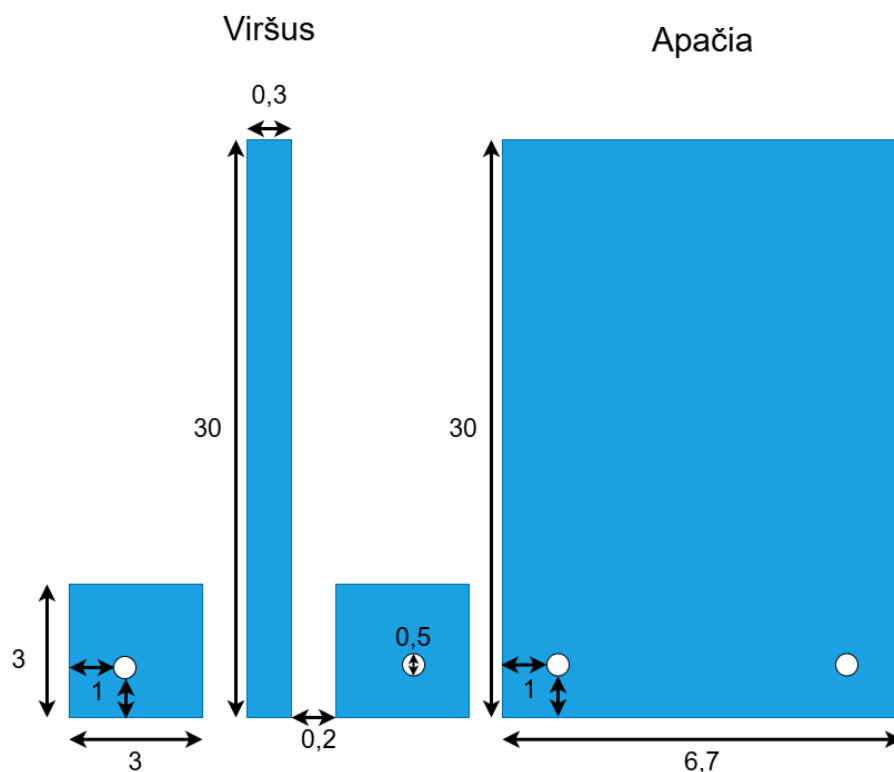


2.50 pav. PTFE apdirbtas su pakeistais lazerinio apdirbimo parametrais: nefrezuota pusė (kairė), frezuota pusė (dešinė).

2.50 pav. pavaizduotos 4 figūros yra apdirbtos tais pačiais lazerinio apdirbimo parametrais, tačiau, kaip matoma, vario adhezija yra daug prastesnė negu 2.48 pav. pavaizduoto PTFE. Taip pat pastebima, kad 2.50 pav. pavaizduotos nefrezuotos teflono pusės, dalis lazeriu apdirbtų vietų nėra pasidengusios variu.

Galiausiai pasirinkus, SSAIL technologijai taikyti tinkamas (PEEK ir PTFE) medžiagas, pagaminami elektrodai, skirti pasirinktų medžiagų dielektrinių savybių tyrimui. Gamybos metu, PEEK elektrodai padengti 3,5–4 μm storio vario sluoksniu, o PTFE elektrodai – didesniu nei 5 μm storio vario sluoksniu. Svarbu paminėti, kad būtent tokiais PEEK ir PTFE vario sluoksniais bus dengiamos darbo metu gaminamos antenų bei GPS sekiklio ir jo komponentų plokštės. Ant PTFE nusodinamo vario sluoksnio storį yra sunku reguliuoti dėl medžiagos inertiškumo. Kartais PTFE medžiagos cheminis dengimas turi būti kartojamas kelis kartus.

Elektrodo matmenys (2.51 pav.) pasirinkti, pagal numatytus mažiausius GPS sekiklio komponentų PCB modelių plokčių matmenis ir atstumus tarp komponentų.

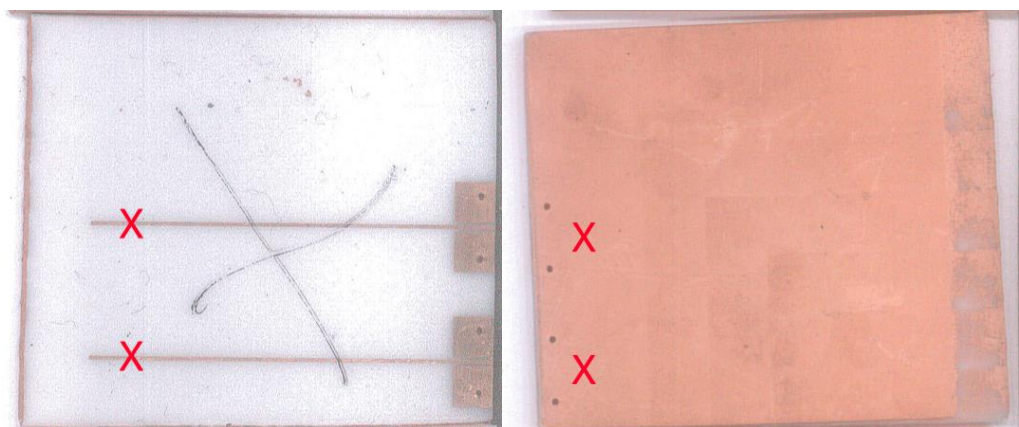


2.51 pav. Elektrodo viršutinis sluoksnis (kairė) ir apatinis sluoksnis (kairė).

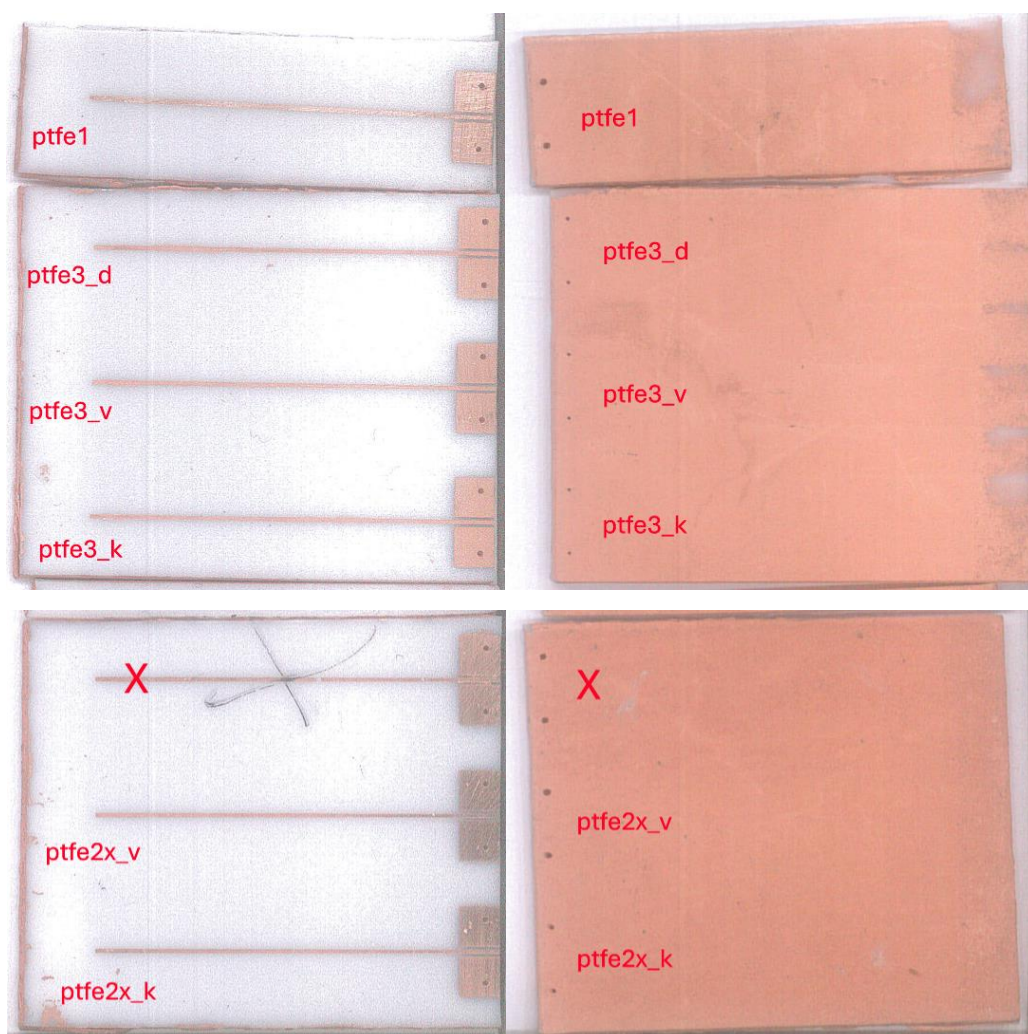
Numatomi mažiausi atstumai tarp komponentų yra 200 μm , o mažiausi PCB modelių pločiai – 300 μm . Elektrodo sandara yra tokia:

- Viršutinis sluoksnis:
 - Mikrojuostelinė linija, kurios ilgis ir plotis yra atitinkamai 3 cm ir 300 μm .
 - Keturkampės (3x3 mm) žemės sluoksnio aikštelės su jungiamosiomis, 0,5 mm diametro, skylėmis.
- Apatinis sluoksnis:
 - Stačiakampė (30x6.7 mm) žemės sluoksnio aikštelė.

Pagaminti elektrodai ant PEEK ir PTFE medžiagų pavaizduoti (2.52–2.55 pav.).



2.52 pav. Ant PTFE medžiagos pagaminti elektrodai (1).



2.53 pav. Ant PTFE medžiagos pagaminti elektrodai (2).

Kaip matoma iš 2.52–2.53 pav., yra keli elektrodai pažymėti X simboliu, kurie yra netinkami matavimams. Nepaisant to, kad visi PTFE medžiagos elektrodai buvo gaminami su analogiškais lazerinio apdirbimo parametrais, dalies elektrodų mikrojuostelinė linija yra

nutrūkusi ir/arba nėra kontakto tarp viršutinio ir apatinio žemės sluoksnių. Tikėtina, kad dalies PTFE elektrodų brokas yra PTFE medžiagos inertiškumo pasekmė.



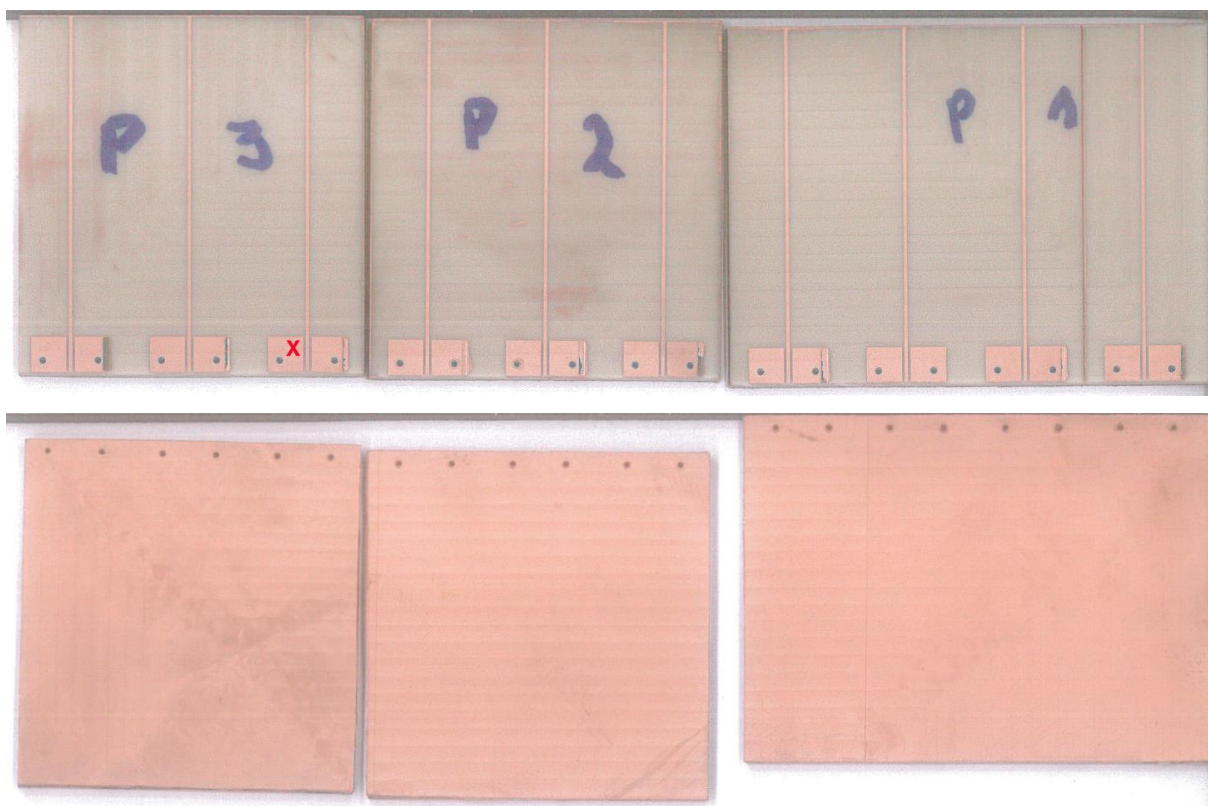
2.54 pav. Ant PEEK medžiagos pagaminti elektrodai.

Kaip matoma iš 2.54 pav., PEEK elektrodai yra tinkami matavimams, nes nė vieno elektrodo mikrojuostelinė linija nėra nutrūkusi ir bent viena elektrodo viršutinė žemės aikštelė turi kontaktą su apatiniu žemės sluoksniu. Yra vienas p4_v elektrodas, kurio viena viršutinio žemės sluoksnio aikštelė neturi kontakto su apatiniu žemės sluoksniu ir yra pažymėta X simboliu. Taip pat matoma, kad PEEK plokštelės frezuotos vietos minimaliai pasidengia vario sluoksniu, tačiau šis vario sluoksnis nesujungia mikrojuostelinės linijos ir žemės sluoksnio tarpusavyje

2.55 pav. pavaizduoti netinkami matavimams PEEK elektrodai, nes jie buvo pagaminti su įsivėlusia klaida lazerinio apdirbimo parametruose. PEEK medžiagos apdirbimo proceso eigoje, dėl atsiradusių klaidų, PEEK medžiagos paviršius buvo apdirbamas netinkamai. Netinkamas 2.55 pav. PEEK elektrodų paviršiaus apdirbimas matosi analizuojant kiekvieno elektrodo viršutinės, dešinės pusės, žemės aikšteles, kurių dauguma turi vertikalią juostą nepasidengusią variu. Dėl anksčiau išvardintų priežasčių, 2.55 pav. PEEK elektrodai nebuvo analizuojami PEEK medžiagos dielektrinių savybių tyrimo metu, nepaisant to, kad visi

elektrodai turi vientisas/nenutrūkusias mikrojuostelines linijas bei kontaktą tarp viršutinio ir apatinio žemės sluoksnių.

Elektrodų sluoksnių kontaktai buvo tikrinami naudojant multimetrą.



2.55 pav. Nepavykę PEEK elektrodai.

2.3.1. Elektrodų impedanso matavimai

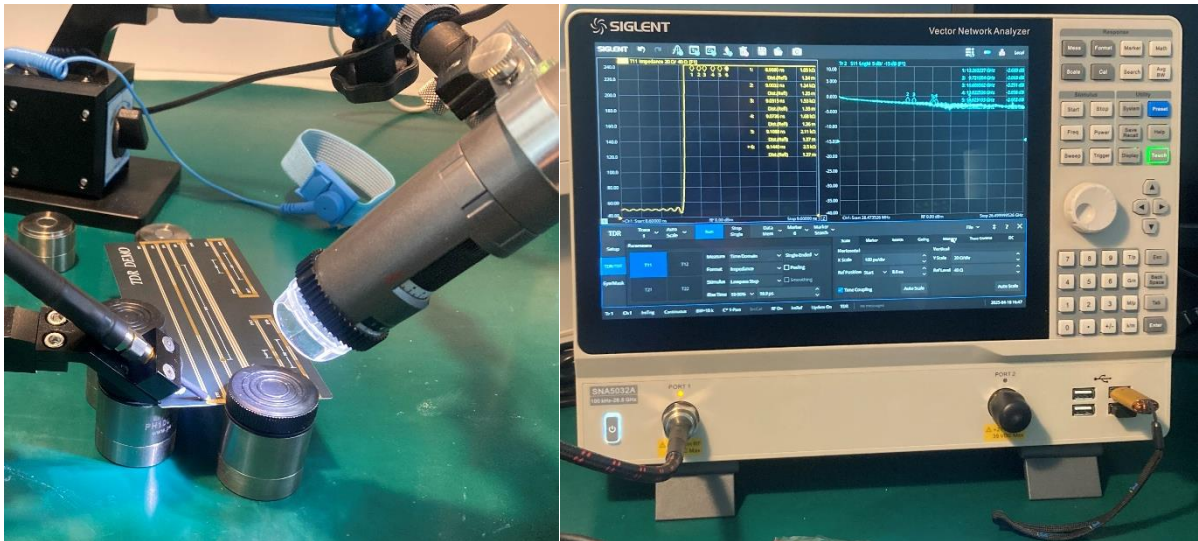
Elektrodų impedanso matavimai atliekami naudojant SIGLENT SNA5032A VNA su gamintojo nustatytu kalibravimu, SP-GR-201505 0,5 mm adatą, 100 cm VNA kabelį ir Dino-Lite Edge mikroskopą. Visų matavimų metu buvo naudojamos vienkartinės guminės pirštinės, norint kuo labiau apsaugoti varinius elektrodus nuo oksidacijos. Elektrodų paruošimo matavimams eiga:

1. PEEK elektrodai nuvalomi su sausos kempinės šiurkščia dalimi. PTFE elektrodų nuvalyti nereikia, nes elektrodai valyti kempine ir lazeriu.
2. Su multimetru patikrinama ar mikrojuostelinės linijos ir žemės sluoksniai nėra užsitrumpinę tarpusavyje bei su aplinkiniais vario sluoksniais. Taip pat patikrinama ar abu viršutiniai žemės sluoksniai turi kontaktą su apatiniu sluoksniu.
3. Esant poreikiui, su peiliuku nuskutamos, susijungusios su žemės sluoksniu, mikrojuostelinių linijų vietos. Šiuo atveju reikėjo apskusti PEEK ir PTFE

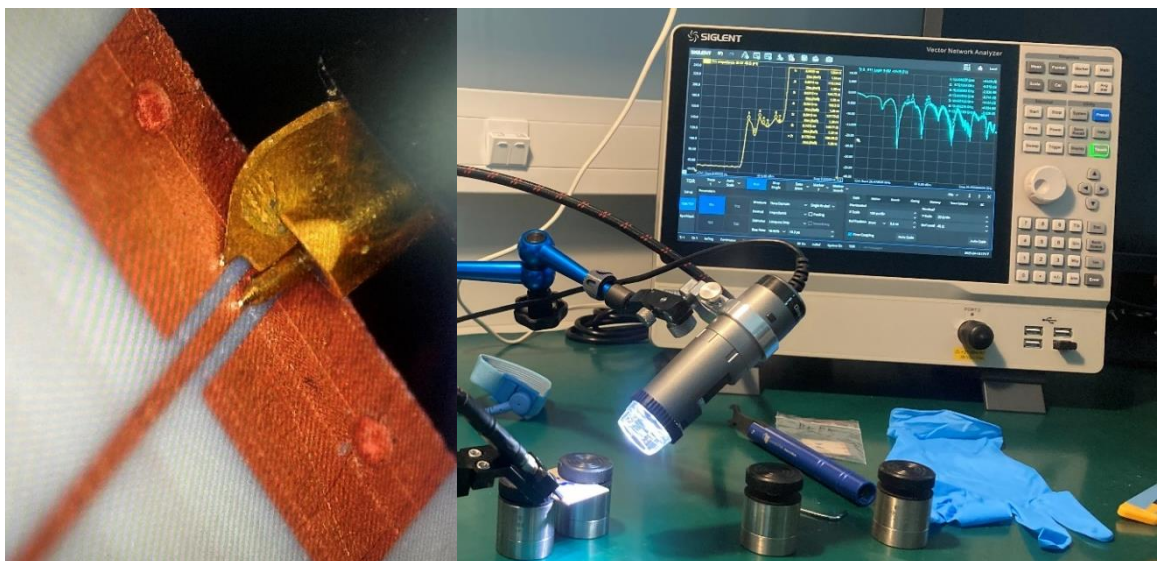
mikrojuostelinių linijų apačios kraštus (ties keturkampiais žemės elektrodais) ir kai kurių PEEK mikrojuostelinių linijų viršūnes.

Elektrodų matavimo eiga:

1. Nustatomas VNA TDR grafiko matavimų pradžios laikas (2.56 pav.);
2. Nustatoma VNA paklaida matuojant $50\ \Omega$ impedanso etaloningę mikrojuostelinę liniją su 0,5 mm adata ir mikroskopu (2.56 pav.).
3. Naudojant VNA su 0,5 mm adata, 100 cm kabeliu ir mikroskopu, gaunami PTFE ir PEEK elektrodų TDR grafikai (2.57 pav.). Elektrodų TDR matavimai atliekami [100 kHz ; 26,5 GHz] dažnių ruože.
4. Atlikus matavimus, VNA matavimo duomenys išeksportuojami į .csv tipo failus ir grafikai nubraižomi naudojant *MATLAB Online* programą (C priedas).

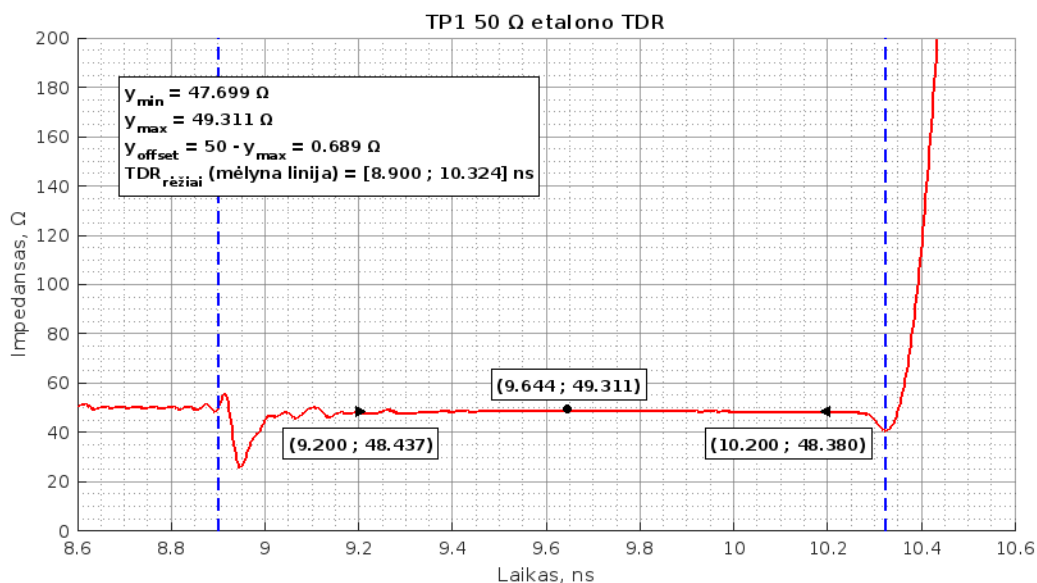


2.56 pav. Etaloninės $50\ \Omega$ mikrojuostelinės linijos TDR matavimas.



2.57 pav. PEEK ir PTFE elektrodų TDR matavimas.

Prieš atliekant matavimus nustatomas TDR matavimų pradžios taškas, kai prie VNA prijungtas tik 50 Ω kabelis ir adata. TDR matavimų pradžios taškas nustatomas ties tuo laiko momentu, kai VNA TDR grafiko kreivė pradeda staigiai didėti iki begalybės. Šiuo atveju nustatytas VNA TDR matavimų pradžios laikas yra 8,9 ps. 50 Ω etaloninės mikrojuostelinės linijos grafikas pateiktas 2.58 pav.



2.58 pav. Etaloninės 50 Ω mikrojuostelinės linijos TDR.

Iš 2.58 pav. matoma, kad TDR matavimo pradžios ir pabaigos režiai yra pažymėti mėlynomis vertikaliomis linijomis [8,9 ; 10,324] ns. TDR grafiko analizės režiai pažymėti juodomis rodyklėmis (►◄) [9,2 ; 10,2] ns. TDR analizės režiai pasirenkami tokie, kuriuose matoma, kuo mažiau pereinamųjų procesų tarp VNA laido su SMA jungtimi bei elektrodo mikrojuostelinės linijos. TDR grafiko analizės režiuose surandamos grafiko maksimalios ir minimalios vertės atitinkamai $y_{\min} = 47,699 \Omega$ ir $y_{\max} = 49,311 \Omega$. Matoma, kad $y_{\max}$ vertė yra apytiksliai TDR grafiko analizės režių viduryje (9,644 ns ; 49,311 Ω). VNA matavimų paklaida y_{offset} apskaičiuojama iš 50 Ohm atėmus maksimalią vertę $y_{\max}$. Kaip matoma iš pateikto grafiko VNA paklaida y_{offset} yra 0,689 Ω . Apskaičiuota VNA matavimų paklaida bus naudojama koreguoti PEEK ir PTFE elektrodų TDR matavimų rezultatus.

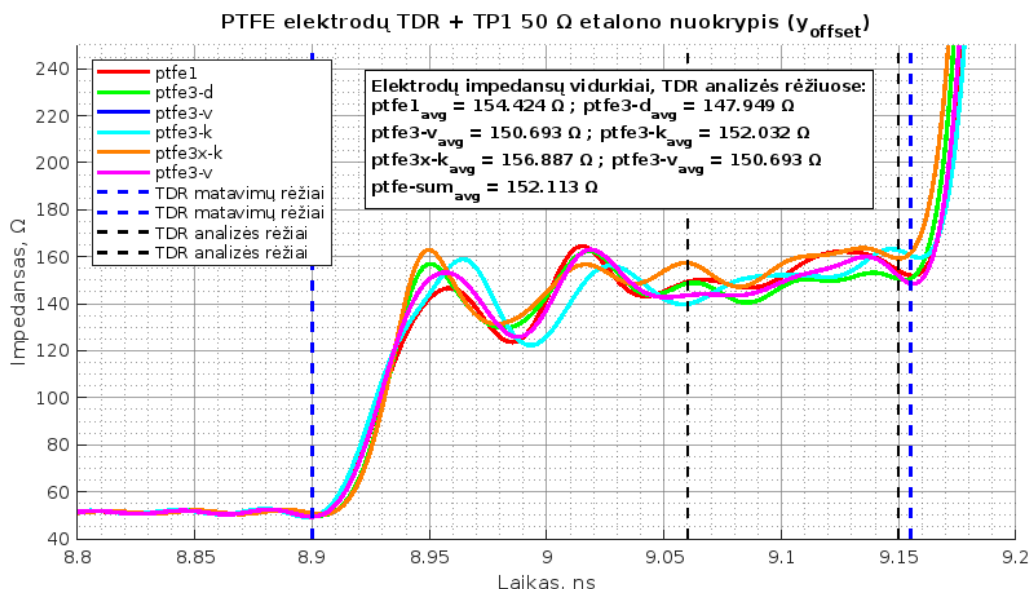
Pakoreguoti PTFE elektrodų matavimo rezultatai pateikti 2.59 pav. Kaip matoma iš 2.59 pav. PTFE elektrodų TDR matavimo režiai yra pažymėti mėlynomis vertikaliomis linijomis [8,9 ; 9,155] ns, o TDR matavimų analizės režiai pažymėti vertikaliomis juodomis linijomis [9,06 ; 9,15] ns. TDR matavimo ir analizės režiai parenkami apskaičiavus VNA skiriamąją gebą, elektrodo ilgio trukmės atitikmenį grafike ir pakoregavus mikrojuostelinių linijų TDR

kreivių pabaigos koordinatę grafiko laiko ašyje, siekiant gauti kuo tikslesnius impedansų skaičiavimus.

VNA skiriamosios gebos skaičiavimas atliekamas žinant VNA kabelio ilgį (1000 mm), adatos ilgį (38 mm) ir TDR grafiko matavimų pradžios tašką laiko ašyje (8,9 ns). Nustatyta VNA skiriamoji geba yra $\sim 0,008574$ ns/mm. Žinant VNA skiriamąją gebą apskaičiuojama grafiko kreivių trukmė atitinkanti 30 mm elektrodų ilgį: $\sim 0,25722$ ns. Apskaičiavus elektrodų ilgį atitinkančią trukmę 2.59 pav. grafiko laiko ašyje, matoma, kad, teoriškai, mikrojuostelinės linijos TDR matavimų pabaiga turėtų būti ties 9,15722 ns. Kadangi mikrojuostelinių linijų TDR kreivės jau ties 9,15 ns tašku pradeda staigiai kilti aukštyrą iki begalybės, kas rodo TDR matavimuose atvirą grandinę, pasirinktas TDR matavimų pabaigos taškas buvo 9,155 ns.

TDR matavimų analizės pradžios taškas pasirenkamas ne 8,96 ns, o 9,6 ns. Taip daroma, siekiant neiškaityti impedansų skaičiavimuose [8,9 ; 9,06] ns intervale matomų pereinamųjų procesų. [8,9 ; 9,06] ns intervale matomi pereinamieji procesai, tikėtina, atsiranda dėl mikrojuostelinės linijos pradžioje esančių žemės elektrodų, kurie nuo mikrojuostelinės linijos yra nutolę ~ 200 μm .

Kaip matoma, elektrodų vidutiniai impedansai, TDR analizės režiuose, svyruoja [147,949 ; 156,887] Ω diapazone, o bendras elektrodų vidutinis impedansas apskaičiuotas randant vidurkį iš visų PTFE elektrodų vidutinių impedansų $\text{ptfe-sum}_{\text{avg}} = 152,113$ Ω .

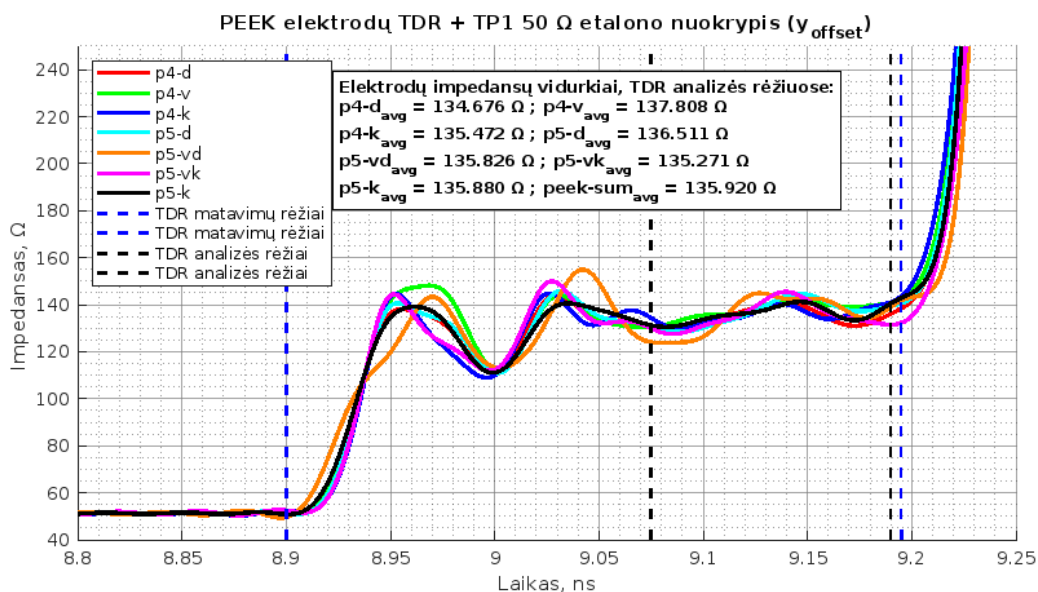


2.59 pav. PTFE elektrodų TDR matavimai.

Pakoreguoti PEEK elektrodų matavimo rezultatai pateikti 2.60 pav. Kaip matoma iš 2.60 pav. PEEK elektrodų TDR matavimo režiai yra pažymėti mėlynomis vertikaliomis

linijomis [8,9 ; 9,195] ns, o TDR matavimų analizės režiai pažymėti vertikaliomis juodomis linijomis [9,075 ; 9,19] ns. PEEK elektrodų TDR matavimo ir analizės režiai parenkami tokiu pačiu būdu, kaip ir PTFE elektrodų.

Kaip matoma, elektrodų vidutiniai impedansai, TDR analizės režiuose, svyruoja [134,676 ; 137,808] Ω diapazone, o bendras elektrodų vidutinis impedansas apskaičiuotas randant vidurkį iš visų PEEK elektrodų vidutinių impedansų $\text{peek-sum}_{\text{avg}} = 135,920 \Omega$.



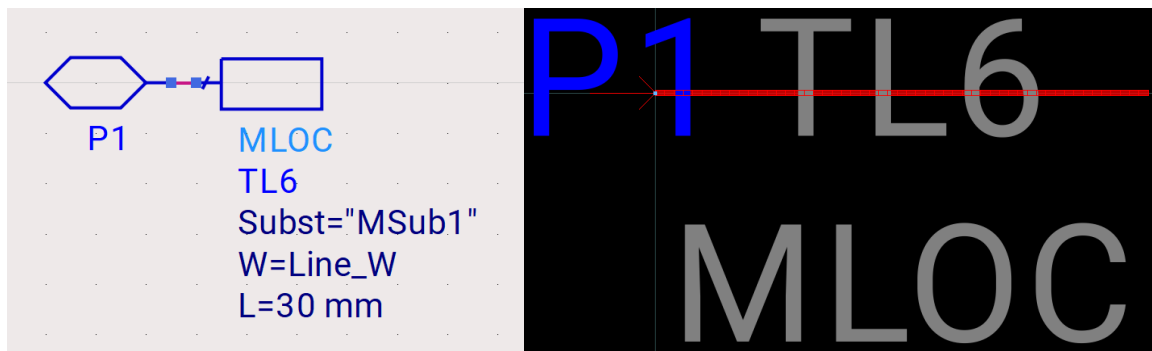
2.60 pav. PEEK elektrodų TDR matavimai.

2.3.2. Elektrodų impedanso modeliavimas

Po PTFE ir PEEK elektrodų matavimų atliekamas elektrodų TDR modeliavimas su *ADS Keysight* programa, norint įsitikinti ar *ADS Keysight* PTFE ir PEEK elektrodų impedansų modeliavimo rezultatai sutaps su matavimo rezultatais.

PTFE ir PEEK elektrodų TDR modeliavimas atliekamas tokiu pačiu principu kaip ir antenų modeliavimai:

1. Sukuriama mikrojuostelinės linijos schema su linijos pločio kintamuoju ir 2.51 pav. mikrojuostelinės linijos matmenimis (2.61 pav.).
2. Sukuriamas mikrojuostelinės linijos topologija (2.61 pav.).
3. Atliekamas mikrojuostelinės linijos topologijos elektromagnetinis modeliavimas [0 ; 26,5] GHz dažnių ruože ir sukuriamas linijos schematinis simbolis.
4. Naudojant schematinį modelį (kurio modeliavimo tipas pakeičiamas iš schematinio į elektromagnetinį modelį) atliekamas mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimas ir gaunamas grafikas.



2.61 pav. PTFE elektrodo schema (kairė) ir topologija (dešinė) su linijos pločio kintamuoju (ADS Keysight).

Prieš atliekant PTFE mikrojuostelinės linijos topologijos elektromagnetinį modeliavimą, PTFE GPS L1 antenos modeliavimo metu (2.2.2 poskyris) aprašyta PTFE medžiagos dielektrinės konstantos neatitikimo klaida yra ištaisoma aprašant pakoreguotus PTFE medžiagos parametrus, kuriuose 2,075 vertės dielektrinė konstanta pakeičiama į 2,1 vertės dielektrinę konstantą (2.62 pav.)

Material Definitions

View Technology for this Library: Discontinuity_lib

Material		Permittivity (Er)			Permeability (MUr)	
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary
PTFE_G400_MOD	Discontinuity_lib	2.1			1	

Djordjevic				Thermal Properties		
Type	TanD Freq	Low Freq	High Freq	Conductivity (k)	Z Conductivity (k)	Heat Capacity (Cv)
Svensson/Djordjevic	1 MHz	1 KHz	1 THz			

2.62 pav. Pakoreguoti PTFE medžiagos parametrai (ADS Keysight).

PTFE mikrojuostelinės linijos dielektriko vario storiai nustatomi tokie pat kaip ir PTFE antenos modeliavimo metu, kadangi žinoma, kad PTFE elektrodo vario sluoksnis yra didesnis nei 5 μm (2.63 pav.).



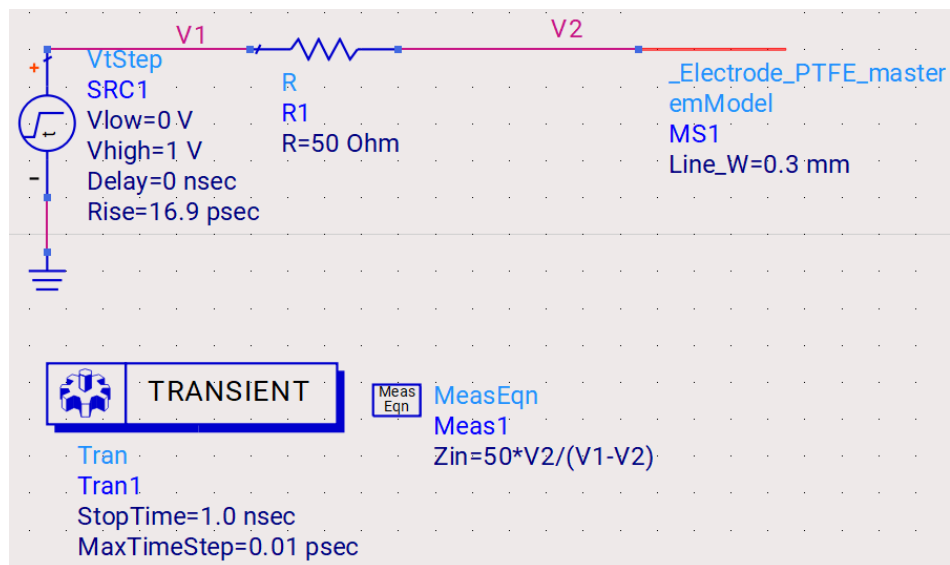
Substrate Layer Stackup				
	Type	Name	Material	Thickness
	Dielectric		AIR	
1	Conductor Layer	cond (2)	Copper	7 um
	Dielectric		PTFE_G400_MOD	1.2 mm
	Cover		Copper	7 um

2.63 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos plokštės sandara (ADS Keysight).

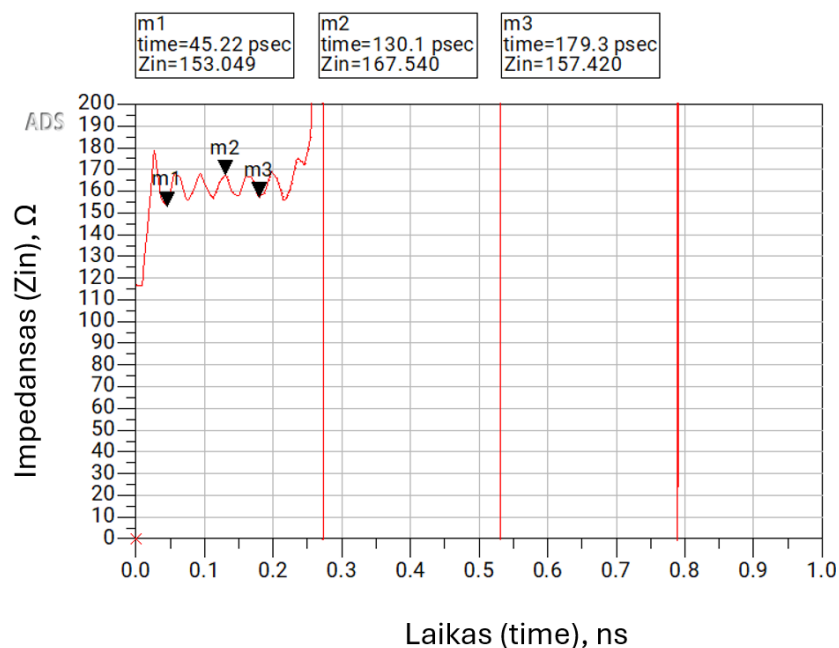
PTFE 3 cm ilgio ir 300 μm pločio mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema pavaizduota 2.64 pav., o TDR grafikas 2.65 pav.

Iš 2.65 pav. matoma, kad minimalus ir maksimalus modeliuojamos PTFE mikrojuostelinės linijos impedansas yra atitinkamai $m_3 = 157,42 \Omega$ ir $m_2 = 167,54 \Omega$, o vidutinis impedansas m_{avg} :

$$m_{avg} = \frac{m_2 + m_3}{2} = 162,48 \Omega \quad (29)$$

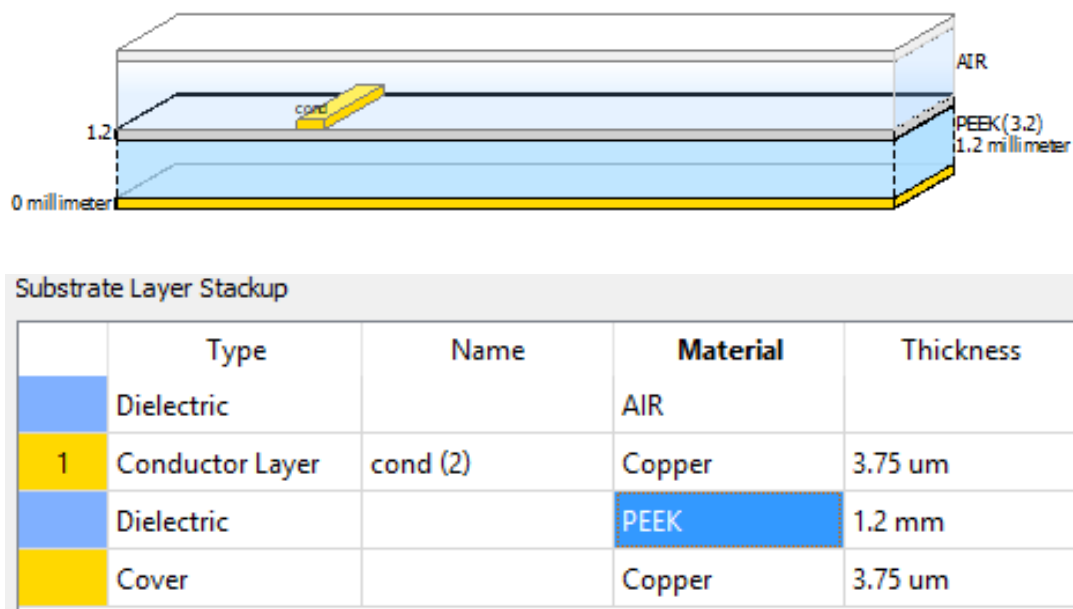


2.64 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight).



2.65 pav. PTFE mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).

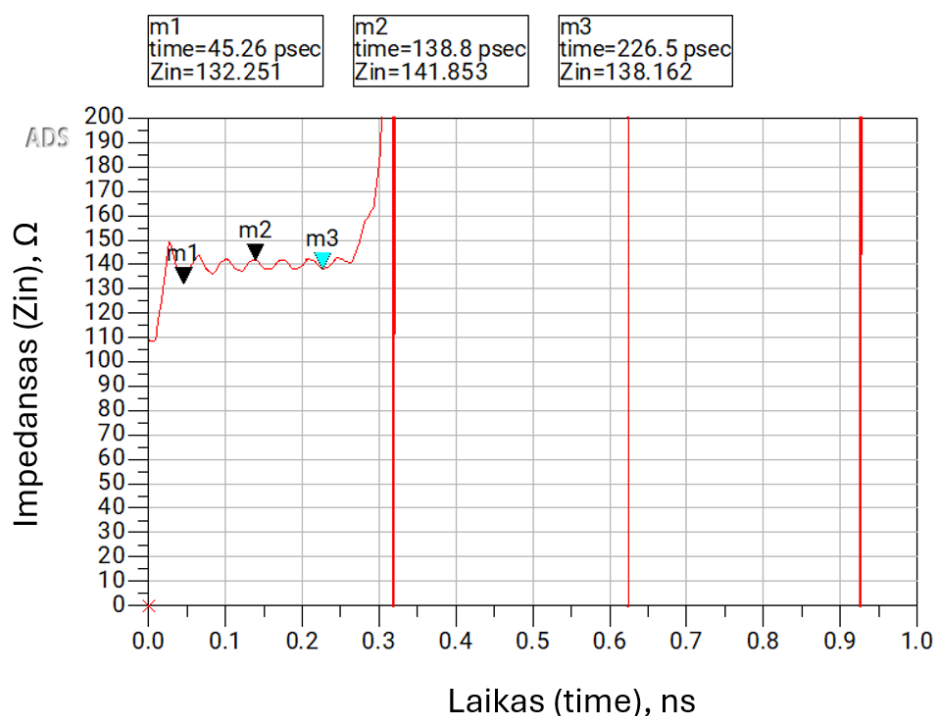
Atliekant PEEK mikrojuostelinių linijų modeliavimą PEEK medžiagos parametrai ADS Keysight programoje nėra keičiami, tačiau yra koreguojama mikrojuostelinės linijos plokštės sandara. Kaip anksčiau minėta PEEK elektrodai padengti 3,5–4 μm storio vario sluoksniu, todėl modeliuojamos PEEK mikrojuostelinės linijos plokštės vario sluoksnis parenkamas 3,75 μm (2.66 pav.).



2.66 pav. PEEK mikrojuostelinės linijos plokštės sandara (ADS Keysight).

PEEK mikrojuostelinės linijos schema, topologija, elektromagnetinis modeliavimas ir TDR modeliavimas atliekamas taip pat kaip ir PTFE mikrojuostelinės linijos. Gautas PEEK 3 cm ilgio ir 300 μm pločio mikrojuostelinės linijos TDR grafikas pavaizduotas 2.67 pav.

Iš 2.67 pav. matoma, kad minimalus ir maksimalus modeliuojamos PEEK mikrojuostelinės linijos impedansas yra atitinkamai $m_3 = 138,162 \, \Omega$ ir $m_2 = 141,853 \, \Omega$, o vidutinis impedansas $m_{avg} = 140,0075 \, \Omega$ (29 funkcija).



2.67 pav. PEEK mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).

2.3.3. Elektrodų matavimų ir modeliavimų rezultatų apibendrinimas

Kaip matoma iš PTFE elektrodų matavimų (2.59 pav.) ir modeliavimo (2.65 pav.) duomenų, PTFE elektrodų matavimų vidutinės impedanso vertės svyruoja $[147,949 ; 156,887] \, \Omega$ diapazone, o sumodeliuotos PTFE mikrojuostelinės linijos impedansas – $[157,42 ; 167,54] \, \Omega$ diapazone. Lyginant apskaičiuotus vidutinį visų matuotų PTFE elektrodų impedansą ($152,113 \, \Omega$) ir modeliuotos mikrojuostelinės linijos vidutinį impedansą ($162,48 \, \Omega$) matoma, kad PTFE išmatuotų elektrodų vidutinis impedansas yra $\sim 10 \, \Omega$ mažesnis nei modeliuotos PTFE mikrojuostelinės linijos.

Taip pat iš PEEK elektrodų matavimų (2.60 pav.) ir modeliavimo (2.67 pav.) matoma, kad PEEK elektrodų matavimų vidutinės impedanso vertės svyruoja $[134,676 ; 137,808] \, \Omega$ diapazone, o sumodeliuotos PTFE mikrojuostelinės linijos impedansas – $[138,162 ; 141,853] \, \Omega$ diapazone. Lyginant apskaičiuotus vidutinį visų matuotų PEEK elektrodų impedansą ($135,920 \, \Omega$) ir modeliuotos mikrojuostelinės linijos vidutinį impedansą ($140,0075 \, \Omega$) matoma,

kad PEEK išmatuotų elektrodų vidutinis impedansas yra $\sim 4 \Omega$ mažesnis nei modeliuotos PEEK mikrojuostelinės linijos.

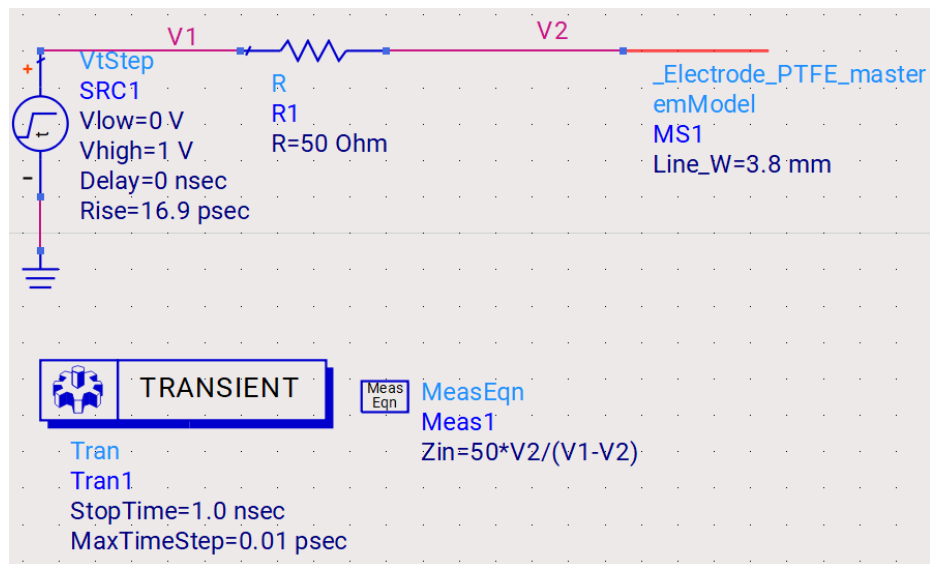
Išmatuotų ir modeliuotų elektrodų impedansų skirtumas, tikėtina, yra dėl pasirinkto per plataus TDR matavimų analizės ruožo, kuris apėmė ir dalį pereinamųjų procesų tarp VNA laido adatos ir PTFE bei PEEK elektrodų. Arba elektrodų mikrojuostelinės linijos yra per trumpos ir neužtenka linijų ilgio, kad būtų išmatuoti realūs PTFE ir PEEK elektrodų impedansai pasibaigus pereinamiesiems procesams. Matuojant palyginti trumpos (3 cm) mikrojuostelinės linijas, yra ganėtinai sudėtinga grafiškai nustatyti mikrojuostelinės linijos TDR matavimų analizės pradžios ir pabaigos režius, kurie neįskaitytų netikslumus sukuriančių pereinamųjų procesų diapazonų.

Tačiau dar kelios, išmatuotų ir modeliuotų mikrojuostelinių linijų impedansų neatitikimo, priežastys gali būti dielektrinės konstantos pokytis, medžiagų sandarų ypatumai ir netinkamos dielektrinės konstantos pasirinkimas modeliavimo metu. Bei PTFE ir PEEK plokščių paviršiaus modifikavimas frezavimo metu, ko pasėkoje gali netolygiai kisti plokščių storis.

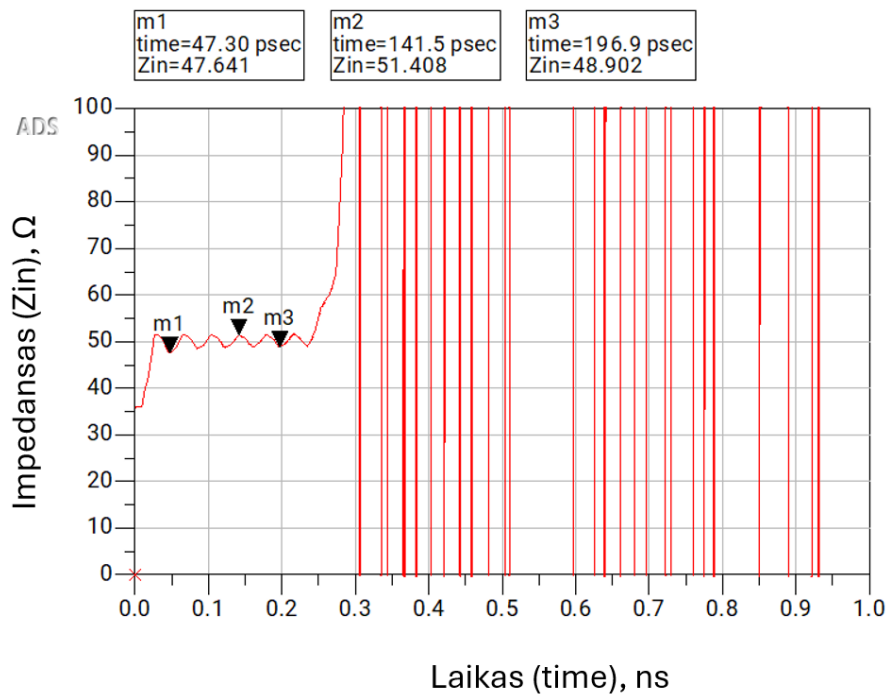
Galiausiai įvertinus anksčiau aprašytas išmatuotų ir modeliuotų elektrodų impedansų skirtumų priežastis buvo nuspręsta nekeisti modeliavimo metu naudojamos dielektrinės konstantos ir tęsti GPS sekiklio ir GPS L1 antenų projektavimą.

2.3.4. PTFE ir PEEK 50Ω mikrojuostelinių linijų TDR modeliavimas

PTFE ir PEEK 50Ω mikrojuostelinių linijų TDR modeliavimas atliekamas, naudojant 2.3.2 poskyryje sukurtus mikrojuostelinių linijų modelius *ADS Keysight* programoje. Keičiant linijų pločius (*Line_W*) $10 \mu\text{m}$ tikslumus atliekamas TDR modeliavimas ir taip ieškoma tokio linijos pločio, su kuriuo linijos impedansas būtų artimas arba lygus 50Ω . 2.68–2.71 pav. pavaizduotos sumodeliuotos PTFE ir PEEK 50Ω mikrojuostelinės linijos ir jų TDR grafikai.

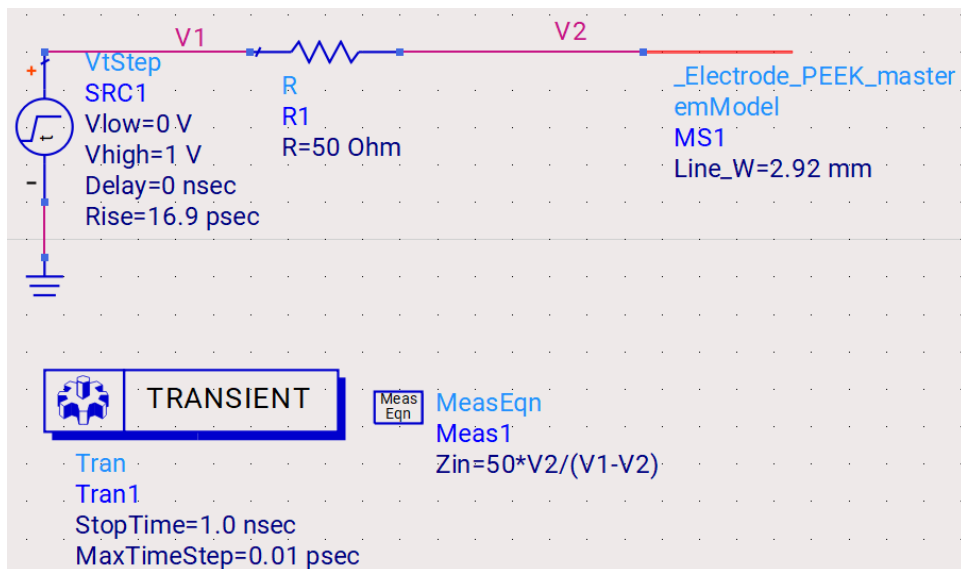


2.68 pav. 50 Ω PTFE mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight).

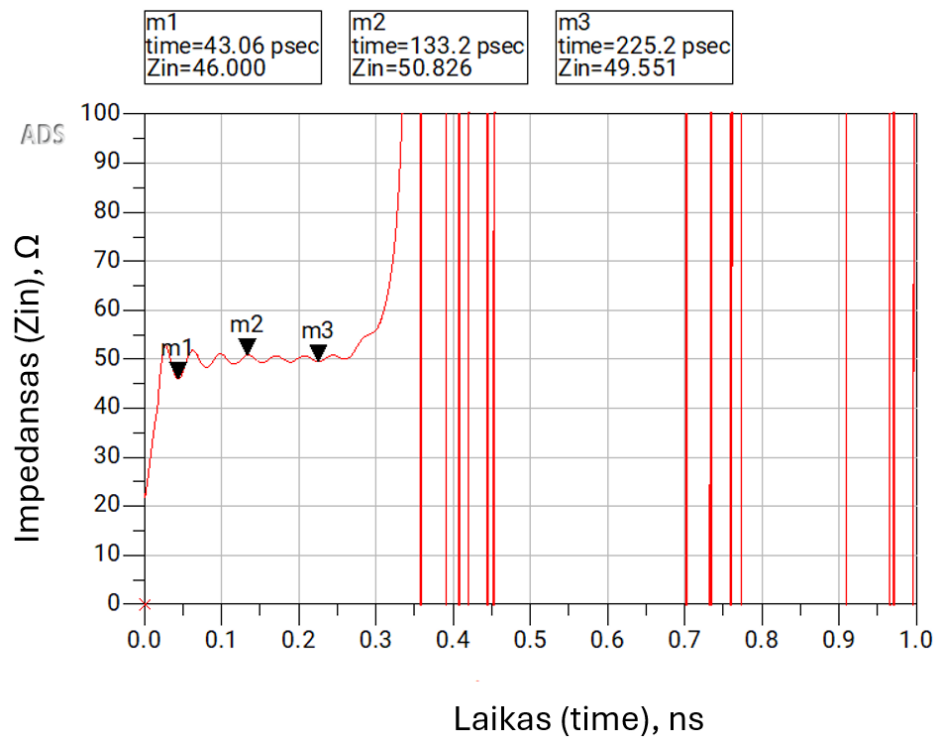


2.69 pav. 50 Ω PTFE mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.68–2.69 pav., 3,8 mm PTFE mikrojuostelinės linijos impedansas kinta [48,902 (m_3) ; 51,408 (m_2)] Ω ribose, o vidutinis impedansas yra lygus $m_{avg} = 50,155 \Omega$ (29 funkcija).



2.70 pav. 50 Ω PEEK mikrojuostelinės linijos TDR modeliavimo schema (ADS Keysight).



2.71 pav. 50 Ω PEEK mikrojuostelinės linijos TDR grafikas (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.70–2.71 pav. 2,92 mm PEEK mikrojuostelinės linijos impedansas kinta $[49,551 (m_3) ; 50,826 (m_2)] \Omega$ ribose, o vidutinis impedansas yra lygus $m_{avg} = 50,1885 \Omega$ (29 funkcija).

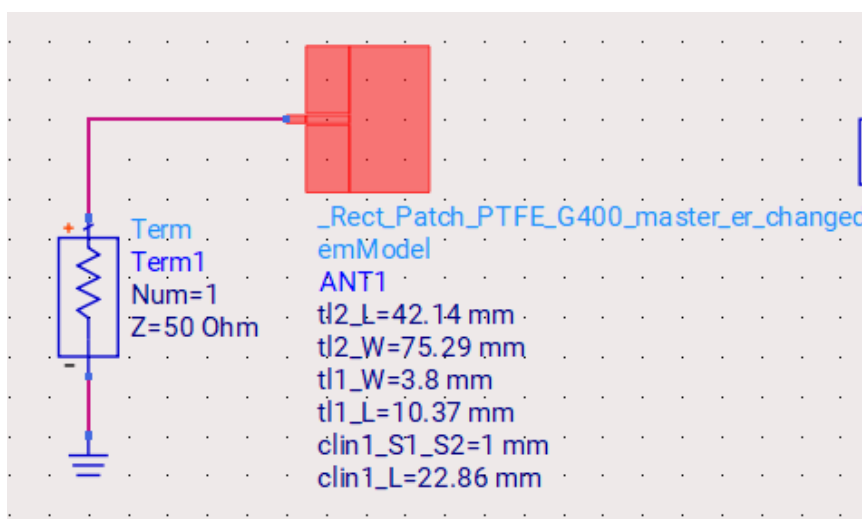
2.3.5. Antenų optimizavimas

Atlikus $50\ \Omega$ PTFE ir PEEK mikrojuostelinių linijų modeliavimus ir suradus linijų pločius atitinkančius arba artimus $50\ \Omega$, atnaujinami PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų pločiai.

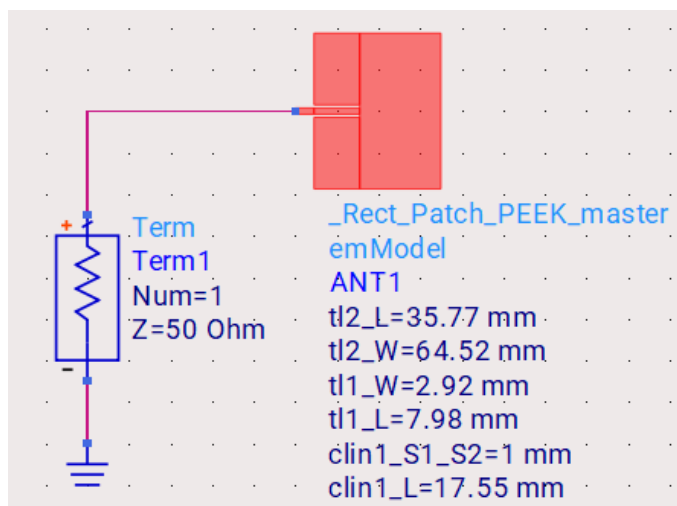
Antenų optimizavimas atliekamas tokiais etapais:

1. Pakeičiami PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų pločiai į, apskaičiuotus $50\ \Omega$ mikrojuostelinių linijų pločius, atitinkamai 3,8 mm ir 2,92 mm.
2. PTFE antenos pradiniai medžiagos parametrai (2.31 pav.) pakeičiami į, mikrojuostelinių linijų modeliavimo metu, pakoreguotos medžiagos parametrus (2.62 pav.). Tai atliekama norint pakeisti PTFE medžiagos dielektrinę konstantą iš 2,075 į 2,1. Taip pat, PEEK antenos plokštės sandara (2.40 pav.) pakeičiama, į mikrojuostelinių linijų modeliavimo metu, pakoreguotą plokštės sandarą (2.66 pav.). Tai atliekama norint pakeisti anksčiau aprašytą PEEK medžiagos vario storį iš $7\ \mu\text{m}$ į $3,75\ \mu\text{m}$.
3. Atliekami antenų S_{11} parametrų modeliavimai ir koregavimai keičiant antenų $tl2_L$ parametru $10\ \mu\text{m}$ tikslumu.
4. Atlikus antenų parametrų modeliavimą, atliekamas vientisos antenos topologijos generavimas iš 3 atskirų antenos dalių.
5. Atliekami galutiniai vientisos antenos S_{11} ir TDR modeliavimai.

Galutiniai PTFE ir PEEK antenų matmenys su pakeistais maitinimo linijų pločiais bei optimizuotu $tl2_L$ parametru pateikti 2.72–2.73 pav.



2.72 pav. Galutiniai optimizuoti PTFE antenos parametrai (ADS Keysight).



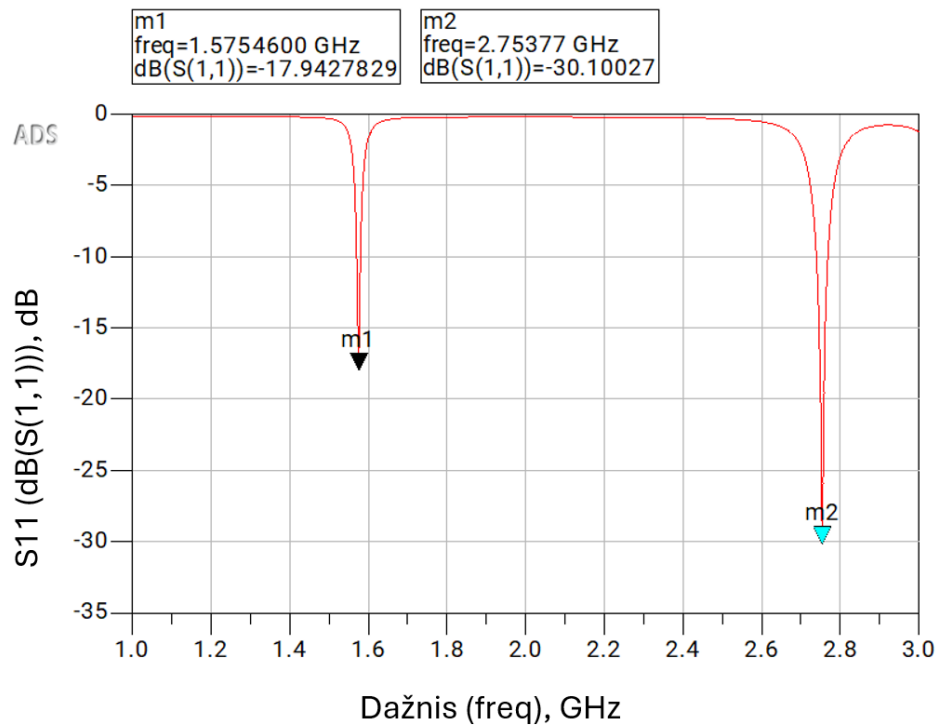
2.73 pav. Galutiniai optimizuoti PEEK antenos parametrai (ADS Keysight).

2.72–2.73 pav. pavaizduoti galutiniai PTFE ir PEEK antenų parametrai surašyti 2.14 lentelėje. Papildomas MACLIN3 $W1$, $W2$ pločių skaičiavimas atliekamas naudojant 28 funkciją. Taip pat 2.14 lentelėje apskaičiuojami minimalūs antenų plokščių matmenys Wg ir Lg (19–20 funkcijos).

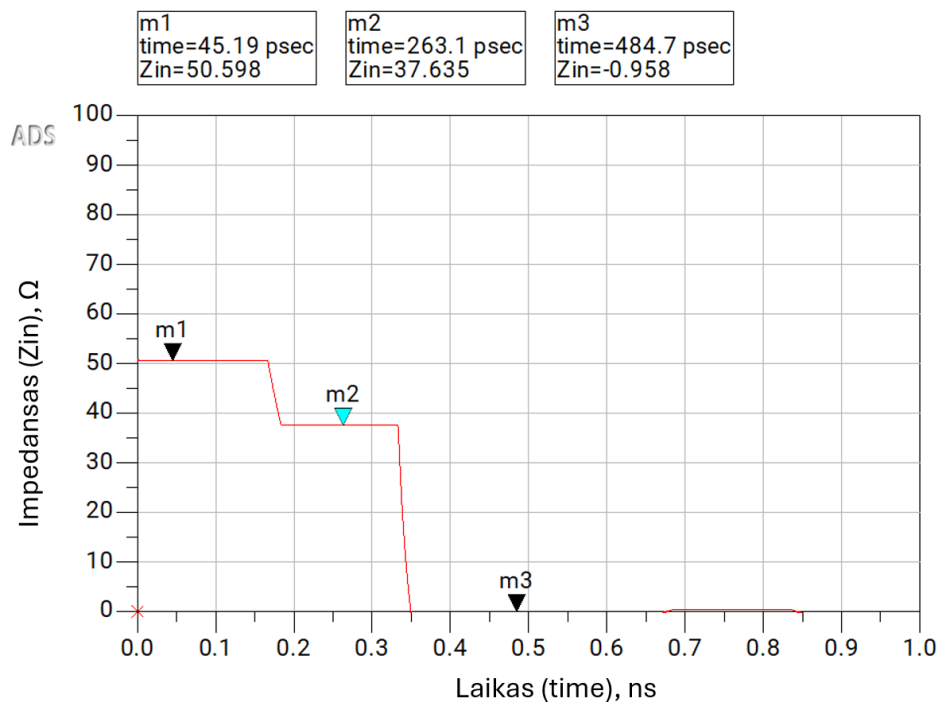
2.14 lentelė. Galutiniai PTFE ir PEEK antenų matmenys.

Antenos schemos parametrai	PTFE antenos matmenys, mm	PEEK antenos matmenys, mm
$tl1_W$	3,8	2,92
$tl1_L$	10,37	7,98
$clin1_S1_S2$	1	1
$clin1_L$	22,86	17,55
$tl2_W$	75,29	64,52
$tl2_L$	42,14	35,77
MACLIN3 $W1$, $W3$	34,245	29,8
Wg	82,49	71,72
Lg	72,2	60,52

Po galutinių antenų parametrų nustatymo sukuriama vientisos antenų topologijos, 3 atskiras mikrojuostelines linijas sujungiant tarpusavyje į vientisą anteną, taip pat kaip buvo daroma antenų modeliavimo metu (2.27 pav.). Sukūrus vientisas PTFE ir PEEK antenas atliekami antenų S_{11} parametro ir TDR modeliavimai, kurių rezultatai pavaizduoti 2.74–2.77 pav.

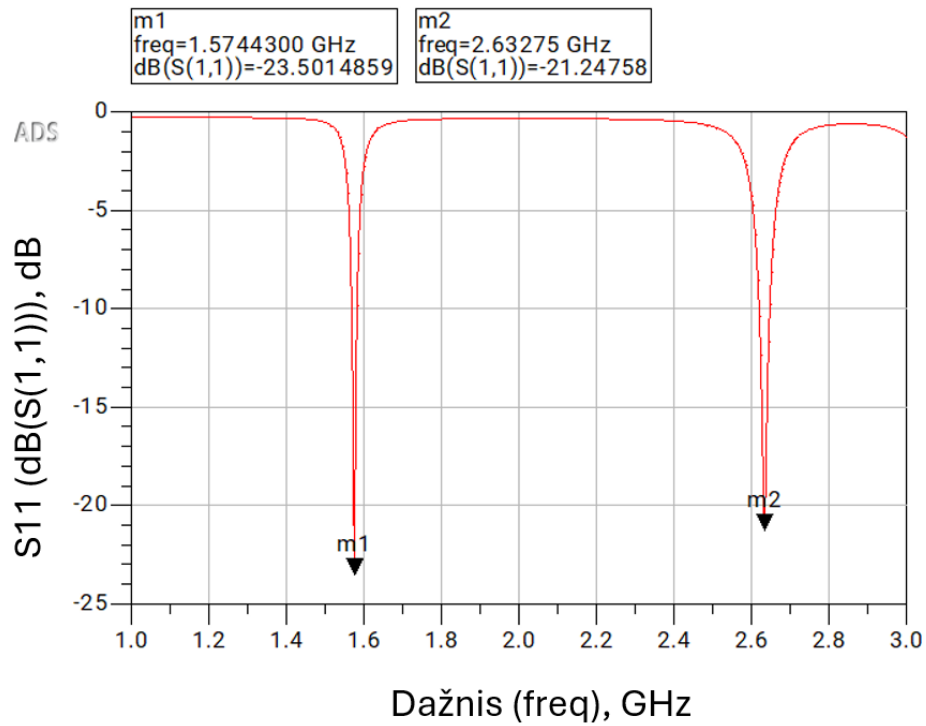


2.74 pav. Galutinės vientisos PTFE antenos S_{11} parametro grafikas (ADS Keysight).

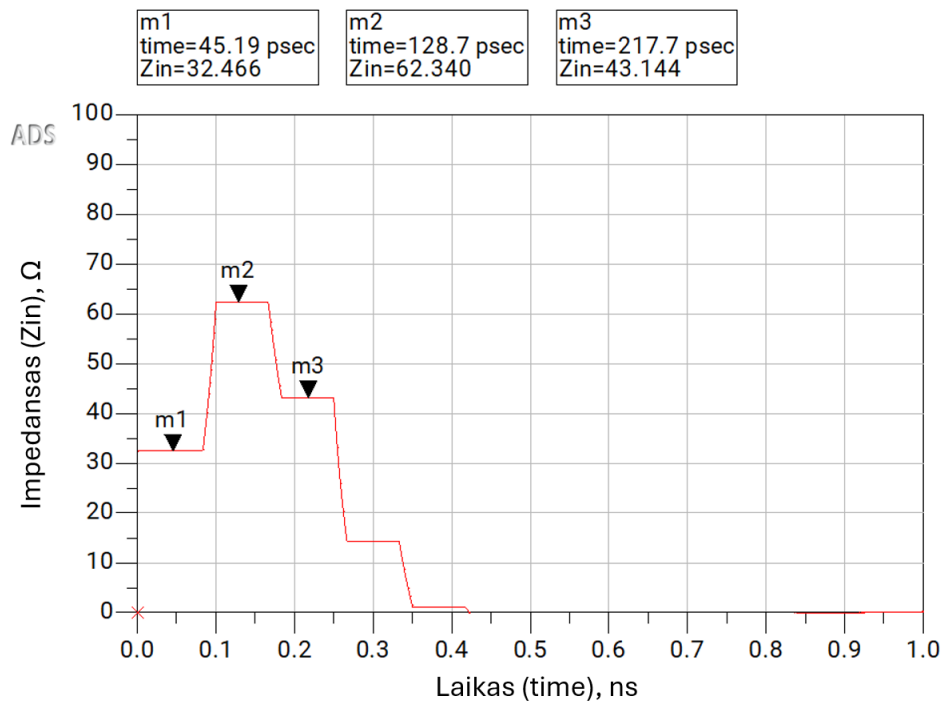


2.75 pav. Galutinės vientisos PTFE antenos TDR grafikas (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.74–2.75 pav. galutinės vientisos PTFE antenos vienas iš S_{11} parametro pikų ($m_1 = 1,57546$ GHz) yra artimas GPS L1 signalo centriniam dažniui ir įeina į GPS L1 signalo dažnių ruožą (1.2 lentelė), o antenos įėjimo impedansas lygus 50,598 Ω (m_1).



2.76 pav. Galutinės vientisos PEEK antenos S_{11} parametro grafikas (ADS Keysight).



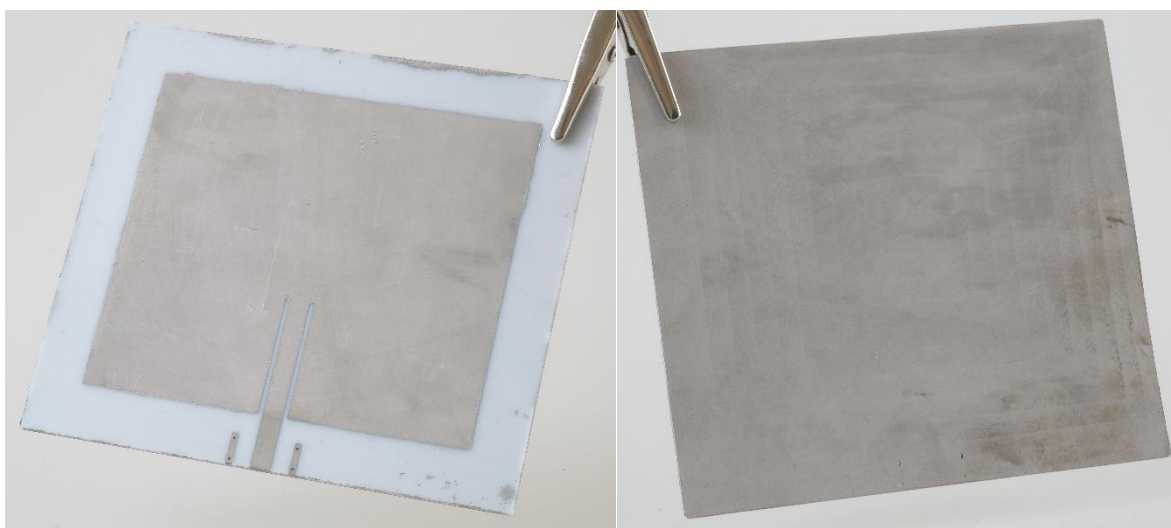
2.77 pav. Galutinės vientisos PEEK antenos TDR grafikas (ADS Keysight).

Kaip matoma iš 2.76–2.77 pav. galutinės vientisos PEEK antenos vienas iš S_{11} parametro pikų ($m_1 = 1,57443$ GHz) yra artimas GPS L1 signalo centriniam dažniui ir įeina į GPS L1 signalo dažnių ruožą (1.2 lentelė), tačiau antenos įėjimo impedansas lygus 32,466 Ω (m_1).

Atlikus galutinį vientisų PTFE ir PEEK antenų modeliavimą duomenys surašomi į 2.14 lentelę ir šie duomenys bus naudojami antenų gamybai naudojant SSAIL technologiją.

2.4. SSAIL technologija sukurtų antenų testavimas

Kuriant antenas, naudojant SSAIL technologiją, PTFE antenos padengiamos daugiau nei $5\text{ }\mu\text{m}$ vario sluoksniu, PTFE – $3,5\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ vario sluoksniu. Papildomai PTFE ir PEEK antenos padengiamos $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ nikelio sluoksniu, siekiant apsaugoti antenas nuo vario sluoksnio oksidacijos. Pagamintos antenos pavaizduotos 2.78–2.79 pav.



2.78 pav. SSAIL technologija pagaminta PTFE antenos: viršutinis sluoksnis (kairė), apatinis sluoksnis (dešinė).



2.79 pav. SSAIL technologija pagaminta PEEK antenos: viršutinis sluoksnis (kairė), apatinis sluoksnis (dešinė).

2.4.1. Antenų matavimai

Sukūrus PTFE ir PEEK antenas atliekami antenų S_{11} parametro ir TDR matavimai naudojant SIGLENT SNA5032A VNA. Antenų matavimai atliekami tokioje pačioje aplinkoje kaip ir PTFE ir PEEK elektrodų impedanso matavimai (2.3.1. poskyris). Antenų matavimai atliekami šiais etapais:

1. Antenų kraštai, ties SMA jungčių litavimo aikštelėmis, yra apskutami, taip pašalinant ant plokščių kraštų nusėdusį vario sluoksnį.
2. Su multimetru pratestuojami antenų viršutinio sluoksnio žemės aikštelių kontaktai su apatiniu žemės sluoksniu, patikrinama ar antenos sluoksnis nesusijungia su žemės sluoksniais bei pratestuojama ar yra kontaktas tarp antenos maitinimo linijos pradžios ir antenos pabaigos.
3. Sulituojamos antenų SMA jungtys.
4. Atliekami antenų S_{11} parametro ir TDR matavimai antenas laikant taip, kad antenos sluoksnio plokštuma būtų paraleli žemės paviršiui ir nukreipta į viršų.
5. Atlikus matavimus, VNA matavimo duomenys išeksportuojami į .csv tipo failus ir grafikai nubraižomi naudojant *MATLAB Online* programą (C priedas).

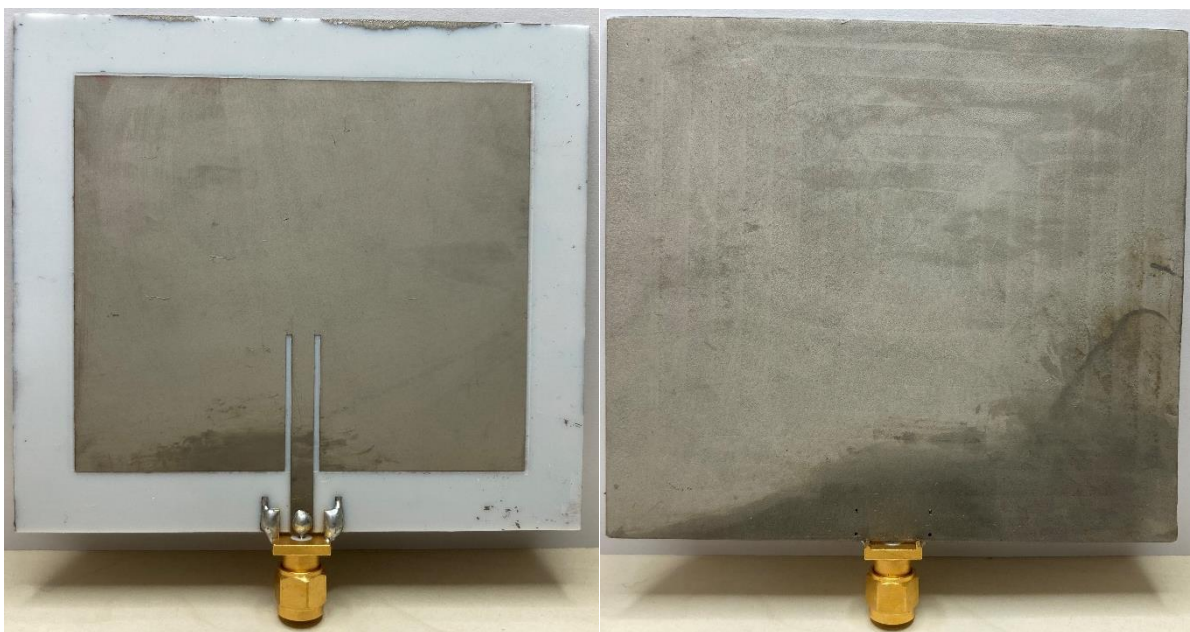
Antenų kraštų apskutimas atliekamas norint išvengti antenos ir žemės sluoksnio susijungimo tarpusavyje, kai bus sulituotos antenų SMA jungtys. Pratestavus antenų kontaktus su multimetru įsitikinta, kad antenų sluoksniai nėra susijungę su žemės sluoksniais ir visi viršutiniai antenų žemės sluoksniai turi kontaktą su apatiniais žemės sluoksniais.

Litavimui naudojamas 60 % alavo ir 40 % švino lydmetalio, kurio lydymo temperatūra yra ~180 °C, bei fliusas. Lituojant antenų SMA jungtis pastebėta, kad, dėl ant antenų nusodinto nikelio sluoksnio, lydmetalio itin sunkiai kimba prie litavimo aikštelių. Todėl, naudojant smulkų švitrinį popierių (2000–4000 grūdėtumo), atliekamas antenų litavimo aikštelių šveitimas atidengiant vario sluoksnį. Atlikus paviršiaus šveitimą, naudojant ~180–190 °C karštą orą, sulituojamos antenų SMA jungtys (2.80–2.82 pav.).

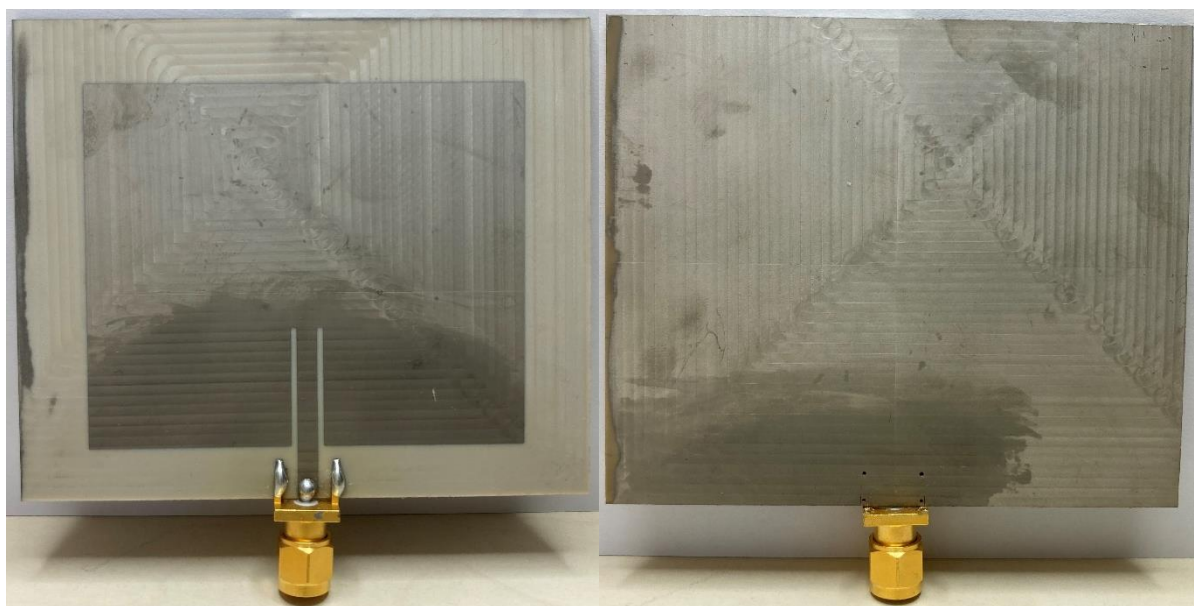
Prieš testuojant antenas buvo pastebėti keli pagamintų antenų trūkumai:

1. Antenų pagrindai yra minimaliai per stori ir SMA jungtys itin sunkiai užsideda ant antenų litavimo aikštelių. Todėl nuspręsta SMA jungtis apkarpyti ir lituoti tik ant viršutinių antenų litavimo aikštelių.
2. PTFE antenos SMA jungties viršutinio žemės kontakto litavimo aikštelės, projektavimo metu, buvo atitrauktos per dideliu atstumu nuo antenos maitinimo linijos, todėl lituojant SMA jungtį naudojamos papildomos laido atkarpos norint sujungti SMA jungties ir antenos viršutinius žemės sluoksnius.

3. Kadangi PTFE antenos kraštai vietomis matomi netolygūs, t. y. pasidengę papildomu vario sluoksniu, atliekamas PTFE antenos kraštų lyginimas su lazeriu, taip nuimant perteklinį, netolygų vario ir nikelio sluoksnį.



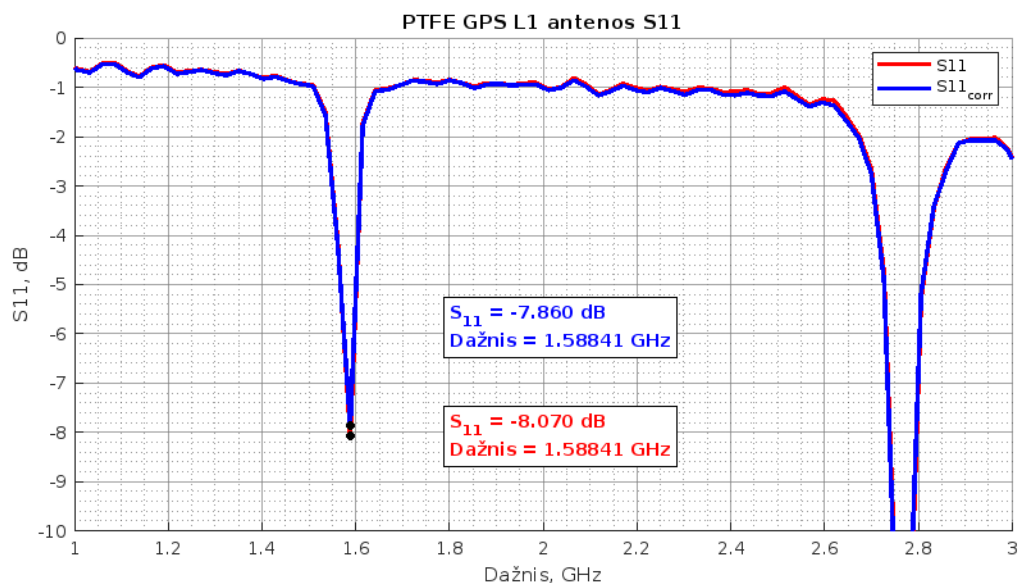
2.80 pav. Matavimams paruoštos PTFE antenos: viršus (kairė), apačia (dešinė).



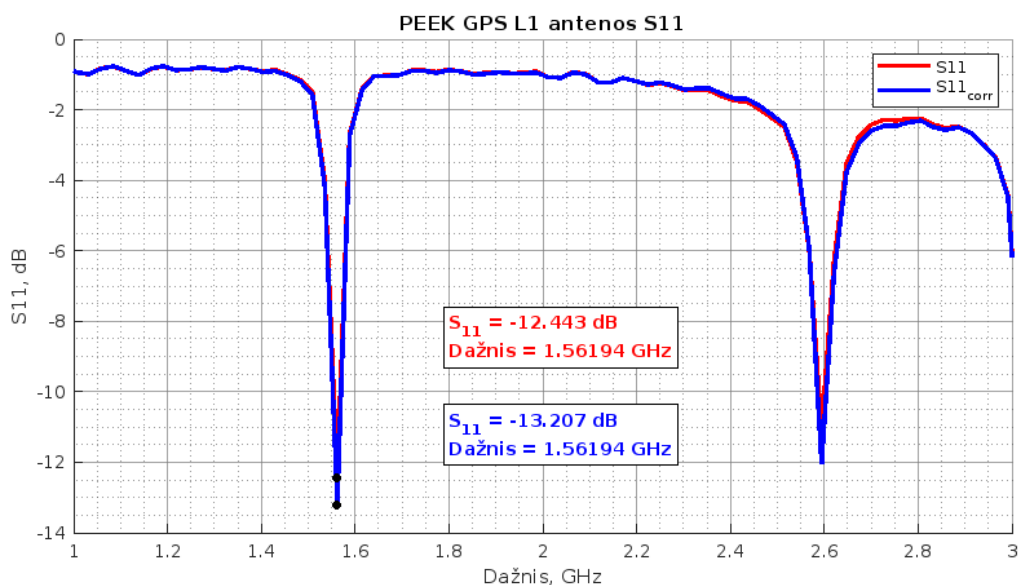
2.81 pav. Matavimams paruoštos PEEK antenos: viršus (kairė), apačia (dešinė).

Atliekant antenų matavimus buvo naudojami du skirtingi VNA kalibravimo duomenų failai. Pirma, antenų S_{11} parametro ir TDR matavimai atliekami su numatytu VNA gamintojo kalibravimu. Antra, antenų matavimai atliekami su VilniusTech laboranto Tado Kiaunės pateiktu VNA kalibravimo duomenų failu. Gauti matavimų rezultatai pateikiami 2.82–2.85 pav. Prieš atliekant matavimus nustatomas TDR matavimų pradžios taškas, kuriame VNA TDR

grafikas pradeda staigiai didėti iki begalybės. Šiuo atveju nustatytas VNA TDR matavimų pradžios laikas yra 8,6 ns.



2.82 pav. PTFE antenos S_{11} parametro grafikas.



2.83 pav. PEEK antenos S_{11} parametro grafikas

Kaip matoma iš 2.82–2.83 pav. PTFE ir PEEK antenų S_{11} parametras naudojant gamintojo numatytą kalibravimą (S_{11} – raudonas grafikas) gaunamas atitinkamai -8,07 dB ties 1,58841 GHz ir -12,443 dB ties 1,56194 GHz. O pakeitus VNA kalibravimo parametrus, gautos PTFE ir PEEK antenų S_{11} parametrai (S_{11_corr} – mėlynas grafikas) vertės yra atitinkamai -7,86 dB ties 1,58841 GHz ir -13,207 dB, ties 1,56194 GHz.

Kaip matoma tiek PTFE, tiek PEEK antenų S_{11} parametrai nėra artimi GPS L1 signalo centriniam dažniui, bei išeina iš GPS L1 signalo dažnių ruožo (1.2 lentelė). Taip pat pastebima, kad kalibravimo parametrų keitimas nekeičia antenų S_{11} pikų dažnių, o keičia S_{11} parametrų vertes ties anksčiau aprašytais dažniais. Iš grafikų matoma, kad pakeitus gamintojo numatytus kalibravimo parametrus, PTFE antenos S_{11} parametro vertė padidėja 0,21 dB, o PEEK antenos – sumažėja 0,764 dB. Kaip minėta anksčiau, kuo antenos S_{11} parametras mažesnis, tuo geriau, nes tai parodo, kad antena atspindi nedidelę įėjimo signalo dalį atgal į įėjimą ir antenos impedanso suderinamumas su charakteringąja sistemos varža (50 Ω) yra geras.

2.84–2.85 pav. antenų TDR matavimų grafikuose yra pavaizduoti TDR matavimų rėžiai (mėlynos vertikalios linijos) ir TDR matavimų analizės rėžiai (juodos vertikalios linijos). TDR matavimų ir analizės rėžiai parenkami tokiu pačiu būdu kaip ir elektrodų matavimuose. Prie VNA prijungus tik kabelį, žinant VNA kabelio ilgį (1000 mm) apskaičiuojama VNA skiriamoji geba, kai TDR matavimų pradžios taškas grafikų laiko ašyje nustatytas 8,6 ns. Šiuo atveju VNA skiriamoji geba nustatyta 0,0086 ns/mm. Remiantis 2.14 lentelės duomenimis ir žinant SMA jungties ilgį (12,6746 mm) apskaičiuojami antenų maitinimo linijų ilgių atitikmenys TDR grafikų laiko ašyse (2.15 lentelė).

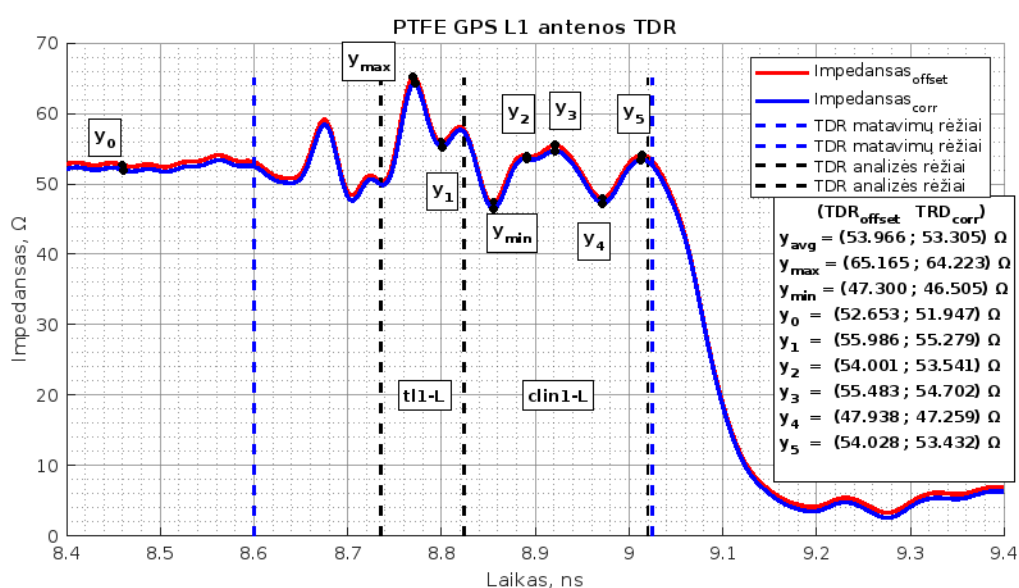
2.15 lentelė. PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų matmenų atitikmenys TDR grafikų laiko ašyje.

Antenos parametras	PTFE antenos laiko srities atitikmuo, ns	PEEK antenos laiko srities atitikmuo, ns
<i>tl1_L</i> , mm	0,089182	0,068628
<i>clin1_L</i> , mm	0,196596	0,15093
SMA jungties ilgis	0,10900156	
Trukmių suma	0,39477956	0,32855956

Pagal apskaičiuotas trukmes PTFE ir PEEK antenų TDR matavimų rėžiai yra atitinkamai [8,6 ; ~9] ns ir [8,6 ; ~8,93] ns (2.84–2.85 pav.). Teoriškai apskaičiuoti TDR matavimų analizės pradžios taškai abejoms antenoms atitinka SMA jungties užimamos trukmės ir TDR matavimų pradžios taško sumą: ~8,709 ns. Tačiau, kaip matoma 2.84–2.85 pav. grafikuose, TDR analizės pradžios taškas pasirenkamas 8,735 ns, nes matoma, kad ties šiuo tašku baigiasi SMA jungtys pereinamieji procesai. TDR analizės pradžios taško poslinkis atsiranda dėl to, kad antenų matavimų metu papildomai buvo naudojamas SMA jungčių adapteris, kurio ilgis (apskaičiuotas iš grafiko duomenų) yra nustatomas ~3,023 mm (0,026 ns). Prie 2.15 lentelėje apskaičiuotų trukmių sumos pridėjus SMA jungčių adapterio trukmę gaunami antenų TDR matavimų ir analizės pabaigos rėžiai: PTFE ~9,02 ns, PEEK ~8,96 ns.

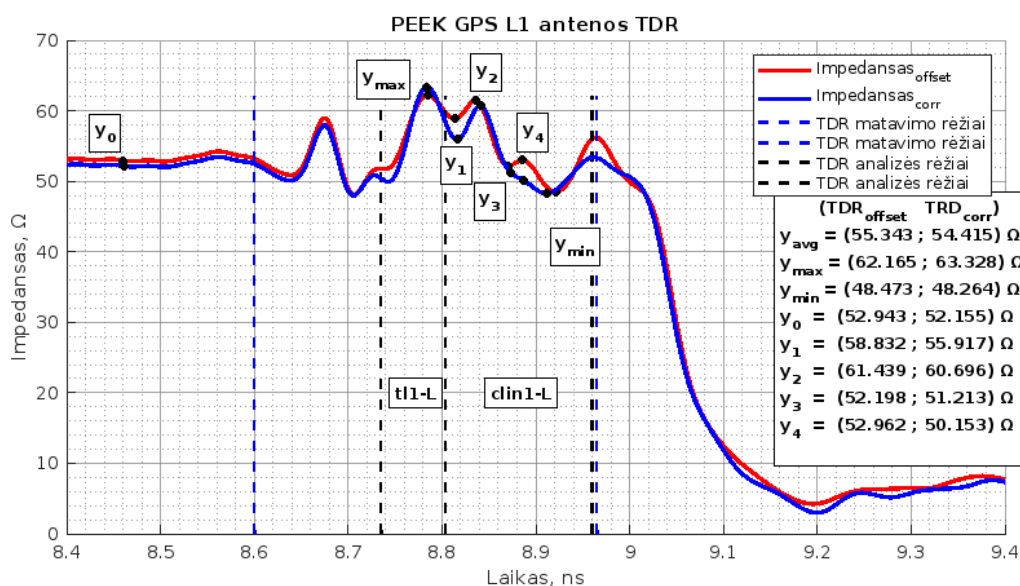
2.84–2.85 pav. antenų TDR grafikuose yra mėlynomis linijomis pavaizduoti TDR matavimų rėžiai ir juodomis – TDR matavimų analizės rėžiai. TDR analizės rėžiai taip pat

išskirstyti į dvi dalis: *tl1*-L ir *clin1*-L, kurios nurodo matuojamas antenos maitinimo linijos dalis, atitinkamai *tl1* L ir *clin1* L (2.15 lentelė).



Analizuojant 2.84 pav. PTFE antenos TDR grafiką matoma, kad tiek raudonas, tiek mėlynas grafikai rodo VNA kabelio impedanso pokytį nuo $50\ \Omega$ impedanso į atitinkamai $52,653\ \Omega$ (TDR_{offset}) ir $51,947\ \Omega$ (TDR_{corr}) (y_0). VNA kabelio impedanso pokytis nuo $50\ \Omega$ tikėtina atsiranda dėl antenos generuojamo per didelio atspindžių kiekio. Iš grafike aprašytų taškų matoma, kad, priklausomai nuo grafiko taško, poslinkis tarp raudono ir mėlyno grafikų impedanso ašyje svyruoja nuo kelių šimtų mili-omų iki daugiau nei vieno omo.

Atlikus tl1-L ir clin1-L PTFE antenos maitinimo linijos atkarpų impedansų vidurkinimą gaunamas vidutinis antenos maitinimo linijos impedansas – $53,966 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $53,305 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_{avg}).



2.85 pav. PEEK antenos TDR grafikas.

Analizuojant 2.85 pav. PEEK antenos TDR grafiką matoma, kad tiek raudonas, tiek mėlynas grafikai rodo VNA kabelio impedanso pokytį nuo 50Ω impedanso į atitinkamai $52,943 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $52,155 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_0). VNA kabelio impedanso pokytis nuo 50Ω tikėtina atsiranda dėl antenos generuojamo per didelio atspindžių kiekio. Iš grafike aprašytų taškų matoma, kad, priklausomai nuo grafiko taško, poslinkis tarp raudono ir mėlyno grafikų impedanso ašyje svyruoja nuo kelių šimtų mili-omų iki daugiau nei vieno omo.

Analizuojant tl1-L antenos maitinimo linijos atkarpą matoma, kad maksimalus linijos impedansas yra $62,165 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $63,328 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_{max}), o minimalus – $\sim 52 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $\sim 50 \Omega$ (TDR_{corr}) (ties $\sim 8,745$ ns). O clin1-L maitinimo linijos atkarpos maksimalus impedansas yra $61,439 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $60,696 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_2), o minimalus – $48,473 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $48,264 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_{min}).

Atlikus tl1-L ir clin1-L PTFE antenos maitinimo linijos atkarpų impedansų vidurkinimą gaunamas vidutinis antenos maitinimo linijos impedansas – $55,343 \Omega$ (TDR_{offset}) ir $54,415 \Omega$ (TDR_{corr}) (y_{avg}).

2.4.2. Apibendrinimas

Apibendrinant rezultatus galima paminėti, kad matuojant antenų įėjimo impedansus bei S_{11} parametrus vertėtų atsižvelgti į grafiką, kuriame naudotas VilniusTech laboranto Tado

Kiaunės VNA kalibravimo parametrų failas ($\text{Impedansas}_{\text{corr}}$, TDR_{corr}), kadangi su šiais kalibravimo parametrais VNA tinkamai, be nuokrypių, matuoja etalonines 50 Ω mikrojuostelines linijas.

Iš gautų PTFE ir PEEK antenų TDR grafikų (2.84–2.85 pav.) matoma, kad, tikėtina, dėl antenų generuojamų per didelio atspindžių kiekio VNA kabelio 50 Ω impedansas pakinta į atitinkamai 51,947 Ω ir 52,155 Ω . PTFE antenos maitinimo linijos *tl1_L* atkarpos impedanso maksimumas ir minimumas yra atitinkamai 64,223 Ω ir 55,279 Ω , o *clin1_L* atkarpos – 54,702 Ω ir 46,505 Ω . PEEK antenos maitinimo linijos *tl1_L* atkarpos impedanso maksimumas ir minimumas yra atitinkamai 63,328 Ω ir ~50 Ω , o *clin1_L* atkarpos – 60,696 Ω ir 48,264 Ω . PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų vidutiniai impedansai išmatuoti atitinkamai 53,305 Ω ir 54,415 Ω . Kaip matoma, nė vienos antenos maitinimo linijos impedansas nėra lygus arba itin artimas 50 Ω .

Antenų S_{11} parametrai rodo, kad nė viena antena nėra tinkama GPS L1 signalo priėmimui, nes pagamintų antenų centriniai dažniai nėra GPS L1 signalo leidžiamų dažnių ruože. PTFE antenos S_{11} parametro pikas (-7,86 dB, 1,58841 GHz), artimiausias GPS L1 signalo dažnių ruožui, gaunamas didesnis už GPS L1 signalo dažnių ruožo maksimumą (1,586 GHz) (1.2 lentelė). O PEEK antenos S_{11} parametro pikas (-13,207 dB, 1,56194 GHz) – gaunamas mažesnis už GPS L1 signalo dažnių ruožo minimumą (1,565 GHz) (1.2 lentelė).

Tikėtina, pagamintų PTFE ir PEEK antenų S_{11} parametrų ir maitinimo linijų impedansų rezultatai gauti netinkami dėl kelių priežasčių:

1. Netinkamai nustatytos medžiagų dielektrinės modeliavimo metu.
2. Nustatyti per maži antenų iškarpų pločiai (W_0) ir dėl to maitinimo linijos interferuoja su aplinkiniais antenos sluoksniais.
3. Frezuotų PTFE ir PEEK sluoksniai yra netolygūs ir iškraipo antenų parametrus.
4. Padaryta klaida antenų teorinių parametrų skaičiavimo ir/arba modeliavimo metu.

3. GPS SEKIKLIO KŪRIMAS

GPS sekiklio kūrimas pradedamas nuo komponentų pasirinkimo. Renkantis sekiklio komponentus buvo atsižvelgta į komponentų esminius parametrus ir dydį. Išsirinkti GPS sekiklio pagrindiniai komponentai aprašyti 3.1 lentelėje.

Renkantis mobiliojo ryšio modulį buvo atsižvelgta į parametrus, turimas funkcijas ir dydį. NRF9160-SICA-B1A-R7 (toliau nRF9160) mobiliojo ryšio modulis buvo pasirinktas, nes:

1. Turi integruotą GPS L1 signalo imtuvą su gebėjimu priimti (-145,5–155) dBm minimalios galios signalus ir nustatyti poziciją 3–5 m tikslumu.
2. Turi integruotą LTE dažnių imtuvą-siųstuvą su 50 Ω išėjimu/įėjimu, 23 dBm galingumo išėjimu ir gebėjimą priimti (-107)–(-108) dBm minimalios galios signalus.
3. Yra 10x16x1,04 mm dydžio.
4. Turi reikiamus sertifikavimus ir galimybę priimti LTE-M ir NB-IoT tipo mobiliojo ryšio dažnius Europos Sąjungoje (3.1 pav.).
5. Geba palaikyti SIM ir eSIM mobiliojo ryšio korteles.
6. Turi PSM ir eDRX energijos taupymo režimus.

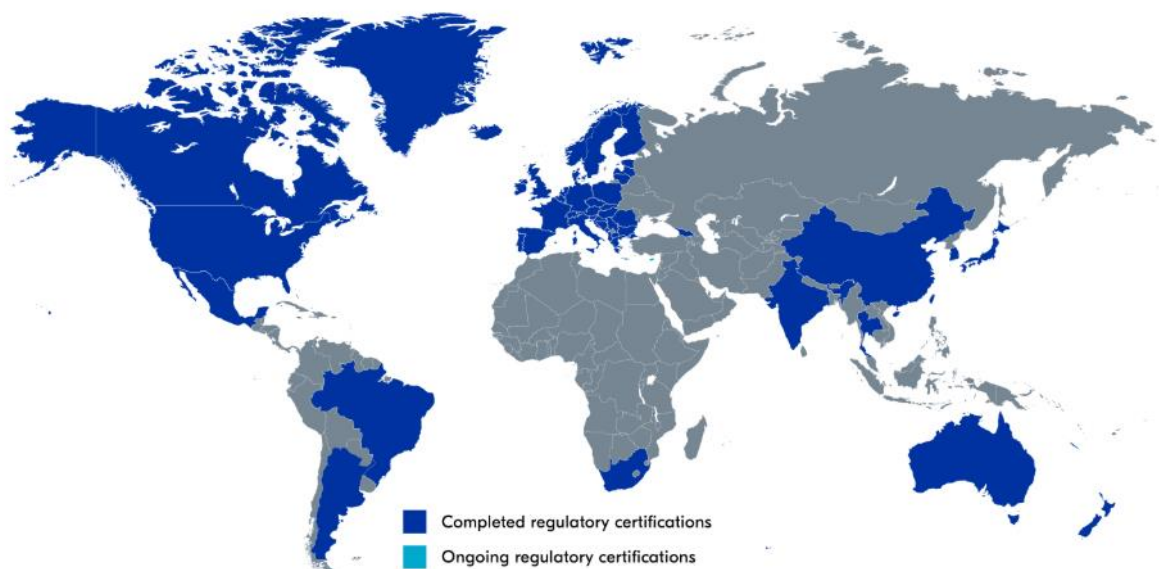
PSM (angl. *Power Saving Mode*) energijos taupymo režimo metu įrenginys yra nustatomas į miego režimą, kurio metu įrenginys naudoja itin minimalų energijos kiekį, o eDRX (angl. *Extended Discontinuous Reception*) energijos taupymo režimo metu įrenginys nustato atitinkamą periodą, kuris nurodo, kokių dažnių įrenginys išjungs miego režimą ir priims siunčiamus duomenų paketus.

Mobiliojo ryšio eSIM (angl. *Embedded Subscriber Identity Module*) ir SIM (angl. *Subscriber Identity Module*) kortelių palaikymas nurodo įrenginio galimybę palaikyti tiek fizines SIM korteles, tiek eSIM korteles integruotas į lustus.

3.1 lentelė. GPS sekiklio pagrindinių komponentų sąrašas.

Nr.	Komponento tipas	Gamintojas	Gamintojo kodas	Kiekis, vnt.
1	Mobiliojo ryšio modulis su integruoti GPS imtuvu	Nordic Semiconductor	NRF9160-SICA-B1A-R7	1
2	SAW filtras	RF360	B39162B4327P810	2
3	LNA stiprintuvas	Infineon	BGA725L6E6327FTSA1	1
4	GPS antenos jungtis	Hirose	U.FL-R-SMT-1(10)	1
5	LTE 4G/3/G2G antena	Taoglas	PA.710.A	1

Nr.	Komponento tipas	Gamintojas	Gamintojo kodas	Kiekis, vnt.
6	SIM kortelės laikiklis	TE Connectivity	2452796-1	1
7	EMI filtras su ESD apsauga	ST Microelectronics	EMIF03-SIM02M8	1



3.1 pav. nRF9160 modulio LTE-M tipo ir NB-IoT dažnių naudojimo sertifikavimas įvairiose šalyse: patvirtinta (mėlyna) ir patvirtinimas dar nebaigtas (žydra) (*nRF9160 Global ...*, 2025).

Paviršinės akustinės bangos (angl. *Surface Acoustic Wave*, toliau SAW) GPS L1 signalo filtrai ir mažus triukšmus generuojantis (angl. *Low-Noise Amplifier*, toliau LNA) stiprintuvas (3.1 lentelė, Nr. 2–3) yra skirti filtruoti ir stiprinti GPS L1 signalus. Šie komponentai naudojami, remiantis pasirinkto nRF9160 modulio, gamintojo pateiktomis periferinių įrenginių naudojimo rekomendacijomis. Taip pat vietoje specifinės GPS antenos naudojama aukštadažnė jungtis (3.1 lentelė, Nr. 4), leidžianti prie GPS sekiklio prijungti daugiau nei vieno tipo pasirinktą GPS anteną, pvz., keraminę linijinės poliarizacijos (angl. *Linear Polarization*, toliau LP) arba keraminę RHCP.

LTE 4G/3G/2G antena (3.1 lentelė, Nr. 5) pasirenkama atsižvelgiant į antenos dydį (40x5x6 mm), priimamų dažnių ruožą (4G/3G/2G signalai) ir efektyvumą (60–70 %).

Galiausiai pasirenkamas SIM kortelės laikiklis ir papildomas elektromagnetinių trukdžių (angl. *Electromagnetic Interference*, toliau EMI) filtras su apsauga nuo elektrostatinės iškrovos (angl. *Electrostatic Discharge*, toliau ESD). Pasirinktas SIM kortelės laikiklis leidžia prie įrenginio prijungti pasirinktą fizinę SIM kortelę, taip neprisirišant prie specifinio gamintojo eSIM kortelės ir programinės įrangos.

Testavimui nuspręsta sukurti trijų tipų schemas:

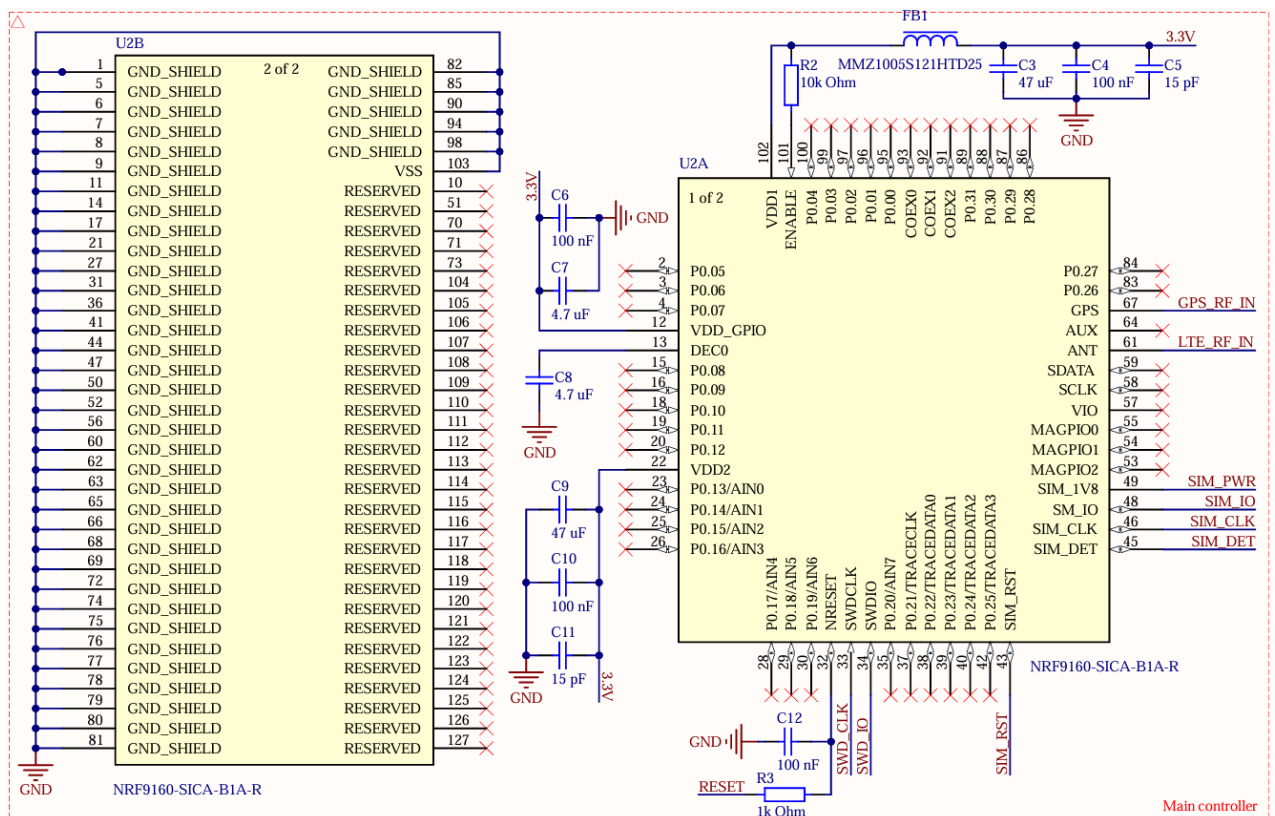
1. GPS sekiklio;
2. GPS L1 antenos;
3. Suderinimo grandinės tarp GPS sekiklio ir GPS L1 antenos.

3.1. GPS sekiklio ir papildomų plokščių schemų kūrimas

GPS sekiklio, GPS L1 antenos ir suderinimo grandinės plokščių kūrimas atliekamas naudojant *Altium 21.0.9* programą.

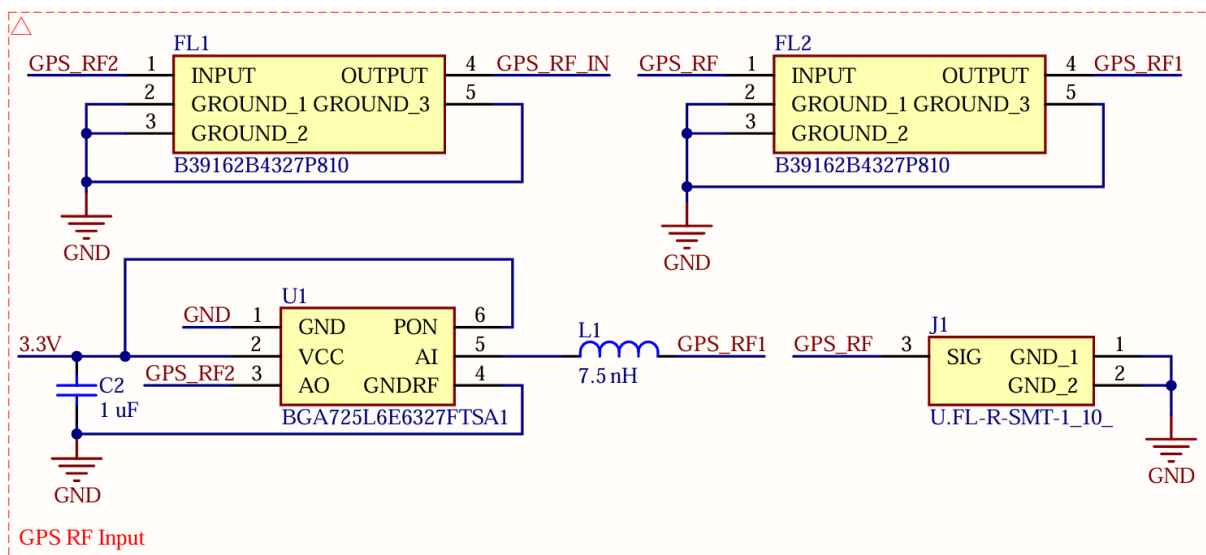
GPS sekiklio schemos susideda iš 7 dalių:

1. nRF9160 modulio schema su reikiamais periferiniais komponentais (3.2 pav.);
2. GPS L1 įėjimo signalo schema (3.3 pav.);
3. SIM kortelės schema (3.4 pav.);
4. Maitinimo prijungimo schema (3.5 pav.);
5. Programavimo prieigos schema (3.5 pav.);
6. LTE antenos schema (3.6 pav.);
7. Perkrovimo valdymo schema (3.6 pav.).



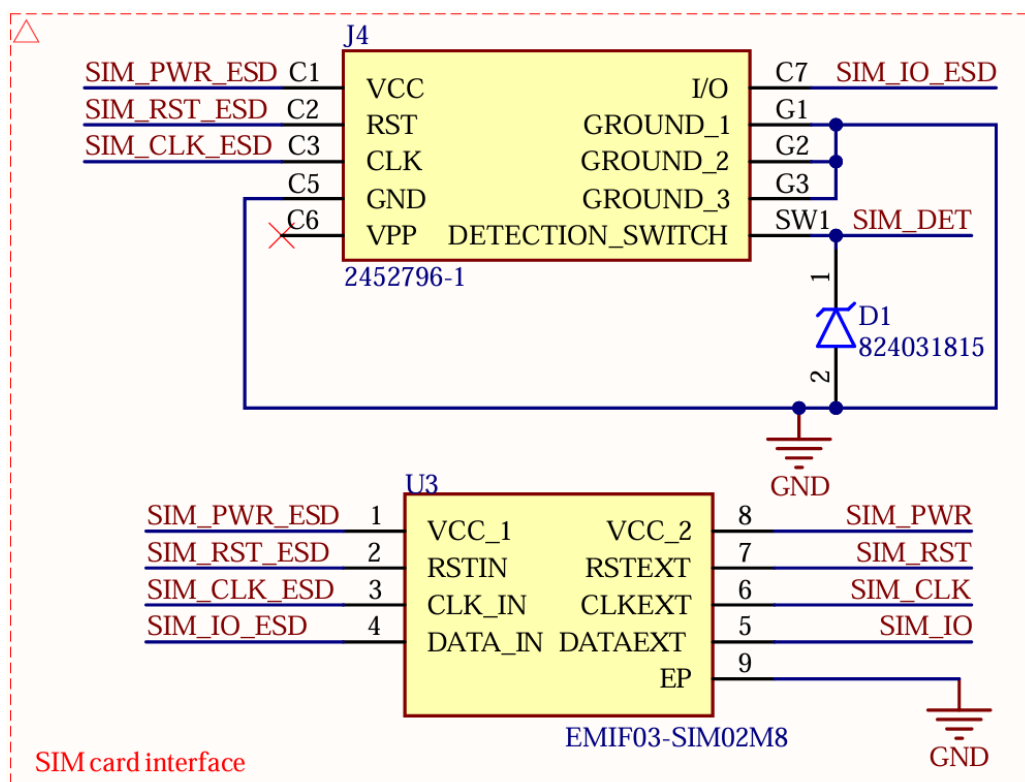
3.2 pav. GPS sekiklio nRF9160 modulio schema su reikiama periferija (*Altium 21.0.9*).

Kaip matoma iš 3.2 pav. nRF9160 modulio periferiniai komponentai pagrinde susideda iš maitinimo grandinės triukšmų filtravimo kondensatorių.



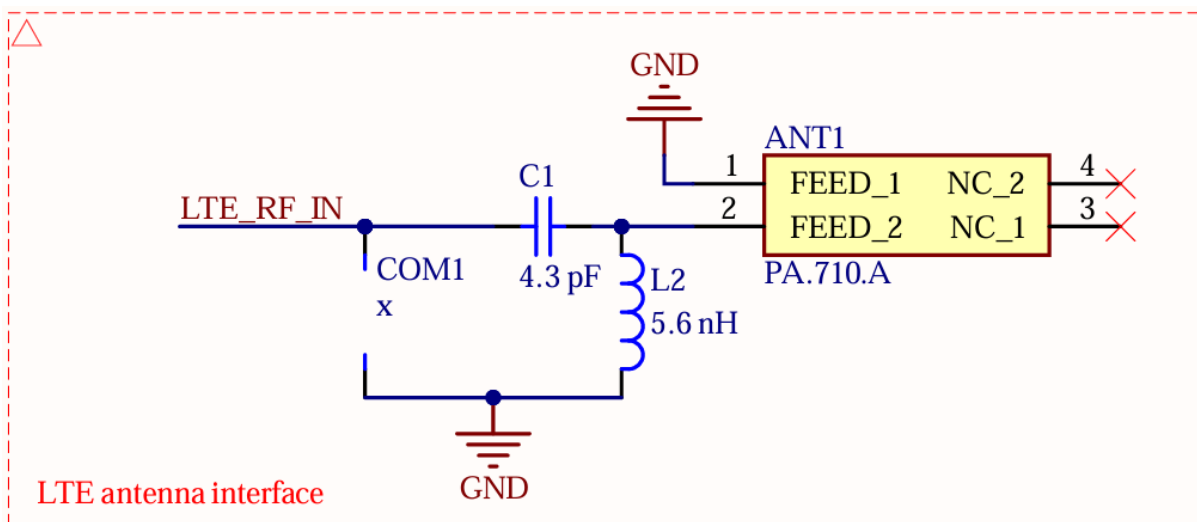
3.3 pav. GPS sekiklio GPS L1 įėjimo signalo schema (Altium 21.0.9).

Kaip matoma iš 3.3 pav. GPS sekiklio įėjimo signalo periferija susideda iš antenos prijungimo jungties (J1) ir dviejų GPS L1 signalo SAW filtrų (FL1, FL2) tarp kurių yra LNA stiprintuvas (U1). SAW filtrai ir LNA stiprintuvas parenkami remiantis nRF9160 modulio gamintojo pateiktomis rekomendacijomis.



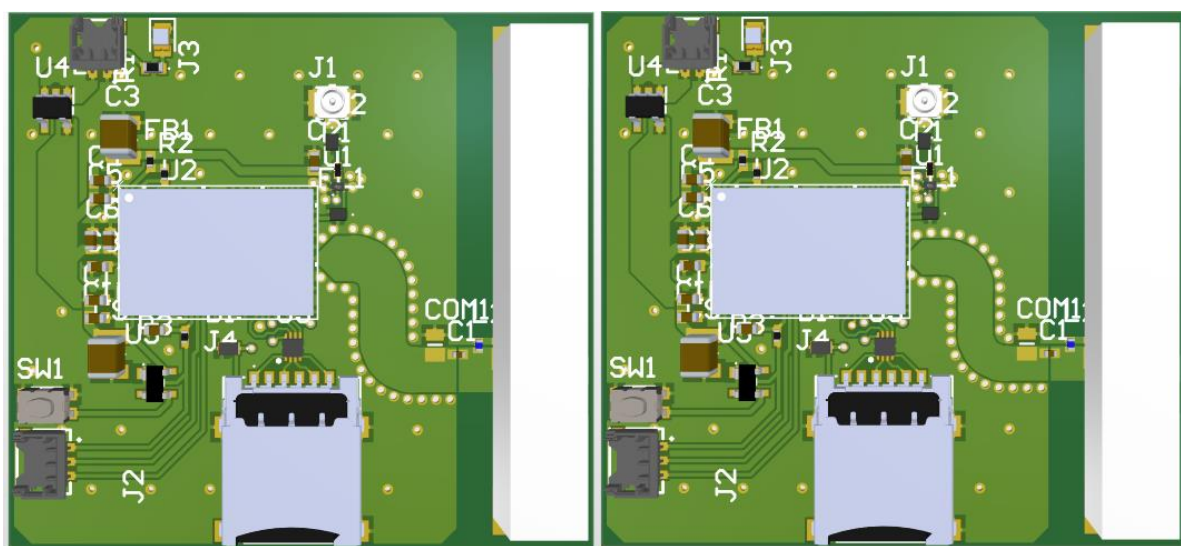
3.4 pav. GPS sekiklio SIM kortelės schema (Altium 21.0.9).

Kaip matoma iš (3.4 pav.) SIM kortelės schema susideda iš SIM kortelės laikiklio (J4) ir EMI filtro su ESD apsauga (U3). EMI filtras naudojamas norint apsaugoti komunikaciją, tarp



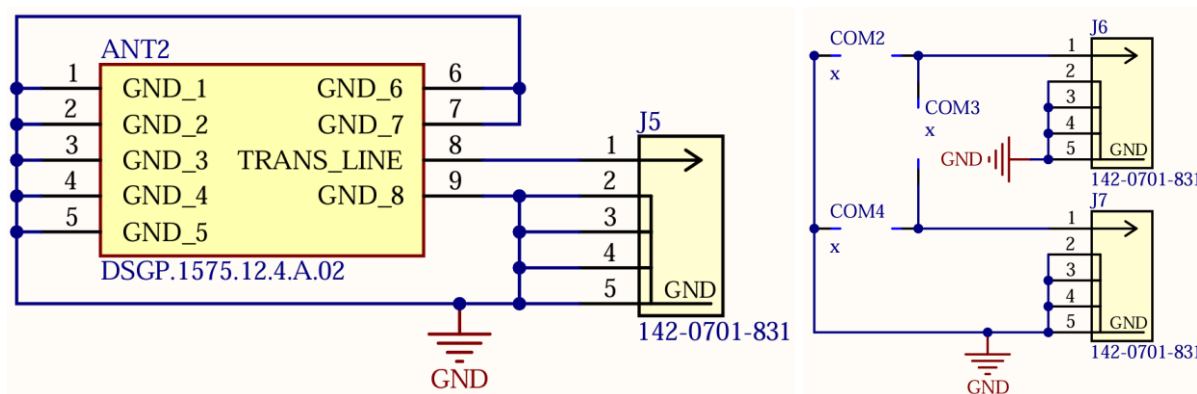
3.6 pav. GPS sekiklio LTE antenos schema (LTE antenna interface) ir perkrovimo valdymo schema (Reset circuit) (Altium 21.0.9).

Kaip matoma iš 3.6 pav. LTE antenos schema susideda iš keraminės LTE antenos ir gamintojo rekomenduojamos suderinimo grandinės. COM1 nurodo papildomą komponentą, kurį, esant poreikiui, būtų galima sulituoti į schemą. Galiausiai nubraižoma GPS sekiklio spausdintinė plokštė. Svarbu paminėti, kad braižant PTFE ir PEEK GPS sekiklio plokštes buvo keičiamas LTE antenos takelio plotis pagal 2.3.4 skyriuje sumodeliuotų PTFE ir PEEK 50 Ω mikrojuostelinių linijų pločius. PTFE plokštės LTE antenos takelio plotis 3,8 mm, PEEK – 2,92 mm. Pavaizduoti PTFE ir PEEK GPS sekiklio spausdintinių plokščių 3D modeliai pavaizduoti 3.7 pav., o šių spausdintinių plokščių viršutiniai ir apatiniai sluoksniai pavaizduoti atitinkamai D ir E prieduose.



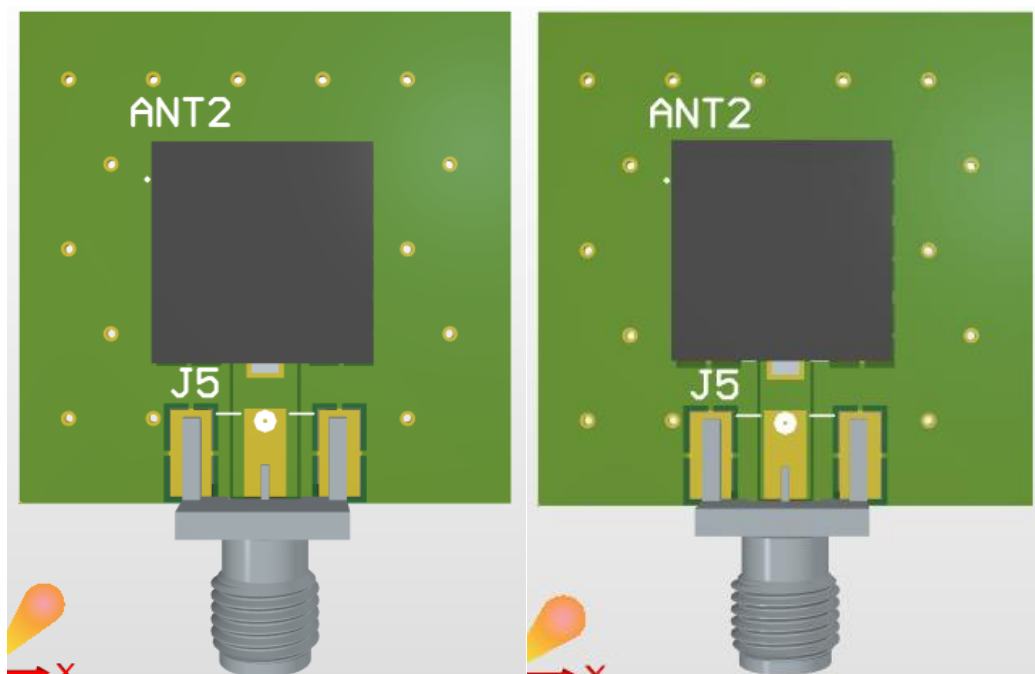
3.7 pav. GPS sekiklio spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) (Altium 21.0.9).

Toliau braižomos GPS L1 keraminės antenos ir suderinimo grandinės plokštės (3.8 pav.). GPS L1 schema sukurama keraminei, RHCP poliarizacijos GPS L1 antenai (DSGP.1575.12.4.A.02), o suderinimo grandinė kuriama π tipo, nes labiausiai tikėtina, kad teks derinti didesnio nei $50\ \Omega$ impedansus.

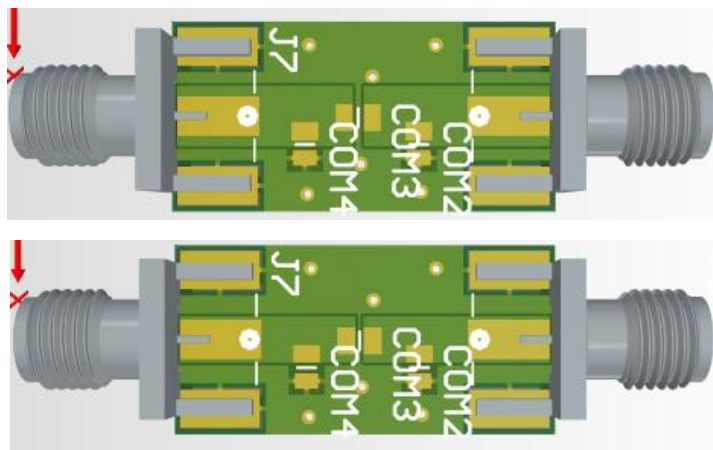


3.8 pav. GPS L1 antenos schema (kairė) ir π suderinimo grandinė (dešinė) (Altium 21.0.9).

Sukurtų PTFE ir PEEK keraminių antenų ir suderinimo grandinių spausdintinių plokščių skirtumas yra antenų maitinimo takelių storiai. PTFE ir PEEK keraminių antenų bei suderinimo grandinių spausdintinių plokščių 3D modeliai pavaizduoti 3.9–3.10 pav., o šių spausdintinių plokščių viršutiniai ir apatiniai sluoksniai pavaizduoti F–I prieduose.



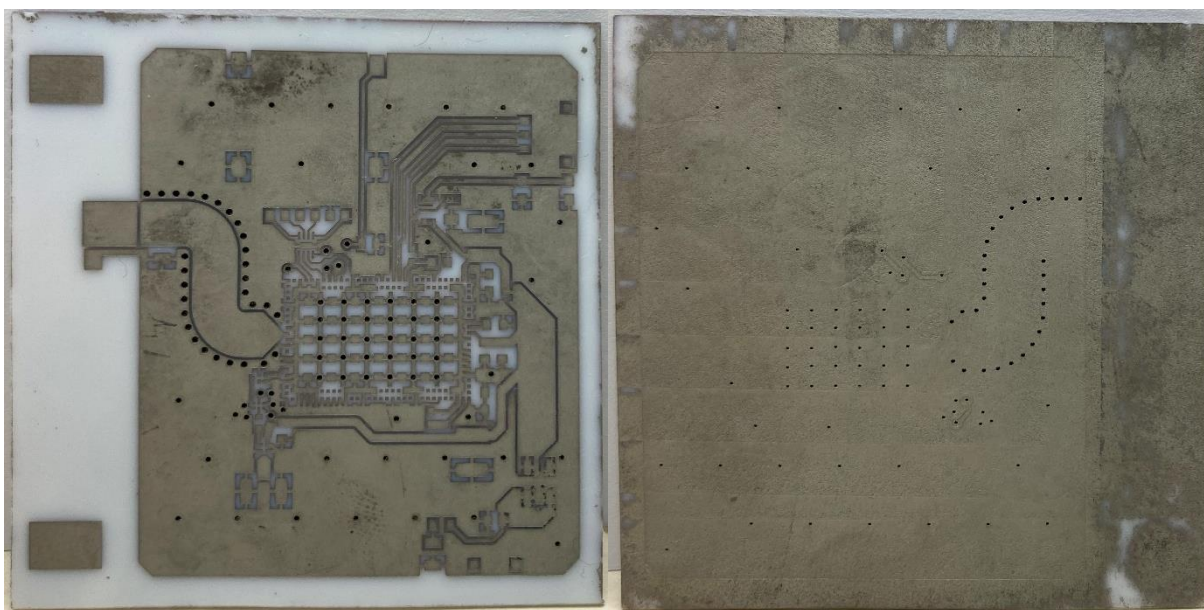
3.9 pav. GPS L1 keraminės antenos spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) (Altium 21.0.9).



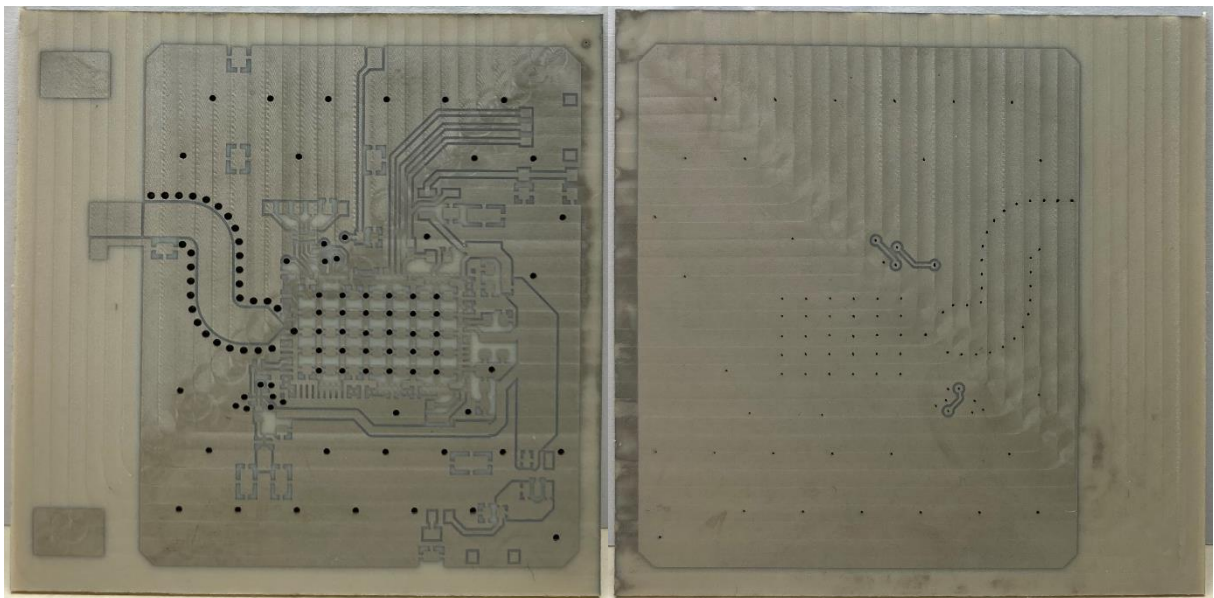
3.10 pav. GPS L1 suderinimo grandinės spausdintinių plokščių 3D modeliai: PTFE (viršus) ir PEEK (apačia) (*Altium 21.0.9*).

3.2. Pagamintos GPA sekiklio ir papildomos schemas

Pagamintos, ant PTFE ir PEEK medžiagų, GPS sekiklių, GPS L1 keraminių antenų ir π suderinimo grandinių plokštės pavaizduotos (3.11–3.16 pav.). PEEK plokščių vario sluoksnio storis yra 3,5–4 μm , o PTFE – daugiau nei 5 μm . Taip pat visos plokštės papildomai padengiamos ~ 2 μm nikelio sluoksniu.

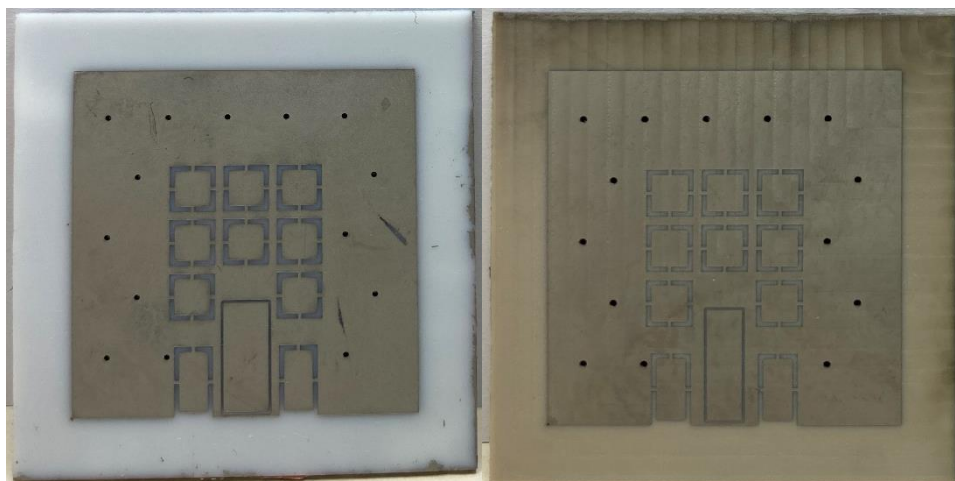


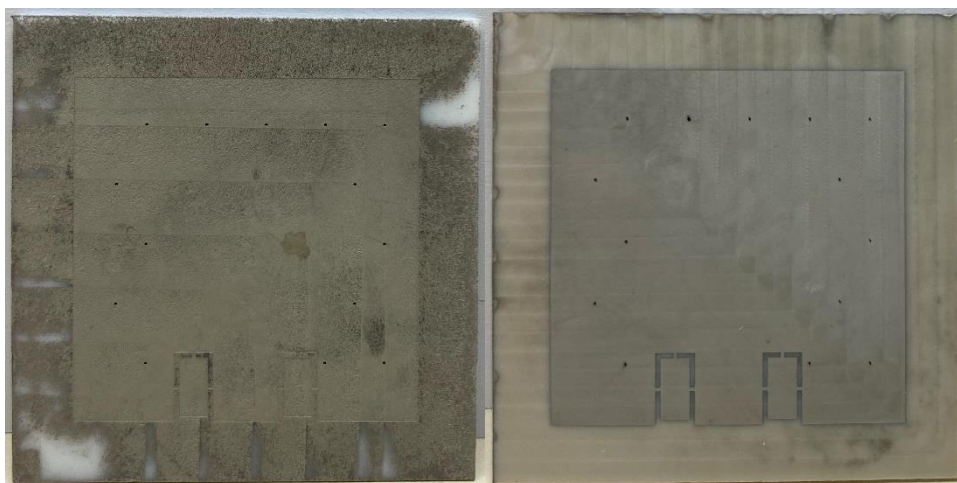
3.11 pav. PTFE GPS sekiklio plokštė: viršutinis (kairė) ir apatinis (dešinė) sluoksniai.



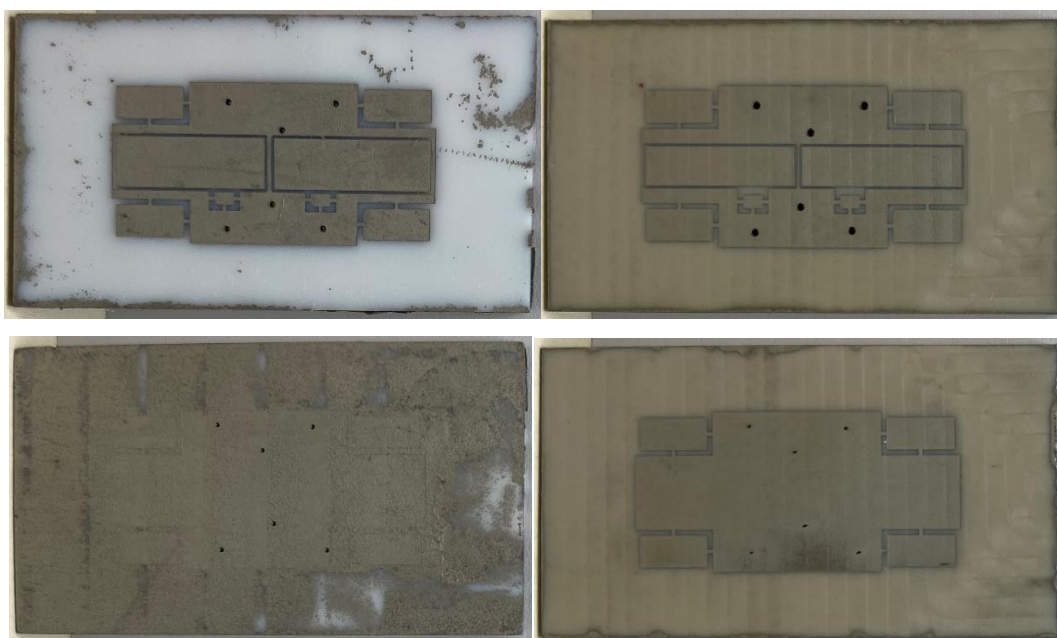
3.12 pav. PEEK GPS sekiklio plokštė: viršutinis (kairė) ir apatinis (dešinė) sluoksniai.

Kaip matoma iš 3.11–3.12 pav. PTFE plokštės viršutiniame sluoksnyje dalis komponentų litavimo aikštelių ir apatiniame sluoksnyje esantys du elektriniai takeliai yra pertekliniu vario ir nikelio sluoksniu sujungiami su žemės sluoksniu. Taip pat matoma, kad PTFE plokštės apatinis frezuotas sluoksnis galima sakyti visas yra pasidengęs variu ir nikeliu. PEEK plokštėje tokio tipo defektų nematoma, tik pastebima, kad vario sluoksnis nėra tolygus dėl plokštės abipusio frezavimo ir yra kelios frezuotos plokštės vietos, kuriose nusėdo perteklinis vario sluoksnis. Tokie pat tiek PTFE, tiek PEEK plokščių defektai matomi ant suderinimo grandinių ir keraminių antenų plokščių (2.13–2.14 pav.).





3.13 pav. PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) GPS L1 keraminės antenos plokštės: viršutinis (viršuje) ir apatinis (apačioje) sluoksniai.



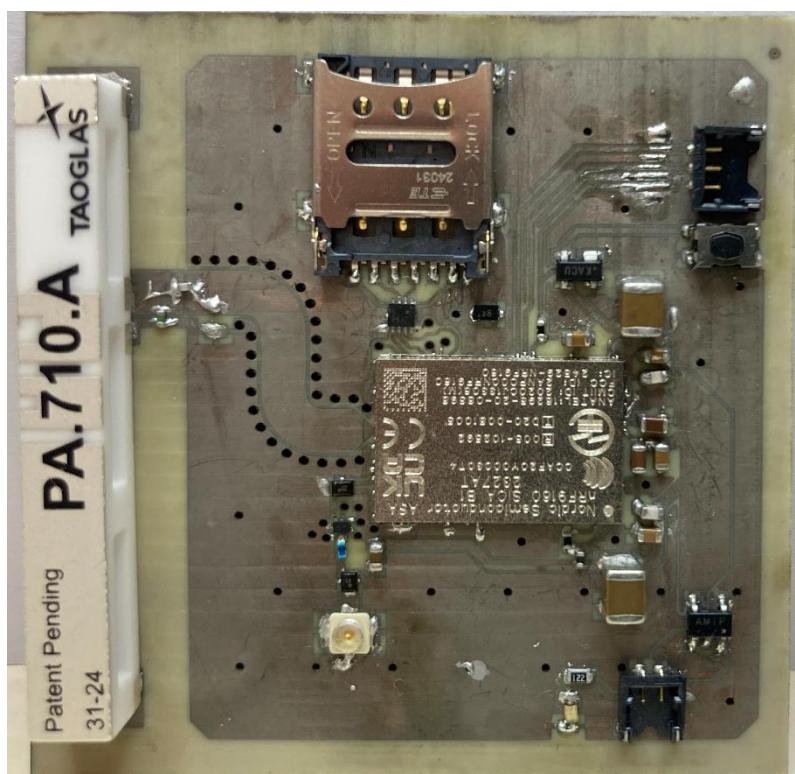
3.14 pav. PTFE (kairė) ir PEEK (dešinė) GPS L1 suderinimo grandinės plokštės: viršutinis (viršuje) ir apatinis (apačioje) sluoksniai.

Galiausiai atliekamas GPS sekiklio litavimas. Litavimui naudojamas 60 % alavo ir 40 % švino lydmetalis, kurio lydimo temperatūra yra $\sim 180^\circ\text{C}$, flusas ir karštas oras bei lituoklis. Kaip ir lituojant antenų SMA jungtis (2.4.1 poskyris), naudojant smulkų švitrinį popierių (2000–4000 grūdėtumo), atliekamas antenų litavimo aikštelių šveitimas atidengiant vario sluoksnį.

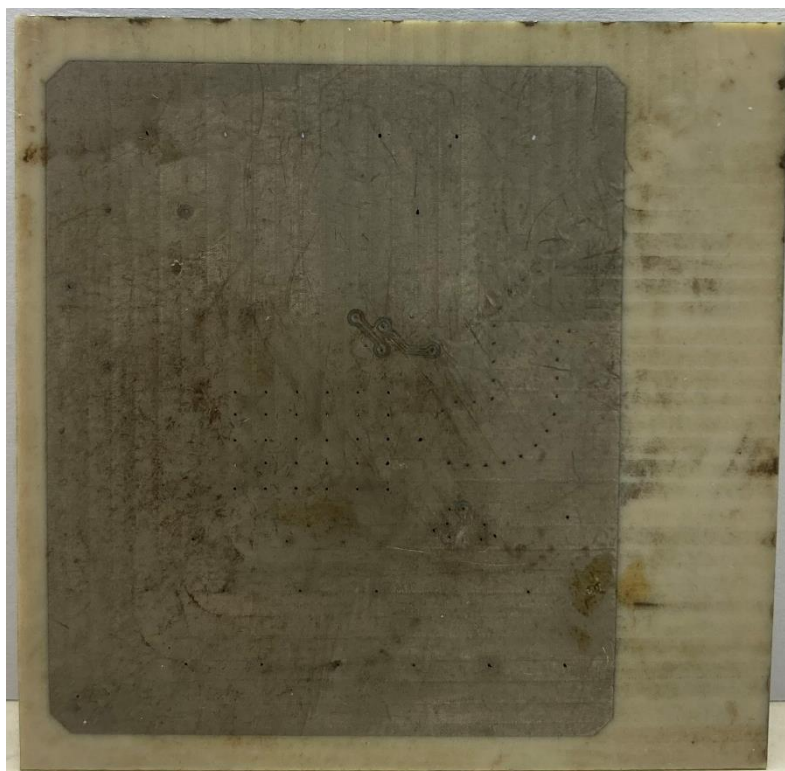
Lituojant PEEK plokštę su 210°C karštu oru pastebėta, kad plokštė nežymiai išsikraipo (plokštės kampai išsiriečia į viršų), taip tikėtina yra dėl plokštės gana didelio šiluminio plėtimosi koeficiento, per mažo šiluminio laidumo ir nedidelio plokštės dydžio. PEEK plokštės

išlinkimui panaikinti naudojamas 90–110 °C šildantis pagrindas, tačiau nors ir truputį mažesnis, vis tiek matomas PEEK plokštės išlinkimas.

Galiausia sulitavus GPS sekiklį ant PEEK plokštės, po to kai plokštė atvėso, buvo pastebėtas plokštės išlinkimas (plokštės kampai išsiriečia į žemyn), taip įvyko, tikėtina dėl to, kad GPS sekiklio nRF9160 modulis turi didelį kiekį litavimo aikštelių ir užimama gana didelį plotą palyginus su kitais komponentais (išskyrus LTE anteną). Ko pasekoje, prilitavus nRF9160 modulį plokštė išsikraipo. Ant PEEK plokštės sulituotas GPS sekiklis pavaizduotas 3.15–3.16 pav.



3.15 pav. GPS sekiklis sulituotas ant PEEK plokštės (viršutinis sluoksnis).



3.16 pav. GPS sekiklis sulituotas ant PEEK plokštės (apatinis sluoksnis).

Ant PTFE plokštės mėginant lituoti GPS sekiklio komponentus pastebėta kad plokštė itin smarkiai išsilenkia, ko pasėkoje negalima tinkamai sulituoti komponentų. Todėl ant PTFE plokštės GPS sekiklio komponentai liko nesulituoti.

Išmatuoti PEEK GPS sekiklio fiziniai parametrai yra tokie:

- Ilgis: ~46,5 mm;
- Plotis: ~44,5 mm;
- Storis: ~7,5 mm
- Svoris: ~8–9 g.

GPS sekiklio ilgis ir plotis matuojami pagal žemės vario sluoksnį, o ne nuo fizinių PEEK plokštės kraštų, nes PEEK plokštė yra padaryta truputį didesnė.

GPS sekiklio testavimas atliekamas prijungiant prie sekiklio 3,3 V maitinimo įtampą. Prieš jungiant įtampą, patikrinama ar nėra susijungusių maitinimo ir žemės kanalų. Prijungus maitinimo įtampą, siekiant patikrinti ar nRF9160 modulis sulituotas tinkamai ir tinkamai maitinamas, su multimetru testuojama ar krenta įtampa ant 3.2 pav. C8 įtampos stabilizavimo kondensatoriaus. Kadangi ant C8 įtampos stabilizavimo kondensatoriaus išmatuota įtampa buvo ~2,2 V, galima teigti, kad nRF9160 modulis yra tinkamai sulituotas ir tinkamai maitinamas.

Tolimesni sulituoto GPS sekiklio programavimas bei GPS L1 keraminės antenos ir suderinimo grandinės plokščių litavimai bei testavimai planuojami atlikti ateityje.

3.3. Apibendrinimas

Kuriant GPS sekiklį buvo atsižvelgta į komponentų dydį bei funkcionalumą, siekiant sukurti funkcionalų bei kuo mažesnį GPS sekiklį. Sekiklį pavyko sukurti mažesnių fizinių parametrų ($\sim 46,5 \times 44,5 \times 7,5$ mm, $\sim 8-9$ g) palyginti su 1.5 lentelėje (1.5 poskyris) aptartais GPS sekikliais. Iš 1.5 lentelės duomenų matoma, kad mažiausią GPS sekiklio ilgį (37 mm), storį (12 mm) bei svorį (18 g) turi Jiobit GPS sekiklis, o plotį (28 mm) – Tractive GPS sekiklis.

Taip pat svarbu paminėti, kad GPS sekiklio plokštėje nėra sulituotos fizinės GPS L1 dažnio antenos, todėl GPS sekiklio svoris yra truputį mažesnis. Taip pat GPS sekiklį būtų galima dar labiau sumažinti šiais būdais:

1. Atsisakius perkrovimo jungiklio ir pasirinkus mažesnių matmenų perkrovimo valdymo lustą.
2. Pasirinkus mažesnių matmenų apsauginį idealų diodą.
3. Atsisakyti SIM kortelės laikiklio ir jį pakeisti arba eSIM arba jungtimis, kuriomis galima būtų prijungti SIM kortelę iš išorės.

Taip pat aptariant pasirinktas GPS sekiklio medžiagas galima paminėti, kad buvo pasirinktos medžiagos su gana dideliu šiluminiu plėtimosi koeficientu ir per mažu šiluminiu laidumu, nes litavimo metu tiek PTFE, tiek PEEK plokštės išsilenkinėjo nuo temperatūros skirtumų.

GPS sekiklio gamybos metu buvo susidurta su keliais iššūkiais:

1. Dėl šilkografijos sluoksnio nebuvimo buvo sunku centruoti nRF9160 modulį, SAW filtrus ir LNA stiprintuvą.
2. Dėl temperatūros pokyčių PEEK ir PTFE plokštės turėjo polinkį deformuotis.
3. Dėl izoliacinio sluoksnio nebuvimo išliko tikimybė litavimo metu netinkamai tarpusavyje sujungti komponentus.

IŠVADOS

Šiame darbe, naudojant FTMC sukurtą SSAIL technologiją, buvo analizuojamas PA 2200, PTFE ir PEEK medžiagų tinkamumas taikant SSAIL technologiją, tiriamas PTFE ir PEEK medžiagų dielektrinių parametrų stabilumas aukštų dažnių sąlygomis. Taip pat, naudojant SSAIL technologiją, kuriamos ir tiriamos GPS L1 centrinio dažnio antenos, pagamintos ant PA 2200, PTFE ir PEEK dielektrikų, bei kuriamas ir tiriamas GPS sekiklis, pagamintas ant PTFE ir PEEK dielektrikų. Darbo metu buvo atliekami TDR ir S_{11} parametrų matavimai, naudojant VNA.

Pirmiausia, ant pasirinktų PA 2200, PTFE ir PEEK medžiagų, buvo modeliuojamos GPS L1 dažnio antenos. Iš modeliavimo metu gautų antenų matmenų (2.9 lentelė, 2.11 lentelė, 2.13 lentelė) matoma, kad PA 2200 antena sumodeliuota palyginti maža, o PTFE antena palyginti didelė.

Optimizuojant antenas pastebėta, kad koreguojant antenos ilgį atitinkamai keičiasi antenos S_{11} parametro dažnis. Didinant antenos ilgį, antenos S_{11} parametro piko dažnis mažėja, mažinant – didėja. Taip pat pastebėta, kad medžiagos su didesne dielektrine konstanta leidžia suprojektuoti mažesnių matmenų GPS L1 dažnio anteną. Projektuojant anteną ant medžiagų, turinčios palyginti didelius dielektrinius nuotolius (PA 2200) bei dielektrinę konstantą ir dielektrinius nuostolius, kurie buvo išmatuoti žemų dažnių (PA 2200, 1 kHz) sąlygomis, antena sumodeliuojama ganėtinai ilga palyginus su antenos pločiu (PA 2200 GPS L1 antenos modeliavimas, 2.2.1 poskyris).

Medžiagų elektrinių savybių tyrimo metu matoma, kad medžiagos su šiurkščiu paviršiumi (PA 2200) yra netinkamos taikant SSAIL technologiją (2.48–2.49 pav.), nes variu pasidengia visas medžiagos plotas, t. y. ne vien tose paviršiaus vietose, kurios modifikuotos lazeriu. Testuojant PTFE medžiagos tinkamumą SSAIL technologijai takyti matoma (2.48–2.49 pav.), kad PTFE medžiaga yra tinkama šiai technologijai, o PA 2200 nėra tinkama dėl šiurkštaus paviršiaus. Taip pat, norint parodyti lazerinių parametrų svarbą taikant SSAIL technologiją, buvo atliktas SSAIL technologijos taikymas naudojant PTFE medžiagą, kurios paviršius modifikuotas su pakeistais lazerinio apdirbimo parametrais (2.50 pav.). Iš gautų 2.50 pav. rezultatų matoma, kad ant PTFE nusodinto vario sluoksnio adhezija yra itin prasta.

Medžiagų dielektrinių parametrų stabilumui aukštų dažnių sąlygomis nustatyti buvo sukurti elektrodai su 30 mm ilgio ir 300 μm pločio mikrojuostelinėmis linijomis (2.51 pav.). Šie linijų parametrai pasirinkti pagal numatytus mažiausius GPS sekiklio komponentų PCB modelių pločių matmenis ir atstumus tarp komponentų. Pagaminus elektrodus ant PTFE ir PEEK medžiagų matoma (2.52–2.53 pav., 2.54 pav.), kad iš 9 PTFE elektrodų tinkami

matavimams buvo 6, nes netinkamų 3 elektrodų mikrojuostelinės linijos buvo nutrūkusios ir/arba nebuvo kontakto tarp viršutinio ir apatinio žemės sluoksnių. Pažymėtina, kad PEEK elektrodai, pagaminti su tinkamais lazerinio apdirbimo parametrais, buvo visi tinkami matavimams.

Elektrodų impedansų matavimai buvo atliekami naudojant SIGLENT SNA5032A VNA su gamintojo nustatytu kalibravimu, SP-GR-201505 0,5 mm adatėlę, 100 cm VNA kabelį ir Dino-Lite Edge mikroskopą. Prieš atliekant matavimus reikėjo atlikti elektrodų valymą nuo perteklinių vario aikštelių.

PTFE ir PEEK elektrodų impedansų matavimų ir modeliavimų rezultatai rodo, kad PTFE vidutinis išmatuotų elektrodų impedansas ($152,113 \Omega$) yra $\sim 10 \Omega$ mažesnis nei modeliuotos PTFE mikrojuostelinės linijos ($162,48 \Omega$), o PEEK vidutinis išmatuotų elektrodų impedansas ($135,920 \Omega$) yra $\sim 4 \Omega$ mažesnis nei modeliuotos PEEK mikrojuostelinės linijos ($140,0075 \Omega$). Išmatuotų ir modeliuotų elektrodų impedansų skirtumas, tikėtina, yra dėl pasirinkto per plataus TDR analizės ruožo, kuris apėmė ir dalį pereinamųjų procesų tarp VNA laido adatos ir PTFE/PEEK elektrodų, arba elektrodų mikrojuostelinės linijos yra per trumpos ir neužtenka linijų ilgio, kad būtų išmatuoti realūs PTFE ir PEEK elektrodų impedansai.

Tikėtina, kad išmatuotų ir modeliuotų elektrodų impedansų skirtumas yra dėl pasirinkto per plataus TDR analizės ruožo, kuris apėmė ir dalį pereinamųjų procesų tarp VNA laido adatos ir PTFE/PEEK elektrodų, arba elektrodų mikrojuostelinės linijos yra per trumpos ir neužtenka linijų ilgio, kad būtų išmatuoti realūs PTFE ir PEEK elektrodų impedansai pasibaigus pereinamiesiems procesams. Matuojant palyginti trumpos (3 cm) mikrojuostelinės linijas yra ganėtinai sudėtinga grafiškai nustatyti mikrojuostelinės linijos TDR matavimų pradžios ir pabaigos diapazonus, kurie neįskaitytų netikslumus sukuriančių pereinamųjų procesų verčių. Dar kelios, išmatuotų ir modeliuotų mikrojuostelinių linijų impedansų neatitikimo, priežastys galėtų būti dielektrinės konstantos pokytis, medžiagų sandarų ypatumai ir netinkamos dielektrinės konstantos pasirinkimas modeliavimo metu. Bei PTFE ir PEEK plokščių paviršiaus modifikavimas frezavimo metu, ko pasėkoje gali netolygiai kisti plokščių storis.

Galiausiai įvertinus anksčiau aprašytas išmatuotų ir modeliuotų elektrodų impedansų skirtumų priežastis buvo nuspręsta nekeisti modeliavimo metu naudojamos dielektrinės konstantos ir tęsti GPS sekiklio ir GPS L1 antenų projektavimą. Atlikus PTFE ir PEEK 50Ω mikrojuostelinių linijų modeliavimą, su pakoreguota PTFE dielektrine konstanta (dėl anksčiau modeliavimuose padarytos klaidos) ir PEEK vario sluoksnio storio, buvo gautos atitinkamai 3,8 mm ir 2,92 mm pločio mikrojuostelinės linijos.

Pakeitus PTFE ir PEEK GPS L1 antenų maitinimo plotį į atitinkamai 3,8 mm ir 2,92 mm buvo atliekamas papildomas antenų optimizavimas ir gamyba, naudojant SSAIL

technologiją. Iš pagamintų antenų modeliavimo ir matavimo rezultatų matoma, kad PTFE antenos S_{11} parametro pikas (-7,86 dB, 1,58841 GHz), artimiausias GPS L1 signalo dažnių ruožui, gaunamas didesnis už GPS L1 signalo dažnių ruožo maksimumą (1,586 GHz) (1.2 lentelė), o PEEK antenos S_{11} parametro pikas (-13,207 dB, 1,56194 GHz) gaunamas mažesnis už GPS L1 signalo dažnių ruožo minimumą (1,565 GHz) (1.2 lentelė).

Analizuojant PTFE ir PEEK antenų TDR grafikus (2.84–2.85 pav.) matoma, kad dėl antenos generuojamų per didelio atspindžių kiekio VNA kabelio 50 Ω impedansas pakinta į atitinkamai 51,947 Ω ir 52,155 Ω . PTFE antenos maitinimo linijos t11_L atkarpos impedanso maksimumas ir minimumas yra atitinkamai 64,223 Ω ir 55,279 Ω , o clin1_L atkarpos – 54,702 Ω ir 46,505 Ω . PEEK antenos maitinimo linijos t11_L atkarpos impedanso maksimumas ir minimumas yra atitinkamai 63,328 Ω ir ~50 Ω , o clin1_L atkarpos – 60,696 Ω ir 48,264 Ω . PTFE ir PEEK antenų maitinimo linijų vidutiniai impedansai išmatuoti atitinkamai 53,305 Ω ir 54,415 Ω . Kaip matoma, nė vienos antenos maitinimo linijos impedansas nėra lygus arba itin artimas 50 Ω .

Tikėtina, kad pagamintų PTFE ir PEEK antenų S_{11} parametrų ir maitinimo linijų impedansų rezultatai gauti netinkami dėl kelių priežasčių:

1. Netinkamai nustatytos medžiagų dielektrinės modeliavimo metu.
2. Nustatyti per maži antenų iškarpų pločiai (W0) ir dėl to maitinimo linijos interferuoja su aplinkiniais antenos sluoksniais.
3. Frezuotų PTFE ir PEEK sluoksniai yra netolygūs ir iškraipo antenų parametrus.
4. Padaryta klaida antenų teorinių parametrų skaičiavimo ir/arba modeliavimo metu.

Galiausiai atliekamas GPS sekiklio kūrimas. Kuriant GPS sekiklį buvo atsižvelgta į komponentų dydį bei funkcionalumą, siekiant sukurti funkcionalų ir kuo mažesnę GPS sekiklį. Pavyko sukurti mažesnių fizinių parametrų (~46,5x~44,5x~7,5 mm, ~8–9 g) sekiklį, palyginti su 1.5 lentelėje (1.5 poskyris) aptartais GPS sekikliais. Iš 1.5 lentelės duomenų matoma, kad mažiausią GPS sekiklio ilgį (37 mm), storį (12 mm) bei svorį (18 g) turi Jiobit GPS sekiklis, o plotį (28 mm) – Tractive GPS sekiklis. Svarbu paminėti, kad GPS sekiklio plokštėje nėra sulituotos fizinės GPS L1 dažnio antenos, todėl GPS sekiklio svoris yra truputį mažesnis.

Taip pat daroma prielaida, kad pasirinktos GPS sekiklio medžiagos turi per didelius šiluminius plėtimosi koeficientus ir per mažus šiluminius laidumus, nes litavimo metu tiek PTFE, tiek PEEK plokštės deformavosi dėl temperatūros skirtumų. PTFE plokštė deformavosi nuo temperatūros skirtumų taip, kad nebuvo galimybės sulituoti sekiklio komponentų.

GPS sekiklio testavimas atliekamas prijungiant prie sekiklio 3,3 V maitinimo įtampą. Prieš jungiant įtampą, patikrinama, ar nėra susijungusių maitinimo ir žemės kontaktų. Prijungus maitinimo įtampą, siekiant patikrinti, ar nRF9160 modulis sulituotas tinkamai ir tinkamai

maitinamas, su multimetru testuojama, ar krenta įtampa ant C8 įtampos stabilizavimo kondensatoriaus (3.2 pav.). Kadangi ant C8 įtampos stabilizavimo kondensatoriaus išmatuota įtampa buvo ~2,2 V, galima teigti, kad nRF9160 modulis yra tinkamai sucentruotas ir tinkamai maitinamas.

GPS sekiklio gamybos metu buvo susidurta su keliais iššūkiais:

1. Dėl šilkografijos sluoksnio nebuvimo buvo sunku centruoti nRF9160 modulį, SAW filtrus ir LNA stiprintuvą.
2. Dėl temperatūros pokyčių PEEK ir PTFE plokštės turėjo polinką deformuotis.
3. Dėl izoliacinio sluoksnio nebuvimo išliko tikimybė litavimo metu netinkamai tarpusavyje sujungti komponentus.

Tolimesnius sulituoto GPS sekiklio programavimo bei GPS L1 keraminės antenos ir suderinimo grandinės plokščių litavimo ir testavimo tyrimai planuojami atlikti ateityje.

Darbo metu įsitikinta, kad taikant SSAIL technologiją galim sumažinti įrenginio fizinius parametrus, tokius kaip: matmenys ir svoris. Taip pat įsitikinta, kad SSAIL technologija leidžia pagaminti tiek paprastas, tiek aukštadažnes elektrines grandines ant įvairaus tipo dielektrikų palyginus su standartinėmis PCB gamybos technologijomis. Tačiau taikant SSAIL technologiją itin svarbu atsižvelgti į pasirinktos medžiagos paviršiaus lygumą ir šiurkštumą, o gaminant aukštadažnius grandynus, naudojant SSIAL technologiją itin svarbu atsižvelgti ne vien į dielektrinius medžiagos parametrus, bet ir šiluminius.

Keli esminiai SSAIL technologijos trūkumų yra:

1. Dėl šilkografijos sluoksnio nebuvimo plokštės litavimas arba vizuali inspekcija gali, kai kuriais atvejais, tapti sudėtingesni.
2. Dėl izoliacinio sluoksnio nebuvimo litavimas tampa sudėtingesnis, nes lydmetalis nuo litavimo aikštelės gali ištekti daug plačiau nei įprastose PCB su izoliaciniais sluoksniais.
3. SSAIL įrenginiai gali turėti daugiausia dviejų sluoksnių elektrinės grandinės, o tai limituoja SSAIL įrenginių panaudojimo galimybes ir šių įrenginių elektrinių grandinių sudėtingumo lygį.

Tačiau, svarbu paminėti, kad SSAIL technologija yra palyginti nauja, todėl visi aukščiau išvardinti trūkumai, SSAIL technologijos vystymo eigoje, gali būti pašalinti.

LITERATŪRA

- [1] Alam, S., Surjati, I., Ningsih, Y. K., Sari, L., Syukriati, E., & Safitri, A. (2019). Design of Truncated Microstrip Antenna with Array 4×2 for Microwave Radio Communication. *2019 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CAMA47423.2019.8959571>
- [2] Ali, M. T., Ramli, N., Salleh, M. K. M., & Tan, M. N. Md. (2011). A design of reconfigurable rectangular microstrip slot patch antennas. *2011 IEEE International Conference on System Engineering and Technology*, 111–115. <https://doi.org/10.1109/ICSEngT.2011.5993431>
- [3] Badran, B. (2022, January 13). *Navigating the L1, L2 and L5 Band Options for GNSS*. everythingRF. <https://www.everythingrf.com/community/navigating-the-l1-l2-and-l5-band-options-for-gnss>
- [4] Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=index&bcsId=8129&itemId=047166782X>
- [5] *Cube GPS Tracker*. (2025, February 9). Cube Tracker. <https://cubetracker.com/products/cube-gps-tracker>
- [6] Denisowski, P. (2025, May 27). *Understanding S-parameters*. https://www.rohde-schwarz.com/lt/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/understanding-s-parameters_257831.html
- [7] *Dissipation Factor (DF) of Plastics—Unit, Formula and Measurement*. (2025, May 25). <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/dissipation-factor>
- [8] Duobiene, S., Ratautas, K., Trusovas, R., Ragulis, P., Šlekas, G., Simniškis, R., & Račiukaitis, G. (2022). Development of Wireless Sensor Network for Environment Monitoring and Its Implementation Using SSAIL Technology. *Sensors*, 22(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/s22145343>
- [9] Ellingson, S. W. . (2018, September 27). *Book: Electromagnetics I (Ellingson)*. Engineering LibreTexts. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electro-Optics/Book%3A_Electromagnetics_I_\(Ellingson\)](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electro-Optics/Book%3A_Electromagnetics_I_(Ellingson))
- [10] *Eureka Marco Polo Pet*. (2025, February 9). Marco Polo | Tracking and Recovery

- Solutions. <https://eurekaproducts.com/product/marco-polo-pet/>
- [11] *Frequency range of 2g 3g 4g 5g*. (2023, December 23). Telecom Trainer. <https://www.telecomtrainer.com/frequency-range-of-2g-3g-4g-5g/>
- [12] *Galileo | EU Agency for the Space Programme*. (2025, June 1). <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/galileo>
- [13] Gedvilas, M., Ratautas, K., Kacar, E., Stankevičienė, I., Jagminienė, A., Norkus, E., Li Pira, N., & Račiukaitis, G. (2016). Colour-Difference Measurement Method for Evaluation of Quality of Electrolessly Deposited Copper on Polymer after Laser-Induced Selective Activation. *Scientific Reports*, 6(1), 22963. <https://doi.org/10.1038/srep22963>
- [14] *GNSSの理解: その仕組みと働きについて*. (2025, May 25). Taoglas. <https://www.taoglas.com/jp/understanding-gnss-what-it-is-and-how-it-works/>
- [15] *GPS signals*. (2025, May 25). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS_signals&oldid=1283235415#Sources_and_references
- [16] Hornak, J., Černohous, J., Hejl, M., Kadlec, P., Sláma, P., Michal, O., Trnka, P., Hardoň, Š., & Kúdelčík, J. (2024). Comprehensive Dielectric Analyses of Polyetheretherketone (PEEK) Thin Film. *2024 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika)*, 01–04. <https://doi.org/10.1109/Diagnostika61830.2024.10693911>
- [17] Ijnter, E. (2014). Design of Reconfigurable Microstrip Patch Antenna for WLAN Application. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. https://www.academia.edu/15328723/Design_of_Reconfigurable_Microstrip_Patch_Antenna_for_WLAN_Application
- [18] *Impedance Calculator | Sierra Circuits*. (2025, April 5). <https://impedance.app.protoexpress.com/?data=ONsTAS5bIR5nFHqIuoQIEqpeYI6FNtC1kNPK9gKk14INuL5nZePBvOxvbHPnk5+cnHE+LdwaQf3NPMrsZsHzKD+/M7rjI1AL7TaRuIf+k/aLF5w5yX8NdWEca2p4jr/qd/3jiCq2vt109mcdP9itFqb25bcJfU80I08FAEkspybHJoOJbTfc/CoK4ZEe1vozrLfjq9Dfs2X42lXYJUnGyJi+eJFcIvDOZINfUJtZF81UttQPqGh3kPEVQTVWItcA67vr3TNP+WeEN22+bXT7AER4Z2z2hsmst3QN4FxVwxvTJQoSn0PzSIu7GDixipPk0cwhm3SBk3Vu9L4HLMaXYQ==&q=Sat%20Apr%2005%2009:36:35%20PDT%202025>
- [19] *Inžineriniai plastikai | Plastena.lt—Plastikai ir guma: Produktai, detalių gamyba*.

- (2025, April 5). <https://plastena.lt/lt/produktu-kategorija/plastikai/inzineriniai-plastikai/>
- [20] *IP code*. (2025, May 27). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IP_code&oldid=1288073935
- [21] Jan Van Sickle. (2025, February 9). *The C/A Code | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals*. The Pennsylvania State University. <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1742>
- [22] *Jiobit Smart Tag*. (2025, February 9). <https://www.jiobit.com/product?prod=pets>
- [23] *JLCPCB*. (2025, May 27). <https://jlcpcb.com/>
- [24] Khairullina, E. M., Panov, M. S., Andriianov, V. S., Ratautas, K., Tumkin, I. I., & Račiukaitis, G. (2021). High rate fabrication of copper and copper–gold electrodes by laser-induced selective electroless plating for enzyme-free glucose sensing. *RSC Advances*, 11(32), 19521–19530. <https://doi.org/10.1039/D1RA01565F>
- [25] Kumar, N., Singh, S., Singh, A., & Han, T. (2025). Mechanical, Water Absorption, and Tribological Behavior of Polymer Composites: Role of Pineapple Leaf Fiber Orientation. *Lubricants*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040161>
- [26] Kuroda, S., Kawakita, J., Watanabe, M., & Katanoda, H. (2008). Warm spraying—A novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/033002>
- [27] *Laser Direct Structuring*. (2025, February 9). Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. <https://www.3d-mid.de/en/technology/manufacturing-processes/laser-direct-structuring/>
- [28] Lu, Y.-W., Fang, B.-S., Chen, K.-T., Lai, C.-C., & Jiang, D.-S. (2019). The Hybrid Stack-up with PTFE 5G Mm-Wave Antenna in Package (AiP). *2019 IEEE 21st Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 368–371. <https://doi.org/10.1109/EPTC47984.2019.9026649>
- [29] *Mitsubishi Chemical Group Product guide*. (2025, May 25). <https://www.mcam.com/mam/50446/MCG-ENG-Product-Guide-EN-LIT.pdf>
- [30] *Molded interconnect device*. (2025, May 24). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Molded_interconnect_device&oldid=1049733764

- [31] *Navigating the L1, L2 and L5 Band Options for GNSS*. (2024, August 29). Taoglas. <https://www.taoglas.com/blogs/navigating-l1-l2-and-l5-band-options-for-gnss/>
- [32] *nRF9160 Global and regulatory*. (2025, May 31). <https://www.nordicsemi.com/Products/Wireless/Low-power-cellular-IoT/nRF91-Series-certifications/nRF9160-Global-and-regulatory>
- [33] *PCB Manufacturing process*. (2025, May 27). Sierra Circuits. <https://www.protoexpress.com/kb/pcb-manufacturing-overview/>
- [34] *PCB Stack-Up Design Guide*. (2024). Sierra Circuits. <https://www.protoexpress.com/pcb-design-guides/pcb-stack-up-design-guide/>
- [35] *PCBWay*. (2025, May 27). <https://www.pcbway.com/>
- [36] Peterson, Z. (2020a, March 27). *Low-Dk PCB Material Advantages and Disadvantages*. <https://www.nwengineeringllc.com/article/low-dk-pcb-material-advantages-and-disadvantages.php>
- [37] Peterson, Z. (2020b, March 27). *What is the Fiber Weave Effect in a PCB Substrate?* <https://www.nwengineeringllc.com/article/what-is-the-fiber-weave-effect-in-a-pcb-substrate.php>
- [38] *Quadrant Engineering Plastic Product*. (2025, May 24). <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/content/downloads/QuadrantFab.pdf>
- [39] Ratautas, K., Jagminienė, A., Stankevičienė, I., Sadauskas, M., Norkus, E., & Račiukaitis, G. (2020). Evaluation and optimisation of the SSAIL method for laser-assisted selective electroless copper deposition on dielectrics. *Results in Physics*, 16, 102943. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.102943>
- [40] Ratautas, K., Vosylius, V., Jagminienė, A., Stankevičienė, I., Norkus, E., & Račiukaitis, G. (2020). Laser-Induced Selective Electroless Plating on PC/ABS Polymer: Minimisation of Thermal Effects for Supreme Processing Speed. *Polymers*, 12(10), 2427. <https://doi.org/10.3390/polym12102427>
- [41] *Relative permittivity*. (2025, May 27). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Relative_permittivity&oldid=1273696737
- [42] *Specific heat capacity*. (2025, May 25). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Specific_heat_capacity&oldid=128465339

- [43] SSAIL. (2025, February 9). <https://www.akoneer.com/applications/ssail-technology>
- [44] Tamari, A. (2021, July 27). *What Are Molded Interconnect Devices or MIDs?* Altium. <https://resources.altium.com/p/what-are-molded-interconnect-devices-or-mids>
- [45] *Techniniai plastikai*. (2025, April 5). Heliopolis. <https://heliopolis.lt/produktai/plastikai/techniniai-plastikai/>
- [46] *Thermal spraying*. (2024, September 30). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermal_spraying&oldid=1248545920
- [47] *Tractive*. (2025, February 9). Tractive. <https://tractive.com/en/pd/gps-tracker-cat>
- [48] *Two Shot Moulding*. (2025, February 9). Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. <https://www.3d-mid.de/en/technology/manufacturing-processes/two-shot-moulding/>
- [49] *Volumetric heat capacity*. (2025, May 25). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Volumetric_heat_capacity&oldid=1283837300
- [50] *Weenect XS*. (2025, February 9). Weenect. <https://www.weenect.com/us/en/gps-cat-tracker/>
- [51] *What Materials Are Used in 3D Printing? Complete Guide | Printing It 3D*. (2023, November 11). <https://printingit3d.com/what-materials-are-used-in-3d-printing/>
- [52] Yıldızhan, F. S. (2021). *Engineering Plastics: Market Analysis and Recycling Methods*. <https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-.PPOYUPU.v1>
- [53] Yogendrappa, M. (2021, February 25). *PCB Material Selection: Electrical and Manufacturing Considerations*. Sierra Circuits. <https://www.protoexpress.com/blog/pcb-material-selection-electrical-manufacturing-considerations/>
- [54] Zarobsky, J. (2023, March 30). *Moisture Absorption of High-Performance Plastics: Understanding the Impact on Material Properties—Roncelli Plastics*. <https://roncelli.com/moisture-absorption-of-high-performance-plastics-understanding-the-impact-on-material-properties/>

PRIEDAI

A priedas. Standartinių ir inžinerinių medžiagų paskirstymas (*Techniniai plastikai*, 2025) (*Inžineriniai plastikai ...*, 2025) (*Quadrant Engineering ...*, 2025) (*Mitsubishi ...*, 2025).

Mežiagos klasė Medžiaga	Techninis plastikas	Standartinis plastikas
PLA	×	✓
ABS	×	✓
PA	✓	✓
PC	×	✓
PETG	×	✓
TPU	×	✓
PVA	×	✓
HIPS	×	✓
PP	×	✓
PA	✓	✓
POM	✓	×
PU	✓	×
PVDF	✓	×
PTFE	✓	×
PI	✓	×
Tekstolitas, HGW	✓	×
PEEK	✓	×
PET	✓	×
PAI	✓	×
PE	✓	×
PPSU	✓	×
PEI	✓	×
PSU	✓	×
PPS	✓	×

Mežiagos klasė	Techninis plastikas	Standartinis plastikas
Medžiaga		
PUR	✓	✗

B priedas. Stačiakampių antenų teorinių parametrų skaičiavimo *MATLAB* kodas.

```
clear all
clc

format long

% % % % Antenna Theory Analysis and Design 3rd ed, Balanis, C. A. (2005)

% L1C band: f0 = 1575.42 MHz

% % PA 2200 mikrojuostelinė antena
f0 = 1575.42 * 10^(6); % Hz L1
c = 3 * 10^(8); % m/s
lambda0 = c/f0; % m
k0 = 2*pi/lambda0; % bangos skaičius
er = 3.8 % dielektrinė konstanta
h = 1.2 * 10^(-3); % m
fr = f0;

% % PTFE G400 mikrojuostelinė antena
f0 = 1575.42 * 10^(6); % Hz L1
c = 3 * 10^(8); % m/s
lambda0 = c/f0; % m
k0 = 2*pi/lambda0;
er = 2.1 % dielectric constant
h = 1.2 * 10^(-3); % m
fr = f0;

% % PEEK Rectangle patch
f0 = 1575.42 * 10^(6); % Hz L1
c = 3 * 10^(8); % m/s
lambda0 = c/f0; % m
k0 = 2*pi/lambda0;
er = 3.2 % dielectric constant
h = 1.2 * 10^(-3); % m
fr = f0;

% % W, L skaičiavimai (820 psl. Example 14.1)

% 1) Antenos plotis, m
W = (c/(2*fr))*sqrt(2/(er+1));
w = W*10^(3)

% 2) Efektyvi dielektrinė konstanta
% W/h > 1
er_eff = 0.5*(er + 1) + 0.5*(er - 1)*((1+12*(h/W))^(-1/2))

% 3) Antenos ilgio pokytis, m
dL = (0.412*h*(er_eff+0.3)*((W/h)+0.264))/((er_eff-0.258)*((W/h)+0.8));

% 4) Antenos ilgis, m
L = (c/(2*fr*sqrt(er_eff))) - 2*dL;
l = L*10^(3)

% 5) Antenos efektyvus ilgis, m
L_eff = L + 2*dL;

% Antenos rezonansinio dažnio skaičiavimas (825 psl. Example 14.2)
I1func = @(x) (sin(k0.*W.*cos(x)./2)./cos(x)).^2.*(sin(x)).^3
I1 = integral(I1func, 0, pi)

G1_single_slot = I1/(120*pi^2)
G1 = (W/(120*lambda0))*(1 - (k0*h)^2/24)

G12func = @(x) ( (sin(k0.*W.*cos(x)./2)./cos(x)).^2.*besselj(0,
(k0.*L.*sin(x))).*(sin(x)).^3 );
G12 = (1/(120*pi^2)) * integral(G12func, 0, pi)

Rin = 1/(2*(G1_single_slot+G12)) % Ohm
```

```

Y0 = acos(sqrt(50/Rin))*L/pi; % m
l0 = Y0*10^(3) % m

X0 = 1*10^(-3); % m, ispjova W ašy ((Ijmeter, 2014), 5-a lentelė)
w0 = X0*10^(3) % m

Z0 = 50; % Ohm
B = 60*pi^(2)/(Z0*sqrt(er));

% Antenos maitinimo linijos storis, Wz = Wm, m
Wm = (2*h/pi)*( B-1-log(2*B-1)+((er-1)/(2*er))*( log(B-1)+0.39-(0.61/er) ) );
% Wm = 0;
% if(W/h <= 2)
%     Wm = 4*h/(sqrt( (Z0/60)*sqrt((er+1)/2) + ((er-1)/(er+1))*(0.23 + (0.11/er))
% ));
% else % W/h > 2
%     Wm = 8*h*exp( Z0/(sqrt(er+1.41)) )/(exp(2)-2);
% end

% Antenos parametrų atvaizdavimas
% wm=wf
wm = Wm*10^(3)

Lm = c/(4.0*fr*sqrt(er_eff));
lm = Lm*10^(3)

Lf = 6*h/2; % Antenos maitinimo linijos ilgis
lf = Lf*10^(3)

Wg = 6*h + W;
wg = Wg*10^(3)

Lg = 6*h + L;
lg = Lg*10^(3) % mm

% Apskaičiuojami ADS Keydight programa modeliuojamų antenų parametrai
TL1_W = round(wm, 3) % mm
TL1_L = round((lm-l0), 3)

Clin1_W2 = round(wm, 3)
Clin1_S1_S2 = round(w0, 3)
Clin1_W1_W3 = round((w-(2*w0)-wm)/2, 3)
Clin1_L = round(l0, 3)

TL2_W = round(w, 3)
TL2_L = round((l-l0), 3)

% Tikrinama ar po apvalinimo ir sumavimo antenų parametrai sutampa
val = Clin1_W2+(2*(Clin1_S1_S2+Clin1_W1_W3));
if(val ~= TL2_W)
disp('Widths are not equal!!!');
disp('TL2_W:');
disp(TL2_W);
disp('(Clin1_W2+(2*(Clin1_S1_S2+Clin1_W1_W3)):');
disp(val);
end

if((Clin1_L+TL2_L) ~= round(l, 3))
disp('Lenghts are not equal!!!');
end

```

C priedas. Antenų ir elektrodų matavimo rezultatų apdorojimo *MATLAB* kodas.

```
clear all
close all
clc

% Mikrojuostelinių linijų ir antenų testavimo duomenų analizė

%% TDR 50 Ω etalono matavimas
file_name_ref = '50 Ohm';
plot_name_ref = ['TP1 50 Ω etalono TDR'];
file_path_ref = 'Test data 20250418/50ohm.csv';

T_ref = readtable(file_path_ref, 'VariableNamingRule', 'preserve');

% Duomenų analizės režiai
x_start_ref = 9.2; % ns
x_end_ref = 10.2; % ns

% TDR matavimo pradžios laikas
x_wire_end_ref = 8.9; % ns

% TDR matavimo pabaigos laikas
T_filtered_ref = T_ref{T_ref{:,1}./10^(-9) >= 9.6, :};
[y_tdr_end_ref, idx_tdr_end_ref] = min(T_filtered_ref(:,2));
x_tdr_end_ref = T_filtered_ref(idx_tdr_end_ref,1) ./ 10^(-9);

% Duomenų skaitymas iš failo ir analizė x_start_ref ir x_end_ref režiuose
T_filtered_ref = T_ref{T_ref{:,1}./10^(-9) >= x_start_ref & T_ref{:,1}./10^(-9) <=
x_end_ref, :};
[y_max_ref, idxmax_ref] = max(T_filtered_ref(:,2));
x_max_ref = T_filtered_ref(idxmax_ref,1) ./ 10^(-9);
[y_min_ref, idxmin_ref] = min(T_filtered_ref(:,2));
x_min_ref = T_filtered_ref(idxmin_ref,1) ./ 10^(-9);
% y_filtered_ref = T_filtered_ref(:, 2);
% y_avg_ref = mean(y_filtered_ref);

[rows_ref, cols_ref] = size(T_filtered_ref);
y_start_ref = T_filtered_ref(1, 2);
y_end_ref = T_filtered_ref(rows_ref, 2);

% Randamas TP1 etalono impedanso nuokrypis nuo 50.0 Ω vertės
y_offset_ref = 50.0 - y_max_ref;

% Grafiko braižymas
x_ref = T_ref{:,1}' ./ 10^(-9);
y_ref = T_ref{:,2}';

fig1 = figure(1);
fig1.Units = 'centimeters';
fig1.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm wide × 2.5 cm high
hold on
plot(x_ref, y_ref, 'r', 'LineWidth', 2.0)

% Nurodomi TDR matavimo režiai
plot([x_wire_end_ref x_wire_end_ref], ylim, '--b', 'LineWidth', 1.0);

plot([x_tdr_end_ref x_tdr_end_ref], ylim, '--b', 'LineWidth', 1.0);

% Pažymimas maksimalus TP1 etalono impedanso taškas
plot(x_max_ref, y_max_ref, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');

% Nurodomi TDR matavimo vidurkinimo režiai
plot(x_start_ref, y_start_ref, 'k>', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');

plot(x_end_ref, y_end_ref, 'k<', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');

% Grafike atvaizduojami apskaičiuoti duomenys
text(x_max_ref-0.15, y_max_ref + 10, sprintf('(% .3f ; % .3f)', x_max_ref,
y_max_ref), 'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor',
'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
```

```

text(x_start_ref-0.15, y_start_ref - 13, sprintf('%.3f ; %.3f', x_start_ref,
y_start_ref), 'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor',
'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(x_end_ref-0.25, y_end_ref - 13, sprintf('%.3f ; %.3f', x_end_ref,
y_end_ref), 'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor',
'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(8.7, 160, sprintf('y_{min} = %.3f \Omega ny_{max} = %.3f \Omega ny_{offset} = 50 -
y_{max} = %.3f \Omega nTDR_{rėžiai} (mėlyna linija) = [%.3f ; %.3f] ns', y_min_ref,
y_max_ref, y_offset_ref, x_wire_end_ref, x_tdr_end_ref), 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
xlim([x_ref(1,1) x_ref(1,1001)]);
ylim([0 200]);

% Nustatomi grafiko parametrai, braižomas ir išsaugomas grafikas
ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

title(plot_name_ref);
xlabel('Laikas, ns');
ylabel('Impedansas, \Omega');
hold off
drawnow;
pause(4);
frame1 = getframe(fig1);
imwrite(frame1.cdata, [file_name_ref '.png']);

%% PEEK elektrodų TDR
% Aprašomi elektrodų TDR matavimų failų pavadinimai ir numatomos grafikų spalvos
file_name_peek = ["p4-d", "p4-v", "p4-k", "p5-d", "p5-vd", "p5-vk", "p5-k"];
color_peek = ["red", "green", "blue", "cyan", "#FF8000" "magenta", "black"];

% Duomenų analizės rėžiai
x_start_peek = 9.075;
x_end_peek = 9.19;

% Grafiko pavadinimas
plot_name_peek = ['PEEK elektrodų TDR + TP1 50 \Omega etalono nuokrypis (y_{offset})'];

% Duomenų skaitymas iš failų ir analizė x_start_peek ir x_end_peek rėžiuose
for i=1:length(file_name_peek)
    % Nuskaitomas duomenų failas
    file_path_peek = ['Test data 20250418/' file_name_peek{i} '.csv'];

    T_peek = readtable(file_path_peek, 'VariableNamingRule', 'preserve');

    % Duomenų skaitymas iš failo ir analizė x_start_peek ir x_end_peek rėžiuose
    T_filtered_peek = T_peek(T_peek(:,1)./10^(-9) >= x_start_peek &
T_peek(:,1)./10^(-9) <= x_end_peek, :);
    y_filtered_peek = T_filtered_peek(:, 2);
    y_avg_peek{i} = mean(y_filtered_peek)+y_offset_ref;
    [rows_peek, cols_peek] = size(T_filtered_peek);
    y_start_peek = T_filtered_peek(1, 2);
    y_end_peek = T_filtered_peek(rows_peek, 2);

    % Išsaugomi duomenys
    x_peek{i} = T_peek(:,1)'./10^(-9);
    y_peek{i} = T_peek(:,2)'+y_offset_ref;
end

% Braižimas grafikas
fig2 = figure(2);
fig2.Units = 'centimeters';
fig2.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm plotis × 2.5 cm aukštis

```

hold on

```
str_peek = sprintf('Elektrodų impedansų vidurkiai, TDR analizės režiuose:\n');
```

```
for i=1:length(file_name_peek)
    legend_plot_peek{i}=plot(x_peek{i}, y_peek{i},
"Color",color_peek{i},'LineWidth', 2.5);
    legend_name_peek{i} = file_name_peek{i};
    str1_peek = ' ';
    if mod(i, 2) ==0
        str1_peek = '\n';
    end
    str_peek = [str_peek sprintf(['%s_{avg} = %.3f  $\Omega$ ' str1_peek],
file_name_peek{i}, y_avg_peek{i})];
end
```

```
str_peek = [str_peek sprintf(['peek-sum_{avg} = %.3f  $\Omega$ '],
mean(cell2mat(y_avg_peek)))];
```

```
% TDR matavimo režiai
x_wire_end_peek = 8.9; % ns
x_tdr_end_peek = 9.195; % ns
```

```
% Nurodomi TDR matavimo režiai
tdr_r_s_peek = plot([x_wire_end_peek x_wire_end_peek], ylim, '--b', 'LineWidth',
1.8);
tdr_r_e_peek = plot([x_tdr_end_peek x_tdr_end_peek], ylim, '--b', 'LineWidth',
1.8);
```

```
% Nurodomi TDR matavimo vidurkinimo režiai
tdr_a_s_peek = plot([x_start_peek x_start_peek], ylim, '--k', 'LineWidth', 1.8);
tdr_a_e_peek = plot([x_end_peek x_end_peek], ylim, '--k', 'LineWidth', 1.8);
```

```
% Nurodomi grafikų pavadinimai ir apskaičiuotis vertės
legend([legend_plot_peek{1} legend_plot_peek{2} legend_plot_peek{3}
legend_plot_peek{4} legend_plot_peek{5} legend_plot_peek{6} legend_plot_peek{7}
tdr_r_s_peek tdr_r_e_peek tdr_a_s_peek tdr_a_e_peek], ...
{legend_name_peek{1}, legend_name_peek{2}, legend_name_peek{3},
legend_name_peek{4}, legend_name_peek{5}, legend_name_peek{6}, legend_name_peek{7}
'TDR matavimų režiai' 'TDR matavimų režiai' 'TDR analizės režiai' 'TDR analizės
režiai'}, 'Location', 'northwest');
```

```
text(8.925, 210, str_peek, 'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
```

```
% Nustatomi grafiko parametrai, braižomas ir išsaugomas grafikas
xlim([8.8 9.25]);
ylim([40 250]);
```

```
ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';
```

```
title(plot_name_peek);
xlabel('Laikas, ns');
ylabel('Impedansas,  $\Omega$  ');
hold off
drawnow;
pause(5);
frame2 = getframe(fig2);
imwrite(frame2.cdata, [plot_name_peek '.png']);
```

```
% PTFE elektrodų TDR
```

```
% Aprašomi elektrodų TDR matavimų failų pavadinimai ir numatomos grafikų spalvos
file_name_ptfe = ["ptfe1", "ptfe3-d", "ptfe3-v", "ptfe3-k", "ptfe3x-k", "ptfe3-v"];
color_ptfe = ["red", "green", "blue", "cyan", "#FF8000" "magenta"];
```

```

% Duomenų analizės režiai
x_start_ptfe = 9.06;
x_end_ptfe = 9.15;

% Grafiko pavadinimas
plot_name_ptfe = ['PTFE elektrodų TDR + TP1 50  $\Omega$  etalono nuokrypis (y_{offset})'];

% Duomenų skaitymas iš failų ir analizė x_start_ptfe ir x_end_ptfe režiuose
for i=1:length(file_name_ptfe)
    % Nuskaitomas duomenų failas
    file_path_ptfe = ['Test data 20250418/' file_name_ptfe{i} '.csv'];

    T_ptfe = readtable(file_path_ptfe, 'VariableNamingRule', 'preserve');

    % Duomenų skaitymas iš failo ir analizė x_start_peek ir x_end_peek režiuose
    T_filtered_ptfe = T_ptfe(T_ptfe(:,1)./10^(-9) >= x_start_ptfe &
T_ptfe(:,1)./10^(-9) <= x_end_ptfe, :);
    y_filtered_ptfe = T_filtered_ptfe(:, 2);
    y_avg_ptfe{i} = mean(y_filtered_ptfe)+y_offset_ref;
    [rows_ptfe, cols_ptfe] = size(T_filtered_ptfe);
    y_start_ptfe = T_filtered_ptfe(1, 2);
    y_end_ptfe = T_filtered_ptfe(rows_ptfe, 2);

    % Išsaugomi duomenys
    x_ptfe{i} = T_ptfe(:,1)'./10^(-9);
    y_ptfe{i} = T_ptfe(:,2)'+y_offset_ref;
end

% Braižimas grafikas
fig3 = figure(3);
fig3.Units = 'centimeters';
fig3.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm wide x 2.5 cm high

hold on

str_ptfe = sprintf('Elektrodų impedansų vidurkiai, TDR analizės režiuose:\n');

for i=1:length(file_name_ptfe)
    legend_plot_ptfe{i}=plot(x_ptfe{i}, y_ptfe{i},
"Color",color_ptfe{i},'LineWidth', 2.5);
    legend_name_ptfe{i} = file_name_ptfe{i};
    str1_ptfe = ' ; ';
    if mod(i, 2) ==0
        str1_ptfe = '\n';
    end
    str_ptfe = [str_ptfe sprintf(['%s_{avg} = %.3f  $\Omega$ ' str1_ptfe],
file_name_ptfe{i}, y_avg_ptfe{i})];
end

str_ptfe = [str_ptfe sprintf(['ptfe-sum_{avg} = %.3f  $\Omega$ '],
mean(cell2mat(y_avg_ptfe)))];

% TDR matavimo režiai
x_wire_end_ptfe = 8.9; % ns
x_tdr_end_ptfe = 9.155; % ns

% Nurodomi TDR matavimo režiai
tdr_r_s_ptfe = plot([x_wire_end_ptfe x_wire_end_ptfe], ylim, '--b', 'LineWidth',
1.8);
tdr_r_e_ptfe = plot([x_tdr_end_ptfe x_tdr_end_ptfe], ylim, '--b', 'LineWidth',
1.8);

% Nurodomi TDR matavimo vidurkinimo režiai
tdr_a_s_ptfe = plot([x_start_ptfe x_start_ptfe], ylim, '--k', 'LineWidth', 1.8);
tdr_a_e_ptfe = plot([x_end_ptfe x_end_ptfe], ylim, '--k', 'LineWidth', 1.8);

% Nurodomi grafikų pavadinimai ir apskaičiuotis vertės
legend([legend_plot_ptfe{1} legend_plot_ptfe{2} legend_plot_ptfe{3}
legend_plot_ptfe{4} legend_plot_ptfe{5} legend_plot_ptfe{6} tdr_r_s_ptfe
tdr_r_e_ptfe tdr_a_s_ptfe tdr_a_e_ptfe], ...

```

```

    {legend_name_ptfe{1}, legend_name_ptfe{2}, legend_name_ptfe{3},
    legend_name_ptfe{4}, legend_name_ptfe{5}, legend_name_ptfe{6}, 'TDR matavimų
    režiai' 'TDR matavimų režiai' 'TDR analizės režiai' 'TDR analizės režiai'},
    'Location', 'northwest');

text(8.925, 210, str_ptfe, 'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
    'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Nustatomi grafiko parametrai, braižomas ir išsaugomas grafikas
xlim([8.8 9.2]);
ylim([40 250]);

ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

title(plot_name_ptfe);
xlabel('Laikas, ns');
ylabel('Impedansas,  $\Omega$ ');
hold off;
drawnow;
pause(5);
frame3 = getframe(fig3);
imwrite(frame3.cdata, [plot_name_ptfe '.png']);

%% PTFE GPS L1 antenos TDR
% TDR matavimo režiai
x_wire_end_ant_ptfe = 8.6; % ns
x_tdr_end_ant_ptfe = 9.025; % ns

% Duomenų analizės režiai
x_start_ant_ptfe = 8.735;
x_mid_ant_ptfe = x_start_ant_ptfe + 0.089182;
x_end_ant_ptfe = 9.02;

% Grafiko pavadinimas ir duomenų failų pavadinimai
plot_name_ant_ptfe = 'PTFE GPS L1 antenos TDR';
file_path_ant_ptfe1 = ['PTFE/tdr-mano.csv'];
file_path_ant_ptfe2 = ['PTFE/tdr-tado.csv'];

% Duomenys nuskaityti
T_ant_ptfe1 = readtable(file_path_ant_ptfe1, 'VariableNamingRule', 'preserve');
T_ant_ptfe2 = readtable(file_path_ant_ptfe2, 'VariableNamingRule', 'preserve');

x_ant_ptfe1 = T_ant_ptfe1(:,1)'./10^(-9);
y_ant_ptfe1 = T_ant_ptfe1(:,2)'+y_offset_ref;
x_ant_ptfe2 = T_ant_ptfe2(:,1)'./10^(-9);
y_ant_ptfe2 = T_ant_ptfe2(:,2)';

% Duomenų skaitymas iš failo ir analizė x_start_ant_ptfe ir x_end_ant_ptfe
režiuose, randamos min/max vertės ir vidurkiai
T_filtered_ant_ptfe1 = T_ant_ptfe1(T_ant_ptfe1(:,1)'./10^(-9) >= x_start_ant_ptfe &
T_ant_ptfe1(:,1)'./10^(-9) <= x_end_ant_ptfe, :);
y_filtered_ant_ptfe1 = T_filtered_ant_ptfe1(:, 2);
y_avg_ant_ptfe1 = mean(y_filtered_ant_ptfe1)+y_offset_ref;

T_filtered_ant_ptfe2 = T_ant_ptfe2(T_ant_ptfe2(:,1)'./10^(-9) >= x_start_ant_ptfe &
T_ant_ptfe2(:,1)'./10^(-9) <= x_end_ant_ptfe, :);
y_filtered_ant_ptfe2 = T_filtered_ant_ptfe2(:, 2);
y_avg_ant_ptfe2 = mean(y_filtered_ant_ptfe2);

[y_min_ant_ptfe1, idx_min_ant_ptfe1] = min(T_filtered_ant_ptfe1(:,2));
x_min_ant_ptfe1 = T_filtered_ant_ptfe1(idx_min_ant_ptfe1,1)'./10^(-9);

[y_min_ant_ptfe2, idx_min_ant_ptfe2] = min(T_filtered_ant_ptfe2(:,2));
x_min_ant_ptfe2 = T_filtered_ant_ptfe2(idx_min_ant_ptfe2,1)'./10^(-9);

```

```

[y_max_ant_ptfel, idx_max_ant_ptfel] = max(T_filtered_ant_ptfel(:,2));
x_max_ant_ptfel = T_filtered_ant_ptfel(idx_max_ant_ptfel,1)./10^(-9);

[y_max_ant_ptfe2, idx_max_ant_ptfe2] = max(T_filtered_ant_ptfe2(:,2));
x_max_ant_ptfe2 = T_filtered_ant_ptfe2(idx_max_ant_ptfe2,1)./10^(-9);

% Braižimas grafikas
fig4 = figure(4);
fig4.Units = 'centimeters';
fig4.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm wide × 2.5 cm high

hold on

s11_ant_ptfel = plot(x_ant_ptfel, y_ant_ptfel, "Color","red",'LineWidth', 2.5);

% Nustatomi grafiko parametrai
ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

title(plot_name_ant_ptfe);
xlabel('Laikas, ns');
ylabel('Impedansas,  $\Omega$ ');

% Nustatomi TDR matavimo režiai
tdr_r_s_ant_ptfe = plot([x_wire_end_ant_ptfe x_wire_end_ant_ptfe], ylim, '--b',
'LineWidth', 1.8);
tdr_r_e_ant_ptfe = plot([x_tdr_end_ant_ptfe x_tdr_end_ant_ptfe], ylim, '--b',
'LineWidth', 1.8);

% Nustatomi TDR matavimo analizės režiai
tdr_a_s_ant_ptfe = plot([x_start_ant_ptfe x_start_ant_ptfe], ylim, '--k',
'LineWidth', 1.8);
tdr_a_e_ant_ptfe = plot([x_end_ant_ptfe x_end_ant_ptfe], ylim, '--k', 'LineWidth',
1.8);
tdr_a_m_ant_ptfe = plot([x_mid_ant_ptfe x_mid_ant_ptfe], ylim, '--k', 'LineWidth',
1.8);

text(x_start_ant_ptfe+((x_mid_ant_ptfe-x_start_ant_ptfe)/2)-0.02, 20, 't11-L',
'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k','BackgroundColor',
'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(x_mid_ant_ptfe+((x_end_ant_ptfe-x_mid_ant_ptfe)/2)-0.03, 20, 'clin1-L',
'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k','BackgroundColor',
'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Nurodomos min/max vertės
plot(x_max_ant_ptfel, y_max_ant_ptfel+y_offset_ref, 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
text(x_max_ant_ptfel-0.07, y_max_ant_ptfel+3, 'y_{max}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);

plot(x_min_ant_ptfel, y_min_ant_ptfel+y_offset_ref, 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
text(x_min_ant_ptfel, y_min_ant_ptfel-3.5, 'y_{min}', 'FontSize', 9, 'FontWeight',
'bold', 'Color', 'k','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Naudotojui leidžiama grafike pasirinkti papildomus 6 taškus
user_input_ant_ptfe = input('Ar norite pasirinkti PTFE antenos TDR grafiko taškus?
(Y/N): ', 's');
user_input_ant_ptfe = upper(strtrim(user_input_ant_ptfe));
points_ptfe = 6;
if strcmp(user_input_ant_ptfe, 'Y')
    for i = 1:points_ptfe
        % Laukiama naudotojo taško pasirinkimo patvirtinimo

```

```

dcm_ant_ptfe = datacursormode(gcf);
datacursormode on;

disp('Pasirinkite tašką ir spauskite "Enter" komandiniame lange...');
pause;

% Nuskaitomi grafiko taško duomenys
cursorInfo_ant_ptfe = getCursorInfo(dcm_ant_ptfe);
selectedX_ant_ptfel(i) = cursorInfo_ant_ptfe.Position(1);
selectedY_ant_ptfel(i) = cursorInfo_ant_ptfe.Position(2);
fprintf('Pasirinktas taškas: (%.3f, %.3f)\n', selectedX_ant_ptfel,
selectedY_ant_ptfel);
end

% Išsaugomi naudotojo pasirinkti taškai
writematrix([selectedX_ant_ptfel; selectedY_ant_ptfel],
'selected_points_PTFE1.txt', 'Delimiter', 'tab');

elseif strcmp(user_input_ant_ptfe, 'N')
disp('Taškų pasirinkimas atšauktas.');
```

```

else
disp('Netinkama įvestis. Įveskite Y arba N.');
```

```

end

% Nuskaitomi naudotojo pasirinkti taškai
data_ant_ptfe = readmatrix('selected_points_PTFE1.txt');

selectedX_ant_ptfel = data_ant_ptfe(1,:);
selectedY_ant_ptfel = data_ant_ptfe(2,:);

% Nurodomi naudotojo pasirinkti taškai
for i = 1:points_ptfe
plot(selectedX_ant_ptfel(i), selectedY_ant_ptfel(i), 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
end

text(selectedX_ant_ptfel(1)-0.03, selectedY_ant_ptfel(1)+4, 'y_{0}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_ptfel(2)-0.01, selectedY_ant_ptfel(2)-7, 'y_{1}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_ptfel(3)-0.02, selectedY_ant_ptfel(3)+6, 'y_{2}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_ptfel(4), selectedY_ant_ptfel(4)+5, 'y_{3}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_ptfel(5)-0.02, selectedY_ant_ptfel(5)-6, 'y_{4}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_ptfel(6)-0.02, selectedY_ant_ptfel(6)+6, 'y_{5}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);

%-----
%-----

% Braižomas grafikas
s11_ant_ptfe2 = plot(x_ant_ptfe2, y_ant_ptfe2, 'Color','b','LineWidth', 2.5);

xlim([8.4 9.4]);
ylim([0 70]);

plot(x_max_ant_ptfe2, y_max_ant_ptfe2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor',
'k');

plot(x_min_ant_ptfe2, y_min_ant_ptfe2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor',
'k');
```

```

% Naudotojui leidžiama grafike pasirinkti papildomus 6 taškus
user_input_ant_ptfe = input('Ar norite pasirinkti PTFE antenos TDR grafiko taškus?
(Y/N): ', 's');
user_input_ant_ptfe = upper(strtrim(user_input_ant_ptfe));
if strcmp(user_input_ant_ptfe, 'Y')
    for i = 1:points_ptfe
        % Laukiama naudotojo taško pasirinkimo patvirtinimo
        dcm_ant_ptfe = datacursormode(gcf);
        datacursormode on;

        disp('Pasirinkite tašką ir spauskite "Enter" komandiniame lange...');
        pause;

        % Nuskaitomi grafiko taško duomenys
        cursorInfo_ant_ptfe = getCursorInfo(dcm_ant_ptfe);
        selectedX_ant_ptfe2(i) = cursorInfo_ant_ptfe.Position(1);
        selectedY_ant_ptfe2(i) = cursorInfo_ant_ptfe.Position(2);
        fprintf('Pasirinktas taškas: (%.3f, %.3f)\n', selectedX_ant_ptfe2,
selectedY_ant_ptfe2);
    end

    % Išsaugomi naudotojo pasirinkti taškai
    writematrix([selectedX_ant_ptfe2; selectedY_ant_ptfe2],
'selected_points_PTFE2.txt', 'Delimiter', 'tab');

elseif strcmp(user_input_ant_ptfe, 'N')
    disp('Taškų pasirinkimas atšauktas.');
```

```

else
    disp('Netinkama įvestis. Įveskite Y arba N.');
```

```

end

% Nuskaitomi naudotojo pasirinkti taškai
data_ant_ptfe = readmatrix('selected_points_PTFE2.txt');

selectedX_ant_ptfe2 = data_ant_ptfe(1,:);
selectedY_ant_ptfe2 = data_ant_ptfe(2,:);

% Nurodomi naudotojo pasirinkti taškai
for i = 1:points_ptfe
    plot(selectedX_ant_ptfe2(i), selectedY_ant_ptfe2(i), 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
end

% Nurodomi pasirinkti taškai ir apskaičiuotos vertės
text(9.16, 28, sprintf(['      (TDR_{offset}   TRD_{corr})\n' ...
'y_{avg} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{max} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{min} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{0}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{1}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{2}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{3}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{4}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
'y_{5}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n'], ...
y_avg_ant_ptfe1, y_avg_ant_ptfe2, ...
y_max_ant_ptfe1+y_offset_ref, y_max_ant_ptfe2, ...
y_min_ant_ptfe1+y_offset_ref, y_min_ant_ptfe2, ...
selectedY_ant_ptfe1(1), selectedY_ant_ptfe2(1), ...
selectedY_ant_ptfe1(2), selectedY_ant_ptfe2(2), ...
selectedY_ant_ptfe1(3), selectedY_ant_ptfe2(3), ...
selectedY_ant_ptfe1(4), selectedY_ant_ptfe2(4), ...
selectedY_ant_ptfe1(5), selectedY_ant_ptfe2(5), ...
selectedY_ant_ptfe1(6), selectedY_ant_ptfe2(6)), 'FontSize', 8.6, 'FontWeight',
'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Braižomas ir išsaugomas grafikas
legend([s11_ant_ptfe1 s11_ant_ptfe2 tdr_r_s_ant_ptfe tdr_r_e_ant_ptfe
tdr_a_s_ant_ptfe tdr_a_e_ant_ptfe], ...
{'Impedansas_{offset}' 'Impedansas_{corr}' 'TDR matavimų režiai' 'TDR matavimų
režiai' 'TDR analizės režiai' 'TDR analizės režiai'}, 'Location', 'northeast');
```

```

hold off
drawnow;
pause(5);
frame4 = getframe(fig4);
imwrite(frame4.cdata, [plot_name_ant_ptfe '.png']);

%% PEEK GPS L1 antenos TDR
% TDR matavimo rėžiai
x_wire_end_ant_peek = 8.6; % ns
x_tdr_end_ant_peek = 8.965; % ns

% Duomenų analizės rėžiai
x_start_ant_peek = 8.735;
x_mid_ant_peek = x_start_ant_peek + 0.068628;
x_end_ant_peek = 8.96;

% Grafiko pavadinimas ir duomenų failų pavadinimai
plot_name_ant_peek = 'PEEK GPS L1 antenos TDR';
file_path_ant_peek1 = ['PEEK/tdr-mano.csv'];
file_path_ant_peek2 = ['PEEK/tdr-tado.csv'];

% Duomenys nuskaityti
T_ant_peek1 = readtable(file_path_ant_peek1, 'VariableNamingRule', 'preserve');
T_ant_peek2 = readtable(file_path_ant_peek2, 'VariableNamingRule', 'preserve');

x_ant_peek1 = T_ant_peek1(:,1)'./10^(-9);
y_ant_peek1 = T_ant_peek1(:,2)'+y_offset_ref;
x_ant_peek2 = T_ant_peek2(:,1)'./10^(-9);
y_ant_peek2 = T_ant_peek2(:,2)';

% Duomenų skaitymas iš failo ir analizė x_start_ant_peek ir x_end_ant_peek
rėžiuose, randamos min/max vertės ir vidurkiai
T_filtered_ant_peek1 = T_ant_peek1{T_ant_peek1(:,1)'./10^(-9) >= x_start_ant_peek &
T_ant_peek1(:,1)'./10^(-9) <= x_end_ant_peek, :};
y_filtered_ant_peek1 = T_filtered_ant_peek1(:, 2);
y_avg_ant_peek1 = mean(y_filtered_ant_peek1)+y_offset_ref;

T_filtered_ant_peek2 = T_ant_peek2{T_ant_peek2(:,1)'./10^(-9) >= x_start_ant_peek &
T_ant_peek2(:,1)'./10^(-9) <= x_end_ant_peek, :};
y_filtered_ant_peek2 = T_filtered_ant_peek2(:, 2);
y_avg_ant_peek2 = mean(y_filtered_ant_peek2);

[y_min_ant_peek1, idx_min_ant_peek1] = min(T_filtered_ant_peek1(:,2));
x_min_ant_peek1 = T_filtered_ant_peek1(idx_min_ant_peek1,1)'./10^(-9);

[y_min_ant_peek2, idx_min_ant_peek2] = min(T_filtered_ant_peek2(:,2));
x_min_ant_peek2 = T_filtered_ant_peek2(idx_min_ant_peek2,1)'./10^(-9);

[y_max_ant_peek1, idx_max_ant_peek1] = max(T_filtered_ant_peek1(:,2));
x_max_ant_peek1 = T_filtered_ant_peek1(idx_max_ant_peek1,1)'./10^(-9);

[y_max_ant_peek2, idx_max_ant_peek2] = max(T_filtered_ant_peek2(:,2));
x_max_ant_peek2 = T_filtered_ant_peek2(idx_max_ant_peek2,1)'./10^(-9);

% Braižymas grafikas
fig5 = figure(5);
fig5.Units = 'centimeters';
fig5.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm plotis × 2.5 cm aukštis

hold on

s11_ant_peek1 = plot(x_ant_peek1, y_ant_peek1, "Color","red",'LineWidth', 2.5);

% Nustatomi grafiko parametrai
ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;

```

```

grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

title(plot_name_ant_peek);
xlabel('Laikas, ns');
ylabel('Impedansas,  $\Omega$ ');

% Nustatomi TDR matavimo rėžiai
tdr_r_s_ant_peek = plot([x_wire_end_ant_peek x_wire_end_ant_peek], ylim, '--b',
'LineWidth', 1.8);
tdr_r_e_ant_peek = plot([x_tdr_end_ant_peek x_tdr_end_ant_peek], ylim, '--b',
'LineWidth', 1.8);

% Nustatomi TDR matavimo analizės rėžiai
tdr_a_s_ant_peek = plot([x_start_ant_peek x_start_ant_peek], ylim, '--k',
'LineWidth', 1.8);
tdr_a_e_ant_peek = plot([x_end_ant_peek x_end_ant_peek], ylim, '--k', 'LineWidth',
1.8);
tdr_a_m_ant_peek = plot([x_mid_ant_peek x_mid_ant_peek], ylim, '--k', 'LineWidth',
1.8);

text(x_start_ant_peek+((x_mid_ant_peek-x_start_ant_peek)/2)-0.02, 20, 't11-L',
'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor',
'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(x_mid_ant_peek+((x_end_ant_peek-x_mid_ant_peek)/2)-0.03, 20, 'clin1-L',
'FontSize', 9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor',
'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Nurodomos min/max vertės
plot(x_max_ant_peek1, y_max_ant_peek1+y_offset_ref, 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
text(x_max_ant_peek1-0.07, y_max_ant_peek1+3, 'y_{max}', 'FontSize', 9,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
'LineWidth', 0.2);

plot(x_min_ant_peek1, y_min_ant_peek1+y_offset_ref, 'ko', 'MarkerSize', 5,
'MarkerFaceColor', 'k');
text(x_min_ant_peek1, y_min_ant_peek1-7, 'y_{min}', 'FontSize', 9, 'FontWeight',
'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Naudotojui leidžiama grafike pasirinkti papildomus 6 taškus
user_input_ant_peek = input('Ar norite pasirinkti PEEK antenos TDR grafiko taškus?
(Y/N): ', 's'); % 's' means read as string
user_input_ant_peek = upper(strtrim(user_input_ant_peek)); % Remove spaces and
convert to uppercase
points_peek = 5;
if strcmp(user_input_ant_peek, 'Y')
    for i = 1:points_peek
        % Laukiama naudotojo taško pasirinkimo patvirtinimo
        dcm_ant_peek = datacursormode(gcf);
        datacursormode on;

        disp('Pasirinkite tašką ir spauskite "Enter" komandiniame lange...');
        pause; % Wait for user to press Enter

        % Nuskaitomi grafiko taško duomenys
        cursorInfo_ant_peek = getCursorInfo(dcm_ant_peek);
        selectedX_ant_peek1(i) = cursorInfo_ant_peek.Position(1);
        selectedY_ant_peek1(i) = cursorInfo_ant_peek.Position(2);
        fprintf('Pasirinktas taškas: (%.3f, %.3f)\n', selectedX_ant_peek1,
selectedY_ant_peek1);
    end

    % Išsaugomi naudotojo pasirinkti taškai
    writematrix([selectedX_ant_peek1; selectedY_ant_peek1],
'selected_points_PEEK1.txt', 'Delimiter', 'tab');
elseif strcmp(user_input_ant_peek, 'N')
    disp('Taškų pasirinkimas atšauktas.');
```

```

else
    disp('Netinkama įvestis. Įveskite Y arba N.');
```

```

end

% Nuskaitomi naudotojo pasirinkti taškai
data_ant_peek = readmatrix('selected_points_PEEK1.txt');

selectedX_ant_peek1 = data_ant_peek(1,:);
selectedY_ant_peek1 = data_ant_peek(2,:);

% Nurodomi naudotojo pasirinkti taškai
for i = 1:points_peek
    plot(selectedX_ant_peek1(i), selectedY_ant_peek1(i), 'ko', 'MarkerSize', 5,
        'MarkerFaceColor', 'k');
end

text(selectedX_ant_peek1(1)-0.03, selectedY_ant_peek1(1)+4, 'y_{0}', 'FontSize', 9,
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
    'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_peek1(2)-0.01, selectedY_ant_peek1(2)-6.5, 'y_{1}', 'FontSize',
    9, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
    'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_peek1(3), selectedY_ant_peek1(3)+4, 'y_{2}', 'FontSize', 9,
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
    'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_peek1(4)-0.03, selectedY_ant_peek1(4)-5, 'y_{3}', 'FontSize', 9,
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
    'LineWidth', 0.2);
text(selectedX_ant_peek1(5), selectedY_ant_peek1(5)+4, 'y_{4}', 'FontSize', 9,
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k',
    'LineWidth', 0.2);

%-----
%-----

% Braižomas grafikas
s11_ant_peek2 = plot(x_ant_peek2, y_ant_peek2, 'Color', 'b', 'LineWidth', 2.5);

xlim([8.4 9.4]);
ylim([0 70]);

plot(x_max_ant_peek2, y_max_ant_peek2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor',
    'k');

plot(x_min_ant_peek2, y_min_ant_peek2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor',
    'k');

% Naudotojui leidžiama grafike pasirinkti papildomus 6 taškus
user_input_ant_peek = input('Ar norite pasirinkti PEEK antenos TDR grafiko taškus?
(Y/N): ', 's');
user_input_ant_peek = upper(strtrim(user_input_ant_peek));
if strcmp(user_input_ant_peek, 'Y')
    for i = 1:points_peek
        % Laukiama naudotojo taško pasirinkimo patvirtinimo
        dcm_ant_peek = datacursormode(gcf);
        datacursormode on;

        disp('Pasirinkite tašką ir spauskite "Enter" komandiniame lange...');
        pause;

        % Nuskaitomi grafiko taško duomenys
        cursorInfo_ant_peek = getCursorInfo(dcm_ant_peek);
        selectedX_ant_peek2(i) = cursorInfo_ant_peek.Position(1);
        selectedY_ant_peek2(i) = cursorInfo_ant_peek.Position(2);
        fprintf('Pasirinktas taškas: (%.3f, %.3f)\n', selectedX_ant_peek2,
            selectedY_ant_peek2);
    end

    % Išsaugomi naudotojo pasirinkti taškai
    writematrix([selectedX_ant_peek2; selectedY_ant_peek2],
        'selected_points_PEEK2.txt', 'Delimiter', 'tab');
```

```

elseif strcmp(user_input_ant_peek, 'N')
    disp('Taškų pasirinkimas atšauktas.');
```

```

else
    disp('Netinkama įvestis. Įveskite Y arba N.');
```

```

end

% Nuskaitomi naudotojo pasirinkti taškai
data_ant_peek = readmatrix('selected_points_PEEK2.txt');

selectedX_ant_peek2 = data_ant_peek(1,:);
selectedY_ant_peek2 = data_ant_peek(2,:);

% Nurodomi naudotojo pasirinkti taškai
for i = 1:points_peek
    plot(selectedX_ant_peek2(i), selectedY_ant_peek2(i), 'ko', 'MarkerSize', 5,
        'MarkerFaceColor', 'k');
end

% Nurodomi pasirinkti taškai ir apskaičiuotos vertės
text(9.16, 29, sprintf(['          (TDR_{offset}   TRD_{corr})\n' ...
    'y_{avg} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{max} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{min} = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{0}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{1}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{2}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{3}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n' ...
    'y_{4}   = (%.3f ; %.3f) Ω\n'], ...
    y_avg_ant_peek1, y_avg_ant_peek2, ...
    y_max_ant_peek1+y_offset_ref, y_max_ant_peek2, ...
    y_min_ant_peek1+y_offset_ref, y_min_ant_peek2, ...
    selectedY_ant_peek1(1), selectedY_ant_peek2(1), ...
    selectedY_ant_peek1(2), selectedY_ant_peek2(2), ...
    selectedY_ant_peek1(3), selectedY_ant_peek2(3), ...
    selectedY_ant_peek1(4), selectedY_ant_peek2(4), ...
    selectedY_ant_peek1(5), selectedY_ant_peek2(5)), 'FontSize', 9, 'FontWeight',
    'bold', 'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Braižomas ir išsaugomas grafikas
legend([s11_ant_peek1 s11_ant_peek2 tdr_r_s_ant_peek tdr_r_e_ant_peek
    tdr_a_s_ant_peek tdr_a_e_ant_peek], ...
    {'Impedansas_{offset}' 'Impedansas_{corr}' 'TDR matavimo režiai' 'TDR matavimo
    režiai' 'TDR analizės režiai' 'TDR analizės režiai'}, 'Location', 'northeast');

hold off
drawnow;
pause(5);
frame5 = getframe(fig5);
imwrite(frame5.cdata, [plot_name_ant_peek '.png']);

%% PTFE S11
% Nuskaitomi duomenys
file_name_a_ptfe = 'PTFE GPS L1 antenos S11';
T_a_ptfel = readtable('PTFE/s11-mano.csv', 'VariableNamingRule', 'preserve');
x_a_ptfel = T_a_ptfel(:,1)'./10^9;
y_a_ptfel = T_a_ptfel(:,2)';

T_a_ptfe2 = readtable('PTFE/s11-tado.csv', 'VariableNamingRule', 'preserve');
x_a_ptfe2 = T_a_ptfe2(:,1)'./10^9;
y_a_ptfe2 = T_a_ptfe2(:,2)';

% Randamas S11 parametro pikas (artimiausias GPS L1 dažniui)
T_filtered_a_ptfel = T_a_ptfel{T_a_ptfel(:,1)'./10^9 <= 2, :};
[y_s11_a_ptfel1, idx_s11_a_ptfel1] = min(T_filtered_a_ptfel(:,2));
x_s11_a_ptfel1 = T_filtered_a_ptfel(idx_s11_a_ptfel1,1)'./10^9;

T_filtered_a_ptfe2 = T_a_ptfe2{T_a_ptfe2(:,1)'./10^9 <= 2, :};
[y_s11_a_ptfe2, idx_s11_a_ptfe2] = min(T_filtered_a_ptfe2(:,2));
x_s11_a_ptfe2 = T_filtered_a_ptfe2(idx_s11_a_ptfe2,1)'./10^9;

```

```

% Braižomas grafikas
fig6 = figure(6);
fig6.Units = 'centimeters';
fig6.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm plotis × 2.5 cm aukštis

hold on

p_a_ptfel = plot(x_a_ptfel, y_a_ptfel, 'Color','r', 'LineWidth', 2.5);
p_a_ptfe2 = plot(x_a_ptfe2, y_a_ptfe2, 'Color','b', 'LineWidth', 2.5);

plot(x_s11_a_ptfel, y_s11_a_ptfel, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');
plot(x_s11_a_ptfe2, y_s11_a_ptfe2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');

text(1.8, y_s11_a_ptfel, sprintf('S_{11} = %.3f dB\nDažnis = %0.5f GHz',
y_s11_a_ptfel, x_s11_a_ptfel), 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'r','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(1.8, y_s11_a_ptfe2+2, sprintf('S_{11} = %.3f dB\nDažnis = %0.5f GHz',
y_s11_a_ptfe2, x_s11_a_ptfe2), 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'b','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Nustatomi parametrai ir išsaugomas grafikas
xlim([1 3]);
ylim([-10 0]);

ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

title(file_name_a_ptfe);
xlabel('Dažnis, GHz');
ylabel('S11, dB');

legend([p_a_ptfel p_a_ptfe2], {'S11', 'S11_{corr}'});

hold off
drawnow;
pause(5);
frame6 = getframe(fig6);
imwrite(frame6.cdata, [file_name_a_ptfe '.png']);

%% PEEK S11
% Nuskaitomi duomenys
file_name_a_peek = 'PEEK GPS L1 antenos S11';
T_a_peek1 = readtable('PEEK/s11-mano.csv', 'VariableNamingRule', 'preserve');
x_a_peek1 = T_a_peek1(:,1)'./10^9;
y_a_peek1 = T_a_peek1(:,2)';

T_a_peek2 = readtable('PEEK/s11-tado.csv', 'VariableNamingRule', 'preserve');
x_a_peek2 = T_a_peek2(:,1)'./10^9;
y_a_peek2 = T_a_peek2(:,2)';

% Randamas S11 parametro pikas (artimiausias GPS L1 dažniui)
T_filtered_a_peek1 = T_a_peek1{T_a_peek1(:,1)'./10^9) <= 2, :};
[y_s11_a_peek1, idx_s11_a_peek1] = min(T_filtered_a_peek1(:,2));
x_s11_a_peek1 = T_filtered_a_peek1(idx_s11_a_peek1,1)'./10^9;

T_filtered_a_peek2 = T_a_peek2{T_a_peek2(:,1)'./10^9) <= 2, :};
[y_s11_a_peek2, idx_s11_a_peek2] = min(T_filtered_a_peek2(:,2));
x_s11_a_peek2 = T_filtered_a_peek2(idx_s11_a_peek2,1)'./10^9;

% Braižomas grafikas
fig7 = figure(7);
fig7.Units = 'centimeters';
fig7.Position = [0, 0, 5, 2.5]; % 5 cm plotis × 2.5 cm aukštis

```

```

hold on

p_a_peek1 = plot(x_a_peek1, y_a_peek1, "Color",'r', 'LineWidth', 2.5);
p_a_peek2 = plot(x_a_peek2, y_a_peek2, "Color",'b', 'LineWidth', 2.5);

plot(x_s11_a_peek1, y_s11_a_peek1, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');
plot(x_s11_a_peek2, y_s11_a_peek2, 'ko', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', 'k');

text(1.8, y_s11_a_peek1+4, sprintf('S_{11} = %.3f dB\nDažnis = %0.5f GHz',
y_s11_a_peek1, x_s11_a_peek1), 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'r','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);
text(1.8, y_s11_a_peek2+2, sprintf('S_{11} = %.3f dB\nDažnis = %0.5f GHz',
y_s11_a_peek2, x_s11_a_peek2), 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'b','BackgroundColor', 'w','EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 0.2);

% Nustatomi parametrai ir išsaugomas grafikas
xlim([1 3]);
ylim([-14 0]);

ax = gca;
ax.GridColor = [0.5, 0.5, 0.5];
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.MinorGridColor = [0.25, 0.25, 0.25];
ax.MinorGridAlpha = 0.5;
grid on;
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

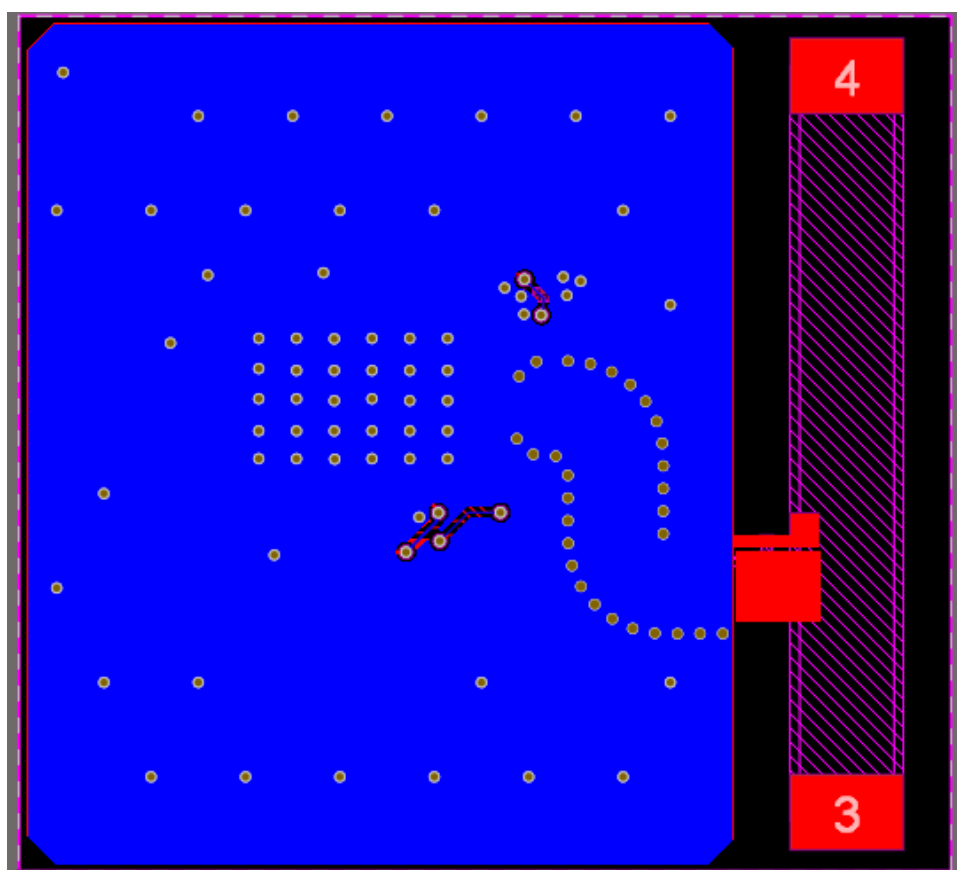
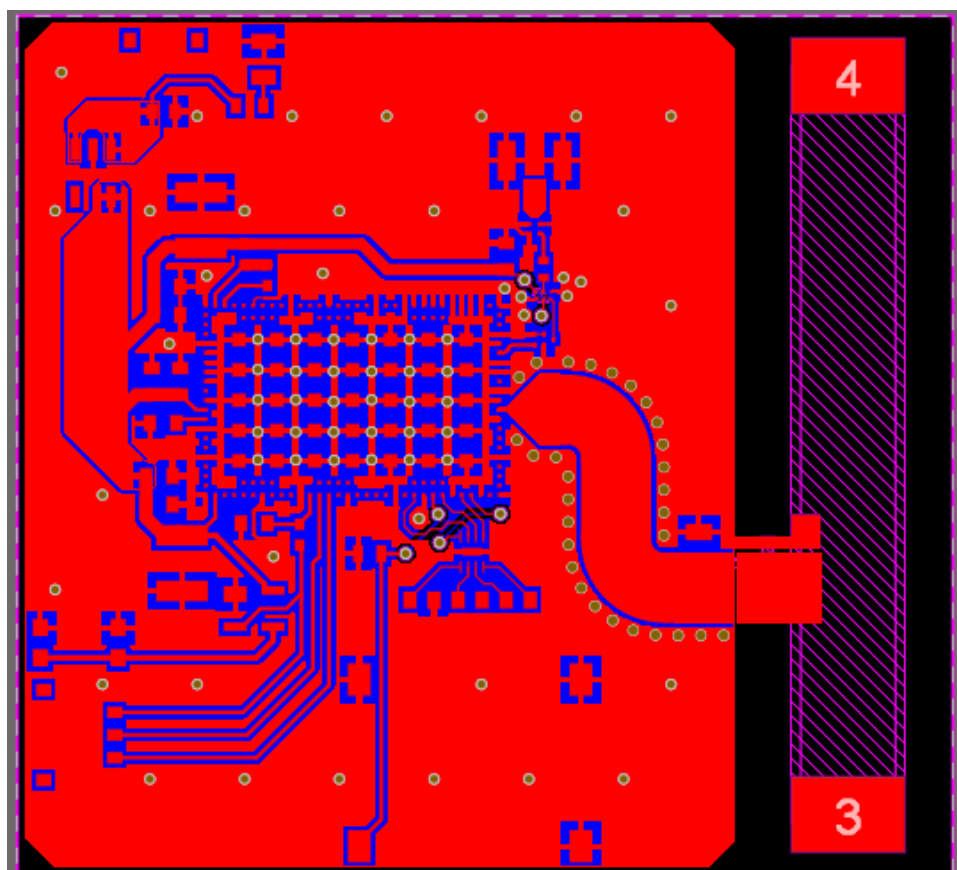
title(file_name_a_peek);
xlabel('Dažnis, GHz');
ylabel('S11, dB');

legend([p_a_peek1 p_a_peek2], {'S11', 'S11_{corr}'});

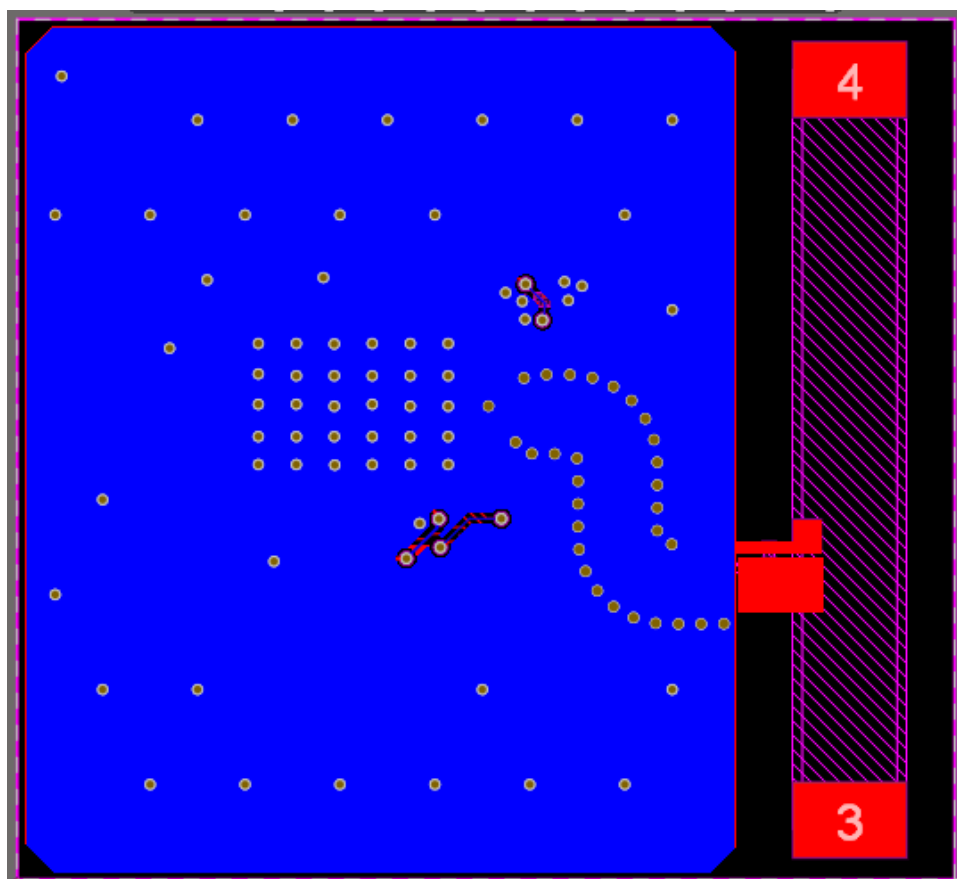
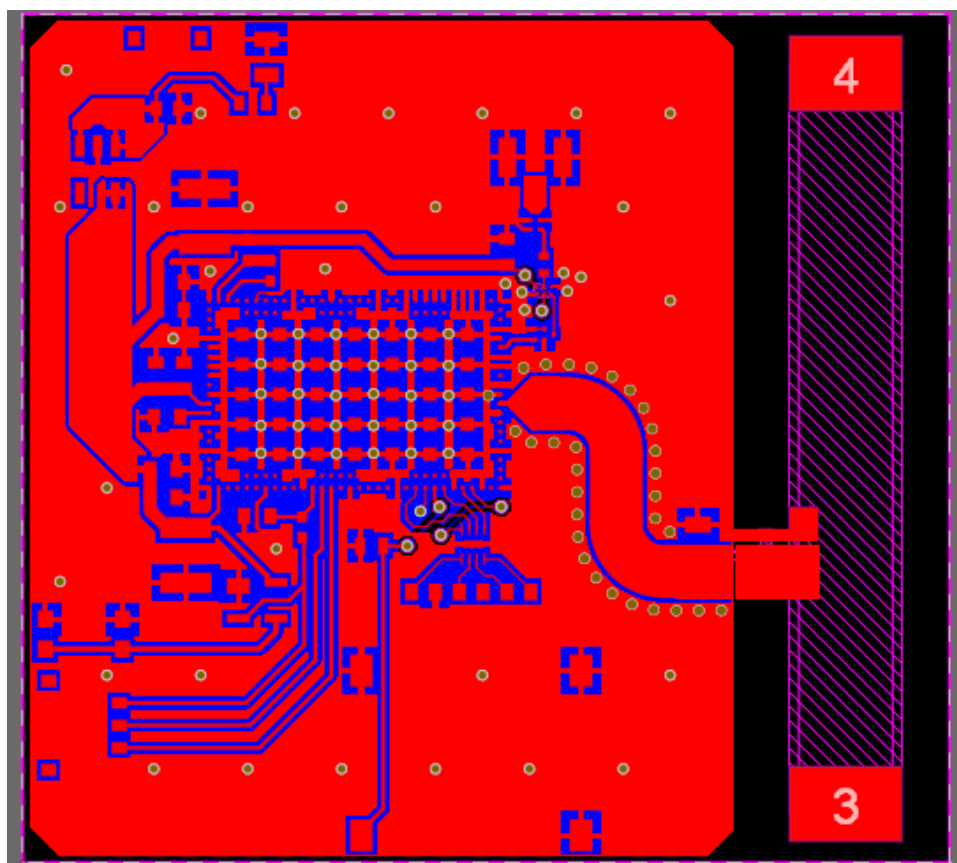
hold off
drawnow;
pause(5);
frame7 = getframe(fig7);
imwrite(frame7.cdata, [file_name_a_peek '.png']);

```

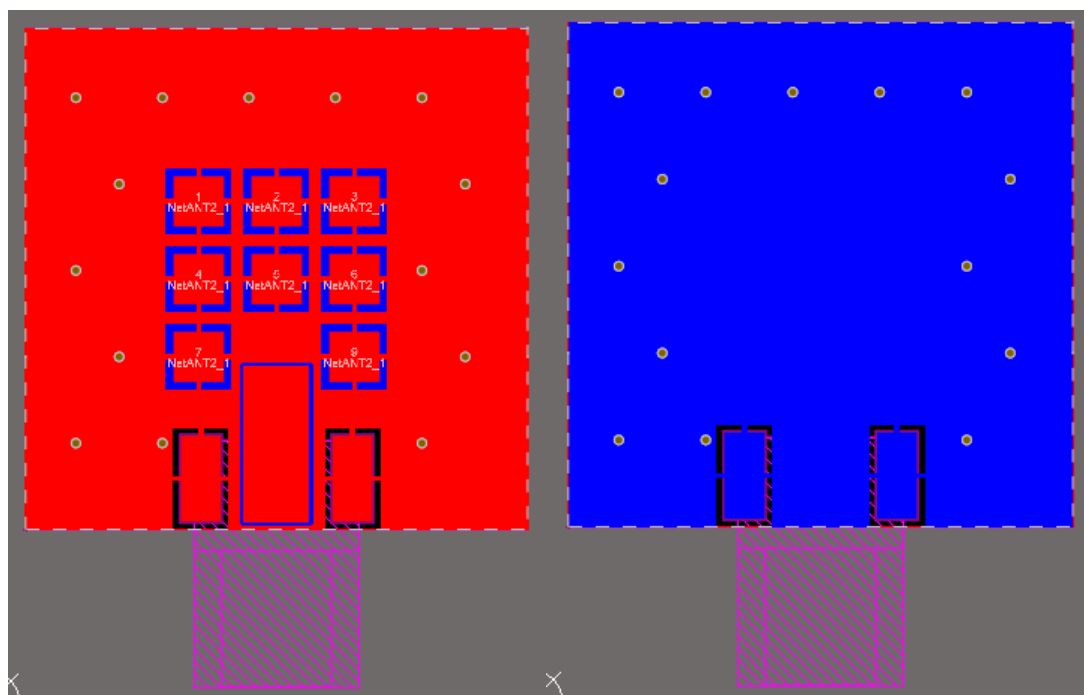
D priedas. GPS sekiklio spausdintinė plokštė nubraižyta PTFE plokštei.



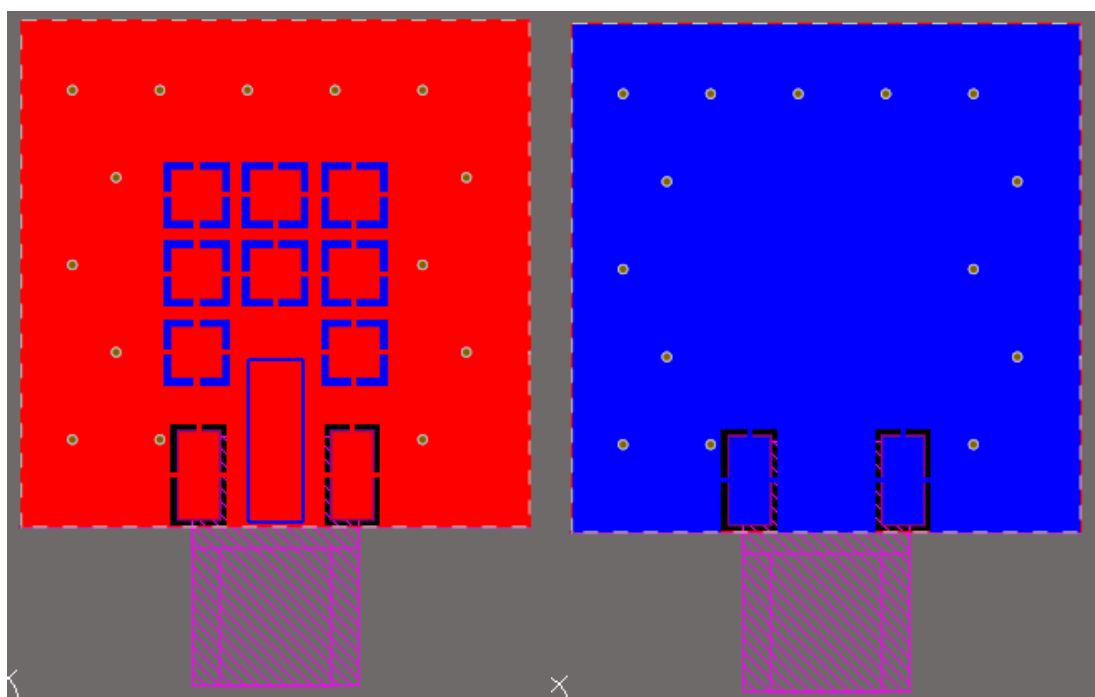
E priedas. GPS sekiklio spausdintinė plokštė nubraižyta PEEK plokštei.



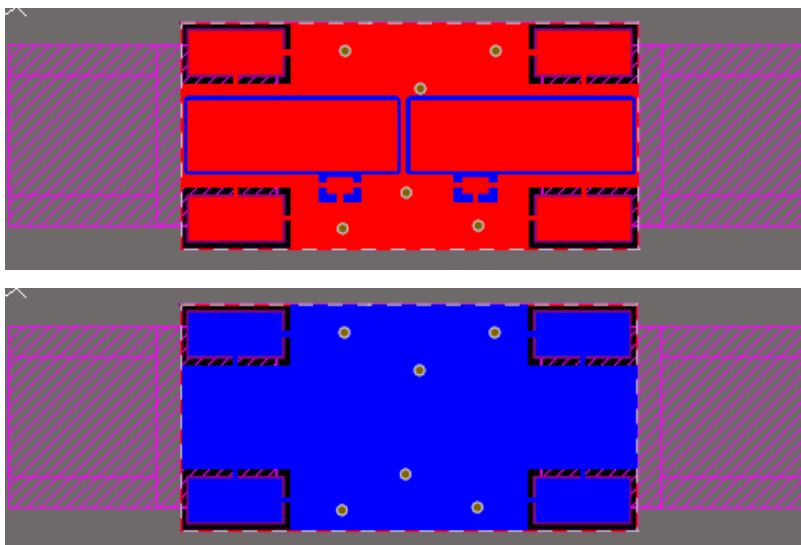
F priedas. GPS L1 antenos spausdintinė plokštė nubraižyta PTFE plokštei.



G priedas. GPS L1 antenos spausdintinė plokštė nubraižyta PEEK plokštei.



H priedas. GPS L1 antenos suderinimo grandinės spausdintinė plokštė nubraižyta PTFE plokštei.



I priedas. GPS L1 antenos suderinimo grandinės spausdintinė plokštė nubraižyta PEEK plokštei.

