

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IE40LT

Ragnar Pärnamäe 142692

# **X-DIAPASOONI RINGPOLARISEERITUD PLANAARANTENN**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp  
dotsent

Tallinn 2017

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Ragnar Pärnamäe

22.05.2017

## Annotatsioon

Töö eesmärgiks on X-diapasoonis kasutatava kitsaribalise planaarrantenni arvutamine ning selle disainimine TTÜ tudengisatelliidi pardal töötava saatja jaoks. Täpsemalt, antenni mõõtmete, kuju ja sisendi ühendamisviisi leidmine.

Antenni simuleerimine viiakse läbi kasutades MATLAB tarkvara. Antud tarkvara abil toimub antenni suunadiagrammi, polarisatsiooni, impedantsi ja saatjaga sobituse analüüsimine. Esmalt keskendutakse lineaarselt polariseeritud planaarrantenni disainimisele ning hiljem rakendatakse ringpolarisatsiooni saavutamiseks antennielemendi nurkade kärpimist.

Simuleeritud tulemuste põhjal tehakse valmis ka katsemudel trükkplaadi kujul, kasutades selleks CircuitMaker tarkvara. Antenni valmistamine toimub vastavas ettevõttes.

Töö tulemusena on jõutud simuleeritud tulemuseni, kus ringpolariseeritud planaarrantenni peegeldustegur on resonantssagedusel (10,475 GHz) -22 dB, maksimaalne võimendus 5,85 dBi ning aksiaalsuhe 1,5. Vastavalt leitud mõõtmetele on disainitud planaarrantenni PCB (*Printed circuit board*), mida saab tulevikus rakendada.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 32 leheküljel, 6 peatükki, 25 joonist.

## **Abstract**

### **Circularly Polarized Patch Antenna for X-band**

The goal of this thesis is to design and calculate the parameters of a narrow-band patch antenna for TUT satellite transmitter working in X-band. Specifically, finding the right measurements, exact shape and type of the connection feed.

The antenna simulation will be performed using MATLAB software. The software will be used for the analyses of the antenna's radiation pattern, polarization, impedance and input matching with the transmitter. The linearly polarized patch antenna design will be done first. Afterwards, circular polarization will be achieved by truncating corners of the patch.

Based on the results of the simulation an antenna prototype will be made as a printed circuit board, which will be designed using CircuitMaker software. The antenna will be manufactured in a corresponding company.

The goal of the completed work, an efficient circularly polarized patch antenna, was achieved with -22 dB return loss, 5.85 dBi gain and a 1.5 axial ratio at 10,475 GHz. In accordance with calculated measurements PCB design has been made, which can be implemented in the future.

The thesis is in Estonian and contains 32 pages of text, 6 chapters, 25 figures.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

EM	<i>Electro-magnetic</i> , elektromagnetiline
FEM	<i>Finite element method</i> , lõplike elementide meetod (inseneerias kasutatav hindamismeetod)
LHCP	<i>Left-handed circular polarization</i> , vasakukäeline ringpolarisatsioon
MoM	<i>Method of Moments</i> , momentide meetod (hindamismeetod)
PCB	<i>Printed circuit board</i> , trükkplaat
RHCP	<i>Right-handed circular polarization</i> , paremakäeline ringpolarisatsioon
SMP	<i>SubMiniature push-on</i> , miniatuurne konnektori tüüp, kus pistikud ühendatakse peale vajutades, mitte keermega
TM Mood	<i>Transverse magnetic mode</i> , transversaalne magnetiline mood (lainelevimise suunas magnetväli puudub)

## Sisukord

1 Sissejuhatus .....	9
2 Planaarantenni teoreetilised alused.....	11
2.1 Tööpõhimõte.....	11
2.2 Antennide parameetrid .....	13
2.2.1 Antenni kasutegur ( <i>efficiency</i> ).....	13
2.2.2 Suunategur ( <i>directivity</i> ) .....	13
2.2.3 Võimendus ( <i>gain</i> ).....	14
2.2.4 Suunadiagramm ( <i>radiation pattern</i> ).....	14
2.2.5 Impedants ( <i>input impedance</i> ) .....	15
2.2.6 Peegelduskadu ( <i>return loss</i> ) .....	15
2.2.7 Ribalaius ( <i>bandwidth</i> ) .....	16
2.2.8 Polarisatsioon ( <i>polarization</i> ) .....	16
2.3 Planaarantenni toiteviisid .....	18
3 Planaarantenni arvutamine/disainimine.....	21
3.1 Antenni mõõtmete arvutamine .....	22
3.2 Toitepunkti arvutamine.....	23
3.3 Ringpolarisatsiooni tekitamine planaarantenniga.....	25
3.3.1 Duaalne-ortogonaalne toide.....	26
3.3.2 Üksik-toide .....	26
4 Planaarantenni simulatsioon ja tulemused.....	28
4.1 Lineaarselt polariseeritud ristkülikukujuline planaarantenn.....	28
4.1.1 Planaarantenni simulatsiooni tulemused ja graafikud .....	29
4.2 Ringpolariseeritud ruudukujuline planaarantenn.....	33
4.2.1 Ringpolariseeritud planaarantenni simulatsiooni tulemused ja graafikud.....	34
5 PCB disain .....	39
5.1 Konnektor .....	39
5.2 Lineaarselt polariseeritud planaarantenni trükkplaat.....	39
5.3 Ringpolariseeritud planaarantenni trükkplaat.....	40
6 Kokkuvõte .....	41

Kasutatud kirjandus .....	42
Lisa 1 – Planaarantenni toiteviiside võrdlus.....	44
Lisa 2 – MATLAB skript toitepunkti arvutamiseks .....	45
Lisa 3 – MATLAB skript planaarantenni simuleerimiseks.....	46
Lisa 4 – MATLAB skript ringpolariseeritud planaarantenni simuleerimiseks .....	47

## Jooniste loetelu

Joonis 1. TTÜ nanosatelliidi planeeritav mudel.....	10
Joonis 2. Planaarantenni erinevad kujud [1].....	11
Joonis 3. Planaarantenni külgvaade.....	12
Joonis 4. Pinge (U), voolu (I) ja impedantsi (Z) jaotus piki resoneerivat plaati [14]..	12
Joonis 5. Suunadiagrammide esitusviisid: (a) polaarkoordinaadistikus, (b) ristkoordinaadistikus.....	14
Joonis 6. Soonliides-mikroriba toide [8]. ....	18
Joonis 7. Koaksiaalkaabel toide [8]. ....	19
Joonis 8. Apertuur-sidestusega toide [8]. ....	19
Joonis 9. Lähedus-sidestusega toide [8]. ....	20
Joonis 10. Ülekandeliini mudel [13]. ....	21
Joonis 11. Üksik-toite ja kärbitud nurkadega planaarantenn.....	27
Joonis 12. Planaarantenni element ja alusmaterjal (resoneeriv plaat on rohelise alusmaterjali peal).....	30
Joonis 13. Voolu jagunemine planaarantenni pinnal.....	30
Joonis 14. Planaarantenni impedantsi graafik. ....	31
Joonis 15. Planaarantenni peegeldustegur ( $S_{11}$ ).....	31
Joonis 16. Planaarantenni suunadiagramm.....	32
Joonis 17. Planaarantenni elektrivälja Co-Polarisatsioon .....	32
Joonis 18. Planaarantenni elektrivälja Cross-Polarisatsioon .....	33
Joonis 19. Ringpolariseeritud planaarantenni element ja alusmaterjal.....	35
Joonis 20. Voolu jagunemine ringpolariseeritud planaarantenni pinnal. ....	36
Joonis 21. Ringpolariseeritud planaarantenni impedantsi graafik.....	36
Joonis 22. Ringpolariseeritud planaarantenni peegeldustegur ( $S_{11}$ ). ....	37
Joonis 23. Ringpolariseeritud planaarantenni suunategur. ....	37
Joonis 24. Ringpolariseeritud planaarantenni elektrivälja Co-polarisatsioon. ....	38
Joonis 25. Ringpolariseeritud planaarantenni elektrivälja Cross-polarisatsioon.....	38



# 1 Sissejuhatus

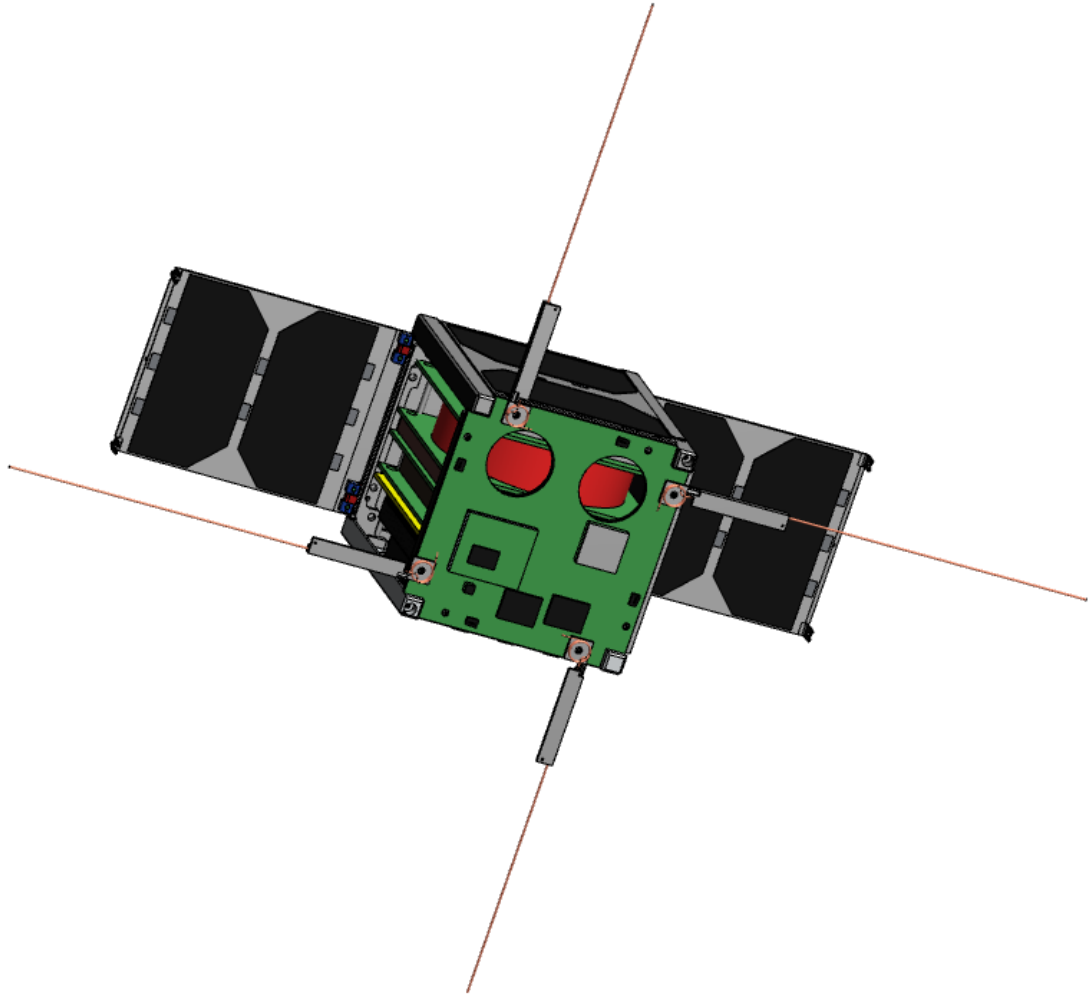
TTÜ innovatsiooni- ja ettevõtluskeskus Mektory Kosmosekeskus käivitas alates 2014. a. sügissemestrist pilootprojektina nanosatelliitide arendamisele suunatud programmi. Projekti eesmärgiks on lennutada orbiidile töökindel ja võimekas väikesatelliit [1].

Antud lõputöö keskendub TTÜ tudengisatelliidi pardal oleva saatja jaoks vajaliku prototüüp antenni väljatöötamisele. Antenn peaks töötama sagedusvahemikus 10,45 - 10,5 GHz (X-diapasoonis), mis ongi tegelikult raadioamatöör kosmosesideks ettenähtud sagedusvahemik. Antenni kaudu toimiks kiire raadiolink Maale, mille kaudu laetakse alla orbiidil tehtud fotosid.

Õhusõidukite, kosmosesõidukite, satelliitide, rakettide ja ka sideseadmete rakendustes, kus suurus, kaal, hind, jõudlus ja lihtne paigaldus on piiranguteks, on efektiivne kasutada madala profiiliga antenni. Madala profiili all peetakse silmas seda, et antenn on lapik, võtab ruumi ainult kahes mõõtmes (pikkus ja laius), mitte aga kolmandas (kõrgus). Just sellist tüüpi antenn on planaarrantenn (ingl. *patch antenna*) [2].

Planaarrantenn (samuti tuntud ka mikroriba antenni nime all) on teatud tüüpi raadioantenn, millel on madal profiil ja mida saab paigaldada tasasele pinnale. Neid on lihtne ja odav valmistada, kasutades kaasaegset trükkplaadi tehnoloogiat. Planaarrantenn koosneb lamedast vastava kujundiga metallplaadist (ingl. *patch*), mis on asetatud temast suurema alusplaadi kohale ehk maandusplaadile ning kahe plaadi vahel on dielektrik [6].

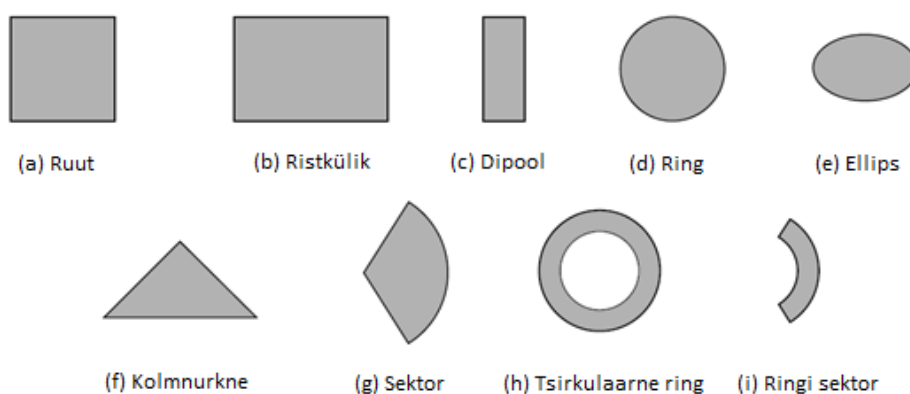
Käesolevas töös on kirjeldatud planaarrantenni teoreetilised alused, näidatud sammhaaval ära antenni arvutamise etapid ja arvutuste tulemustest saadud lõplik simuleeritud mudel. Lõpptulemusena on valmis tehtud ka trükkplaadi disain, mille alusel on võimalik antenn tulevikus realiseerida.



Joonis 1. TTÜ nanosatelliidi planeeritav mudel.

## 2 Planaarantenni teoreetilised alused

Planaarantennid ehk mikroriba antennid võivad olla väga erinevate kujudega. Kiirgavad tasandid võivad olla ringi, ruudu, ristküliku, kitsa dipooli, elliptilise või mõne muu kujuga [2]. Illustreerivad pildid on toodud joonisel 2.



Joonis 2. Planaarantenni erinevad kujud [3].

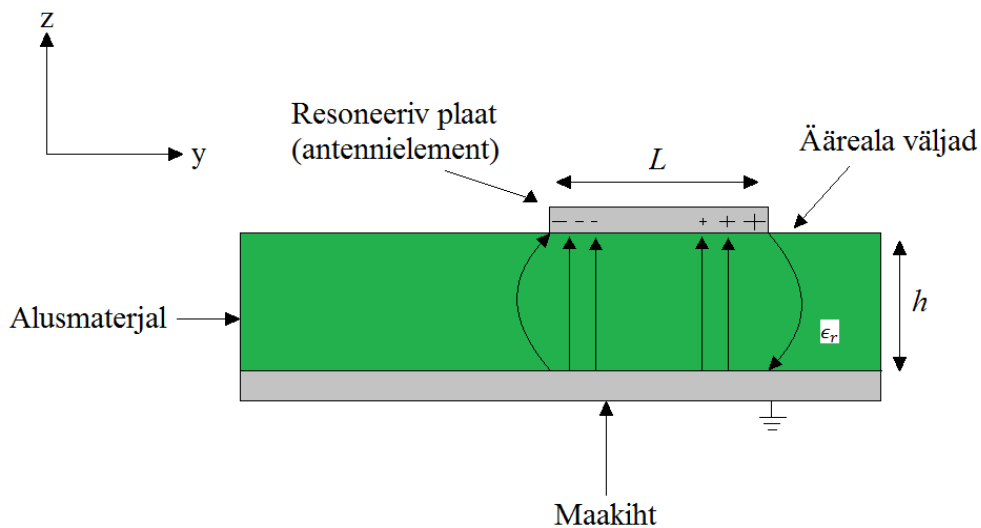
Ruudu-, ristküliku- ja ringikujulised planaarantennid on enim kasutatavad, sest nende analüüs ja valmistamine on lihtsamad [2].

### 2.1 Tööpõhimõte

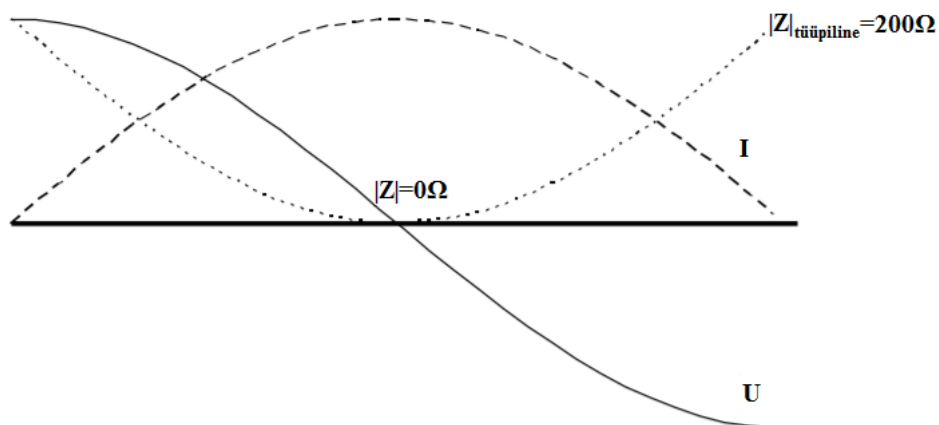
Maakihi kohal olev antennielement moodustab poole lainepikkusega ( $\lambda/2$ ) lainejuhi, mis toimib kiirgurina. Üheks levinuks planaarantenni mudeliks on lähenemine sellele, kui kahest kiirgavast pilust koosnevale süsteemile, kus piludeks on reaalse antenni servad. Kiirgus servadel mõjutab antenni käituma elektriliselt suuremana kui tema füüsilised dimensioonid. Seega, et antenn resoneeriks, kasutatakse mikroriba ülekandeliini, mis on natuke lühem kui pool lainepikkust kasutataval sagedusel [4].

Ääreala väljad ümber plaadi aitavad mõista, miks planaarantenn resoneerib. Järgnevalt on vaatluse all külgvaates planaarantenn. (Joonis 3)

Resoneerivat plaati saab vaadelda kui avatud vooluringiga ülekandeliini ning sel juhul on pinge peegeldustegur võrdne ühega. Juhul kui peegeldustegur on võrdne ühega, omavad vool ja pinge omavahel 90-kraadist faasinihet. Voolu väärtus on maksimaalne resoneeriva plaadi keskosas ja minimaalne plaadi servadel ning pinge on samal ajal maksimaalne plaadi servadel ning minimaalne keskkohas. (Joonis 4) Ääreala väljad on radiatsiooni põhjustajad. Tulenevalt sellest, et ääreala väljad on ülemise ehk resoneeriva plaadi juures suunatud  $+y$ -telje suunas, plaadi serval faasid liituvad ja panevad antenni kiirgama. Planaarantenni radiatsioon tuleneb ääreala väljadest, mis tekitavad tänu soodsale pinge jaotusele. Seega, erinevalt traatantennidest, kus on tegemist voolukiirguritega, on antud antenni puhul tegu pingekiirguriga [5].



Joonis 3. Planaarantenni külgvaade.



Joonis 4. Pinge (U), voolu (I) ja impedantsi ( $|Z|$ ) jaotus piki resoneerivat plaati [6].

## 2.2 Antennide parameetrid

Antenni füüsikaliste omaduste iseloomustamiseks on mitmeid parameetreid. Parameetrid aitavad hinnata antenni efektiivsust ning annavad ülevaate antenni sobivusest vastava kasutusala jaoks.

Järgnevalt on selgitatud erinevaid antennide parameetreid ning mõningate mõistete puhul on välja toodud ka definitsioonidest lähtuvad avaldised.

### 2.2.1 Antenni kasutegur (*efficiency*)

Antenni kasutegur näitab, kui suure hulga antennini jõudnud võimsusest  $P_0$  edastab antenn teisele keskkonnale. Teisiti öelduna – kasutegur näitab, kui suure hulga saateantennini jõudnud võimsusest kiirgab antenn vabasse ruumi [7].

$$e = \frac{P_r}{P_0},$$

kus  $P_0$  on saateantenni jõudnud elektriline võimsus ja  $P_r$  vabasse ruumi kiiratud elektromagnetkiirguse võimsus.

### 2.2.2 Suunategur (*directivity*)

Kõige elementaarsemat kiirgurit nimetatakse **isotroopseks kiirguriks**. Isotroopne kiirgur on ideaalne punktkiirgusallikas, mis kiirgab elektromagnetlained igas suunas võrdselt. Kõik teistsugused kiirgurid omavad teatud suunaomadusi – osades suundades kiiratakse rohkem energiat kui teistes. Järelikult on osades suundades kiirguse võimsustihedus suurem kui teistes. Suunateguriks nimetatakse suhet, mis näitab, mitu korda erineb niisuguse kiirguri tekitatud maksimaalne võimsustihedus  $\Pi_{max}$  isotroopse kiirguri võimsustihedusest  $\Pi_i$  ( $W/m^2$ ) [7].

$$D = \frac{\Pi_{max}}{\Pi_i}$$

Praktikas isotroopset kiirgurit tegelikult ei eksisteeri, tegemist on mõttelise konstruktsiooniga.

### 2.2.3 Võimendus (*gain*)

Antenni võimendus  $G$  on võrdne antenni suunateguri  $D$  ja kasuteguri  $e$  korrutisega:

$$G = D \cdot e$$

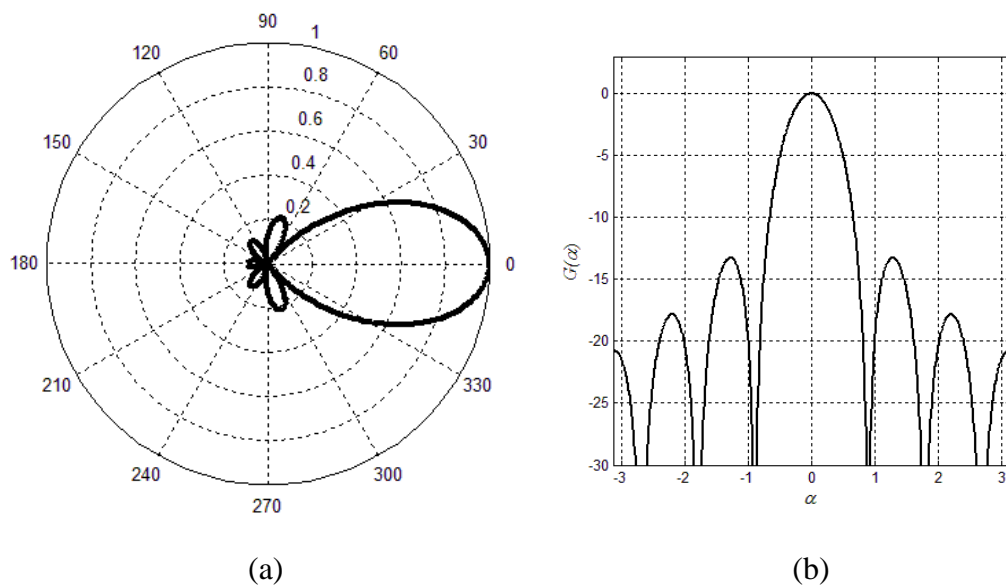
Võimsuse puhul on tegemist suhtelise suurusega ning üldjuhul esitatakse see detsibellides ( $dB$ ). Selleks, et näidata, et võimendust arvestatakse isotroopse kiirgaja suhtes, lisatakse juurde  $i$ -täht – saadakse lühend ***dBi*** [7].

Antenni võimendus  $G$  näitab võimendust suunas, kus ta on maksimaalne.

### 2.2.4 Suunadiagramm (*radiation pattern*)

Antenni suunadiagramm on graafiline kujutis, mis iseloomustab antenni kiirgusomadusi sõltuvalt suunast. Tavaliselt on suunadiagramm esitatud kolmemõõtmelisenä ja kujutab endast väljatugevuse või võimsustiheduse jaotust kiirgusallikast ühtlasel kaugusel [7].

Suunadiagramme võib esitada nii polaarkoordinaadistikus (Joonis 5).



Joonis 5. Suunadiagrammide esitusviisid: (a) polaarkoordinaadistikus, (b) ristkoordinaadistikus.

### 2.2.5 Impedants (*input impedance*)

Tegemist on komplekse suurusega  $Z$ , mis koosneb nii aktiiv- kui ka reaktiivosast ning sõltub sagedusest. Selleks, et antenn kiirgaks maksimaalse võimsusega, peab ta olema toiteahelaga sobitatud – antenni aktiivtakistus peab võrduma toiteahela aktiivtakistusega ning reaktiivtakistused peavad teineteist kompenseerima. Kui antenn on ehitatud tööks mingil kindlal sagedusel, siis üldjuhul on tema impedants sellel sagedusel puhtalt aktiivne. Täheleb, et imaginaarosa on null või reaalosaga võrreldes väga väike. Selle tõttu saab ka antenni toiteahel/koormus olema puhtalt aktiivse iseloomuga [7].

### 2.2.6 Peegelduskadu (*return loss*)

Peegelduskadu  $RL$  on defineeritud kui:

$$RL = 10 \log \left( \frac{P_i}{P_r} \right) = -20 \log(|\Gamma|),$$

kus  $P_i$  on antenni suunas kulgeva laine võimsus (ingl. *incident*) ja  $P_r$  on tagasipeegelduva laine võimsus. Mida vähem tagasi peegeldub, seda suurem on  $RL$  väärtus ja seda parem on võimsuse ülekanne.  $\Gamma$  on peegeldustegur, mis on defineeritud järgnevalt:

$$\Gamma = \frac{b}{a},$$

kus  $a$  on antenni suunas kulgev laine (näiteks pinge) ja  $b$  antennist tagasipeegelduv laine. Mõlemad suurused on üldjuhul kompleksed, ehk sisaldavad nii laine amplituudi, kui ka faasi.

**S-parameetrid** – antud parameetrid kirjeldavad elektrisüsteemide sisend-väljund suhet portide vahel, iseloomustavad signaali peegeldumist ja ülekannet. Kui süsteemil on 2 porti, siis parameeter  $S_{12}$  näitab võimsuse ülekannet portidest 1 porti 2 [8]. Kui on tegemist üksportiga, näiteks planaarentenni puhul, siis absoluutarvuliselt  $S_{11} = \Gamma$ , logaritmilisel kujul (detsibellides) oleks antud parameeter

$$S_{11} = 20 \log(|\Gamma|) = -RL.$$

Kui  $\Gamma = 0dB$ , siis peegeldub kogu antennile antav energia tagasi ja antenn ei kiirga midagi välja.

### 2.2.7 Ribalaius (*bandwidth*)

Antenni ribalaius  $BW$  kirjeldab sagedusvahemikku, kus antenn on võimeline efektiivselt kiirgama või energiat vastu võtma. Tihtipeale on ribalaius üheks määravaks faktoriks antenni valikul. Näiteks paljud antennitüübid on väga kitsa ribalaiusega ning ei suuda toimida lairiba apliksatsioonide korral [9].

Ribalaiust saab väljendada ka protsentuaalselt, antenni resonantssageduse alusel:

$$BW = 100 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_r},$$

kus  $f_H$  on kõrgeim ja  $f_L$  madalaim sagedus antud sagedusvahemikus ning  $f_r$  on resonantssagedus antud ribas [10]. Madalaim ja kõrgeim sagedus, millal antenn veel efektiivselt töötab, on hinnatav peegeldusteguri ( $S_{11}$ ) järgi. Optimaalseks peegelduskao piirjooneks peetakse -10 dB.

### 2.2.8 Polarisatsioon (*polarization*)

Polarisatsiooniks nimetatakse lainete võnketasandit kirjeldavat omadust. Lained, millel on kindel võnkumissuund, on polariseeritud lained. Selline omadus esineb ainult ristlainetel (lained, mille levimis- ja võnkumissuunad on erinevad) [11].

Antennide puhul on tegemist elektromagnetlainetega ning polarisatsiooni all mõistetakse elektromagnetilise laine elektrivälja vektori  $\vec{E}$  võnketasandit. Laine polarisatsioon on määratud antenni kujuga. Saab eristada kolme liiki polarisatsioone [7]:

- **Lineaarne polarisatsioon** – vertikaalselt või horisontaalselt polariseeritud antennid, kus elektrivälja vektori suund levimise käigus ei muutu. Vastuvõtu antenn peab olema sel juhul sama nurga all, mis saateantenn [7]. Horisontaalse polarisatsiooni korral on EM (*electro-magnetic*) laine elektrivälja vektor paralleelne maaga. Selline polarisatsioon saavutatakse siis kui antenn asetatakse maaga paralleelselt. Vertikaalse polarisatsiooni korral on EM laine elektrivälja



vektor maaga risti. Selline polarisatsioon saavutatakse siis kui antenn asetatakse maaga risti [12].

- **Tsirkulaarne ehk ringpolarisatsioon** – vektor pöörduv pidevalt ümber levimise suuna. Pöördumine võib toimuda nii ühes kui ka teises suunas, vasaku- ja paremakäeline polarisatsioon, LHCP (*Left-handed circular polarization*) ja RHCP (*Right-handed circular polarization*) [7]. Selline polariseerimisviis on sobilik just satelliidi rakenduste jaoks, et vältida pinnapeegeldusi ja satelliidi pöörlemisest tulenevaid efekte.
- **Elliptiline polarisatsioon** – sama, mis ringpolarisatsiooni puhul, aga siin vektori pikkus pöördumise käigus muutub [7]. Tegemist on valdava olukorraga, eelnevad kaks on selle erijuhud.

**Aksiaalne suhe (*axial ratio*)** – põhiliselt kasutusel ringpolarisatsiooni kirjeldamiseks. Antud parameeter näitab ortogonaalsete komponentide suhet elektriväljas. Ringpolariseeritud väli koosneb kahest ortogonaalsest elektrivälja komponendist, mis on võrdsete amplituudidega ning 90-kraadise faasinihkega. Kuna komponendid on võrdsete amplituudidega, siis aksiaalne suhe on 1 (või 0 dB). Ellipsi puhul on aksiaalne suhe suurem kui 1 (> 0 dB) ja puhtalt lineaarsel polarisatsioonil lõpmatu [13].

Praktikas on perfektse ringpolarisatsiooni saavutamine küllaltki keeruline ning üldiselt peetakse efektiivseks aksiaalsuhet, mis jääb alla 3dB (< 3 dB).

Aksiaalne suhe  $AR$  on kirjeldatav valemiga [14]:

$$AR = \frac{\text{primaartelg } (E_{max})}{\text{sekundaartelg } (E_{min})} = 20 \log [E_{max}/E_{min}]$$

**Samasihiline ja ortogonaalne polarisatsioon (*Co-and-Cross-polarization*)** – polarisatsiooni kvaliteeti saab väljendada ka samasihilise ja ortogonaalse polarisatsiooni suunadiagrammidega. Samasihiline suunadiagramm näitab antenni jaoks vajalikku ja ortogonaalne suunadiagramm mittevajalikku polarisatsiooni [6].

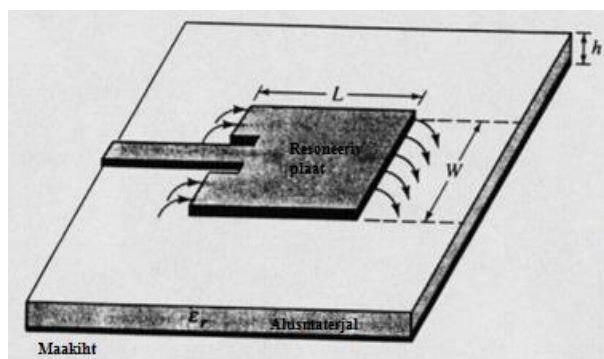
## 2.3 Planaarantenni toiteviisid

Toitmise all mõeldakse antenni ühendamist saatja või vastuvõtjaga raadio või juhtmevabas kommunikatsioonisüsteemis. Omavaheliseks ühenduseks kasutatakse üldjuhul spetsiaalseid kaableid ning sellist ühendust nimetatakse toiteliiniks. Toiteliinid kannavad edasi raadiosageduslikke pingeid ühest otspunktist teise. Igal toiteliinil on oma karakteristik impedants, mis tuleb efektiivse ülekande jaoks sobitada. Kui sobitus ei ole piisavalt hea, peegeldub raadiosignaal kas osaliselt või täielikult tagasi [15].

Toitemetodi valikule tuleb planaarantenni disainides olulist rõhku panna, sest see mõjutab nii antenni impedantsi, polarisatsiooni kui ka antenni efektiivsust [16]. Samuti on määravaks valmistamise lihtsus ja kompaktsus. Tulenevalt mikroriba disainist võib toiteviisid liigitada kaheks: kontaktiga ja kontaktivabad. Järgnevalt on toodud välja erinevate toiteviiside positiivsed ja negatiivsed küljed.

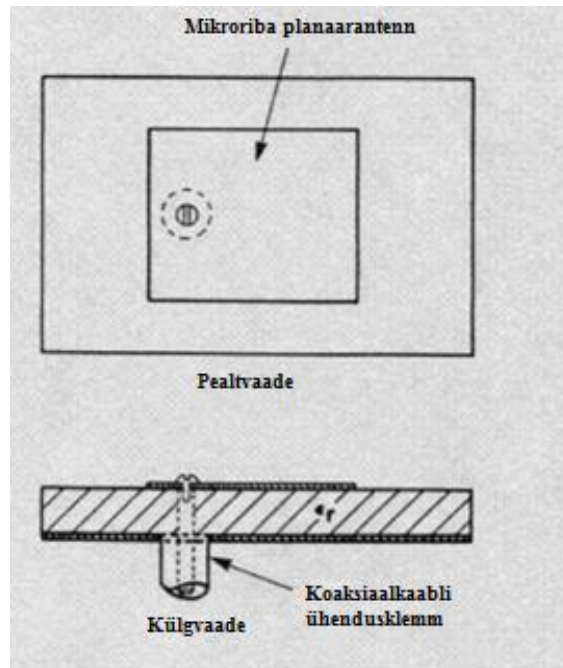
Eristatakse nelja põhilist toitemetodit:

- 1.) **Mikroriba toide** (Joonis 6) – lihtne valmistada, kergem sobitada võrreldes teiste meetoditega (kontrollides sisselõike asukohta või kasutades veerandlainne trafot), küllaltki lihtne modelleerida. Kuid alusmaterjali paksuse kasvades pinnalained ja parasiitkiirgus suurenevad [17].



Joonis 6. Soonliides-mikroriba toide [8].

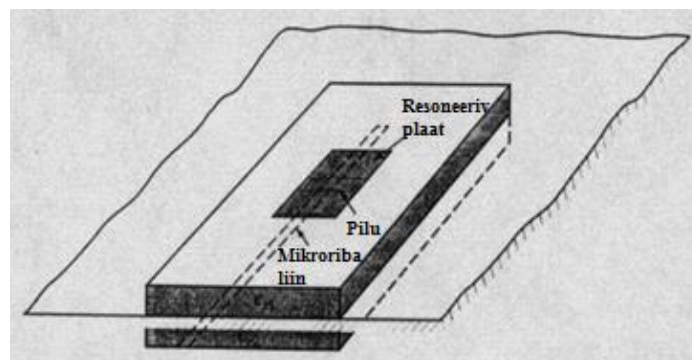
- 2.) **Koaksiaalkaabel toide** (Joonis 7) – lihtne valmistada, madalad parasiitkiirgused; raske täpselt modelleerida, väike ribaläius impedantsi sobitusel [17].



Joonis 7. Koaksiaalkaabel toide [8].

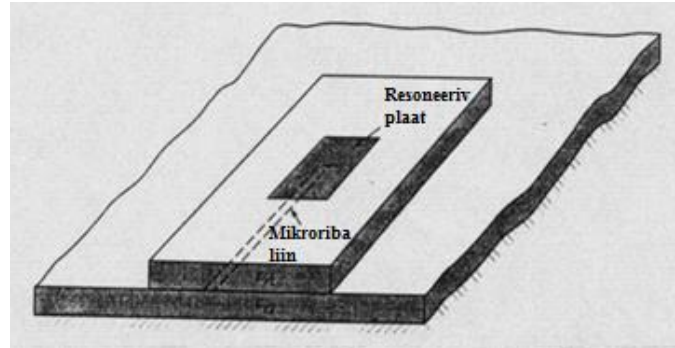
Antud meetodiga on vaja valida lihtsalt selline toitepunkt, kus impedants on  $50 \Omega$ , sel juhul saab kasutada  $50 \Omega$  N-tüüpi konektoriga koaksiaalkaablit. Koaksiaalkaabli konektor ehk ühendusklemm kinnitatakse planaarrantenni tagumisele küljele (maaplaadile) ja konektori keskelt tuleb läbi plaadi kihtide läbiviik, mis joodetakse antennielemendile [18].

- 3.) **Apertuur-sidestusega toide (kontaktivaba)** (Joonis 8) – mikroriba toiteliin ja kiirgav plaat on mõlemal pool maandusplaati, apertuur ehk kiirgust läbilaskev ava on maandusplaadis. Madal parasiitkiirgus, lihtne modelleerida; raske sobitada, väike ribalaius [17].



Joonis 8. Apertuur-sidestusega toide [8].

- 4.) **Lähedus-sidestusega toide (kontaktivaba)** (Joonis 9) – mikroriba toiteliin ja kiirgav plaat on mõlemad ühel pool maandusplaati. Suurima ribalaiusega (kuni 13%), küllaltki lihtne modelleerida, madal parasiitkiirgus [17].



Joonis 9. Lähedus-sidestusega toide [8].

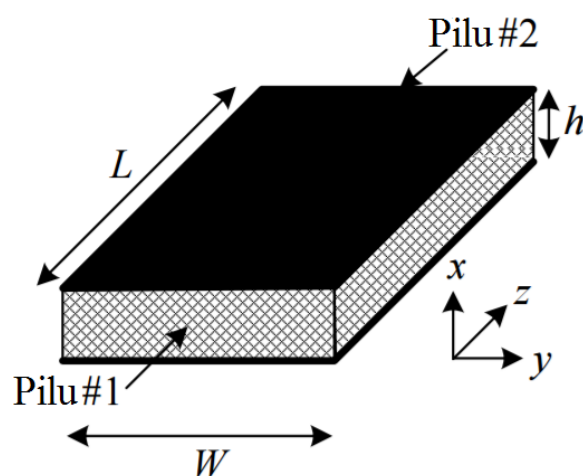
Lisaks eelnevale neljale põhilisemale toiteviisile on olemas ka vähemlevinud meetodid, nagu eelnevalt mainitud, on igal meetodil omad plussid ja miinused. Erinevate toiteviiside võrdlus on detailsemalt välja toodud töö lõpus olevas tabelis (Lisa 1).

### 3 Planaarantenni arvutamine/disainimine

Antud antenn on mõeldud töötama sagedusdiapasoonis  $10,45 - 10,50 \text{ GHz}$ . See tähendab, et resonantssagedus võiks olla nende vahel  $f_r = 10,475 \text{ GHz}$ . Alusmaterjalina (substraadina) on kasutusel Arlon 25FR, mille dielektriline konstant on  $\epsilon_r = 3,58$  [19]. Dielektriku paksus/kõrgus on  $h = 0,3048 \text{ mm}$ . Teades antud väärtusi saab leida antenni laiuse ja pikkuse.

Planaarantenni disainimiseks on kolm põhilist mudelit:

- 1.) **Ülekandeliini mudel** (*Transmission line model*) – ÜL mudeli puhul on tegemist kõige lihtsama mudeliga, kus ristküliku kujulist antennielementi käsitletakse kui maaga paralleelset ülekandeliini, mis seob kahte kiirgavat pilu (apertuuri) plaadi otstel (Joonis 10) [20].



Joonis 10. Ülekandeliini mudel [20].

ÜL mudel pole küll kõige täpsem ega ka mitmekülgsem, aga siiski annab see küllaltki hea füüsilise ülevaate planaarantennist ja selle elektriväljadest [20].

- 2.) **Õõnsuse mudel** (*Cavity model*) – õõnsuse mudel on ÜL mudeliga võrreldes täpsem, aga samuti keerukam ning nõuab palju keerulisemaid arvutusi [2].

- 3.) **Täislaine mudel** (*Full-wave model*) – õigesti rakendades on täislaine mudel väga täpne, mitmekülgne ning sobib igasuguste antennikujude analüüsimiseks. Tegemist on väga komplekse mudeliga, see tähendab seda, et nõuab väga mahukaid integraalarvutusi MoM (*Method of Moments*) või FEM (*Finite element method*) ning üldjuhul rakendatakse sellist analüüsimist arvutiprogrammide abil [2].

### 3.1 Antenni mõõtmete arvutamine

Käesolevas töös on kasutatud ristkülikukujulise planaarentenni esmaseks arvutamiseks ülekandeliini mudelit. ÜL mudel on valitud just tema lihtsamate arvutuste poolest, et saada esialgsed mõõdud edaspidiseks disainiks. Täpsem analüüs, täislaine mudeli alusel, toimub juba arvutiprogrammi MATLAB abil, kus rakendatakse tulemuste hindamiseks momentide meetodit (MoM).

Järgnevalt on kirjeldatud ristkülikukujulise planaarentenni disainimine/arvutamine:

1. Kasuliku kiirguse tagamiseks, leitakse antenni laius  $W$  järgneva valemi abil [2]:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

kus  $c$  – valguse kiirus vaakumis,  $\mu_0$  – dielektriku magnetiline läbitavus ja

$\epsilon_0$  – (dielektriku) dielektriline konstant vabas õhus.

2. Arvutatakse välja efektiivne dielektriline konstant [2]:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

3. Leitakse pikkuse laiendus järgneva avaldise abil [2]:

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

4. Tegelik antenni pikkus  $L$  on leitav nüüd [2]:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L; \quad L = \frac{\lambda}{2} - 2\Delta L, \quad (4)$$

$$\text{kus lainepikkus } \lambda = \frac{c}{f_r} \quad (5)$$

Rakendades antud valemeid:

1. Antenni optimaalne laius on:

$$W = \frac{299\,792\,458}{2 \cdot 10,475 \cdot 10^9} \sqrt{\frac{2}{3,58 + 1}} = 9,4563 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,946 \text{ cm}$$

2. Efektiivne dielektriline konstant:

$$\epsilon_{reff} = \frac{3,58 + 1}{2} + \frac{3,58 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{3,048 \cdot 10^{-4}}{9,4563 \cdot 10^{-3}} \right]^{-\frac{1}{2}} = 3,3854$$

3. Pikkuse laiendus:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 3,048 \cdot 10^{-4} \cdot 0,412 \frac{(3,3854 + 0,3) \left( \frac{9,4563 \cdot 10^{-3}}{3,048 \cdot 10^{-4}} + 0,264 \right)}{(3,3854 - 0,258) \left( \frac{9,4563 \cdot 10^{-3}}{3,048 \cdot 10^{-4}} + 0,8 \right)} \\ &= 1,4549 \cdot 10^{-4} = 0,015 \text{ cm} \end{aligned}$$

4. Tegelik antenni pikkus:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\lambda}{2} - 2\Delta L = \frac{299\,792\,458}{2 \cdot (10,475 \cdot 10^9) \sqrt{3,3854}} - 2 \cdot 1,4549 \cdot 10^{-4} \\ &= 7,4864 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,749 \text{ cm} \end{aligned}$$

Lõplik efektiivne pikkus:

$$L_{eff} = L + 2\Delta L = 0,778 \text{ cm}$$

### 3.2 Toitepunkti arvutamine

Antud planaarrantenni toiteviisiks on valitud koaksiaalkaabliga toide, sest meetod on lihtsasti realiseeritav ning antenni kinnitamiseks satelliidile tundus mõistlik jätta konnektor antenni tagaküljele.

Toitepunktis leidmiseks kasutatakse järgnevaid valemeid:

1. Leitakse ühe kiirgava pilu juhtivus  $G_1$  [2]:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2}, \quad (6)$$

$$\text{kus } I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta = -2 + \cos(X) + X S_i(X) + \frac{\sin(X)}{X} \quad (6a)$$

$$X = k_0 W; \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (6b)$$

$I$  – voolutugevus ja  $k_0$  – lainenumber

2. Arvutatakse kahe pilu elektri- ja magnetvälja sõltuvusest tingitud vastastikune juhtivus  $G_{12}$  [2]:

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta, \quad (7)$$

kus  $J_0$  on esimest tüüpi 0-ndat järku Besseli funktsioon.

3. Arvutatakse sisendtakistus  $R_{in}$  [2]:

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (8)$$

4. Leitakse toitepunkti asukoht [2]:

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right), \quad (9)$$

kus  $y_0$  – toitepunkti asukoht,  $R_{in}(y = y_0)$  – impedants toitekohas,

$R_{in}(y = 0)$  – impedants juhtivas pilus,  $L$  – kiirgava tasandi pikkus.



Rakendades antud valemeid:

1. Voolutugevus on:

$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{219,54 \cdot 0,00946}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta = 1,0518 \text{ A}$$

2. Ühe kiirgava pilu juhtivus:

$$G_1 = \frac{1,0518}{120\pi^2} = 8,88 \cdot 10^{-4} \text{ S (siimens)}$$

3. Kahe pilu elektri- ja magnetvälja sõltuvusest tingitud vastastikune juhtivus:

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{219,54 \cdot 0,00946}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(219,54 \cdot 0,00749 \cdot \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta = 4,975 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

4. Sisendtakistus:

$$R_{in} = \frac{1}{2 \cdot (8,88 \cdot 10^{-4} + 4,975 \cdot 10^{-4})} = \frac{1}{2 \cdot 0,0014} = 357,14 \Omega$$

5. Toitepunkti asukoht on nüüd leitav:

$$50 = \frac{1}{2 \cdot 0,0014} \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right)$$

$$y_0 = \left( \frac{L}{\pi} \right) \cdot \arccos \sqrt{2 \cdot 50 \cdot 0,0014} = 0,0028342 \text{ m} = 0,283 \text{ cm}$$

Toitepunkti arvutamiseks on loodud Matlabi skript (Lisa 2), kus sisestatud parameetrite alusel sooritatakse eelnevad arvutused ja toitepunkti asukoht kuvatakse ekraanile.

### 3.3 Ringpolarisatsiooni tekitamine planaarrantenniga

Ringpolarisatsioon on saavutatav kui kahte ortogonaalset TM moodi (*Transverse magnetic mode*), täpsemalt  $TM_{010}^x$ ,  $TM_{001}^x$ , ergastatakse nii, et nende vahele tekib 90-kraadine faasinihe. See saavutatakse kohandades antennielemendi füüsilisi mõõtmeid ning kasutades vähemalt ühte, kahte või rohkemat toidet. Üldjuhul ruudukujulise antennielemendi ringpolarisatsiooni tekitamiseks on kõige lihtsam viis toita elementi tema külgnevatel servadel [2].

Toiteviisidest lähtuvalt saab eristada erinevaid meetodeid:

### 3.3.1 Duaalne-ortogonaalne toide

Üks põhilisemaid ja otsemaid viise ringpolarisatsiooni tekitamiseks on kasutada duaalse-toite meetodit. Kaks ortogonaalset moodi, mis on vajalikud ringpolarisatsiooni genereerimiseks, ergastatakse üheaegselt, kasutades kahte toidet antennielemendi suhtes ortogonaalsetel asukohtadel [16].

Antenni disainides tuleb valida õiged toitepunktid või kasutada transformaatoreid, et tagada sobitus antenni ja saatja vahel. Alternatiivseks meetodiks on kasutada võimsuse jaotureid, mis tagavad vajaliku amplituudi ja faasi häälestuse [16].

Mõningad nendest jaoturitest (ingl. *splitter*), mis jagavad signaali eri osadeks, on järgnevad [16]:

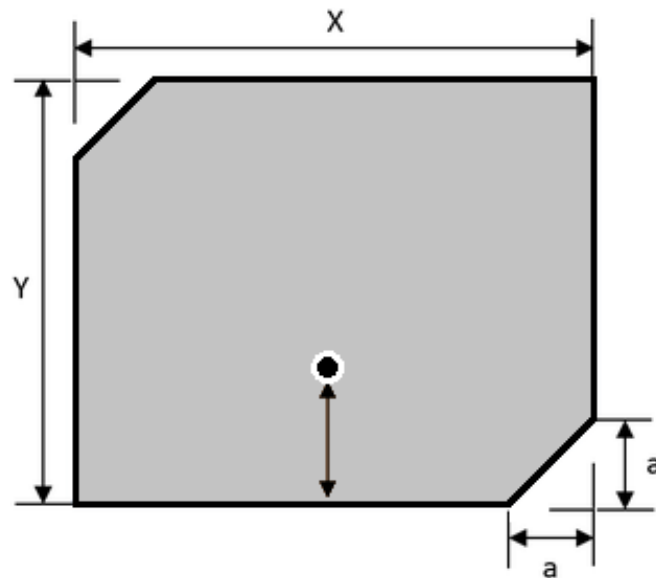
- 180-kraadine hübriid
- Wilkinsoni sild
- T-hargmik
- Kvadratuurne hübriidsild

Duaalne toide tagab küll laiema aksiaalsuhte ( $< 3\text{dB}$ ) ribalaiuse, kuid võrreldes alljärgneva meetodiga, on selle disainimine üsnagi komplitseeritud.

### 3.3.2 Üksik-toide

Antud toidet võib pidada üheks lihtsamaks ringpolarisatsiooni tekitamise viisiks. Üksik-toide tuleb kasuks situatsioonides, kus ruuminappus ei võimalda duaalse-ortogonaalse toite kasutamist. Sellist toiteviisi on küll kõige odavam ja kergem realiseerida, aga miinuseks on see, et aksiaalsuhte ribalaius on väga kitsas, mis teeb suurepärase ringpolarisatsiooni saavutamise äärmiselt raskeks või isegi võimatuks. Üksik-toide tekitab üldjuhul lineaarse polarisatsiooni, aga vastavate meetmetega on võimalik saavutada ka ringpolarisatsioon [16].

Ringpolarisatsiooni on võimalik saavutada sümmeetriliste häiritus-elementide abil, lisades need antennielemendi piirjoonele [16]. Üheks selliseks meetodiks on antennielemendi nurkade kärpimine, mis on illustreeritud alljärgnevalt (Joonis 11).



Joonis 11. Üksik-toite ja kärbitud nurkadega planaarrantenn.

## 4 Planaarantenni simulatsioon ja tulemused

Simuleerimine viidi läbi kasutades MATLAB-is antennide disainimeks mõeldud tööriistakasti, planaarantenni analüüs toimus MATLAB funktsioonide abil, mis sisestati skripti (Lisa 3). Esiolgu jäeti kõrvale ringpolarisatsiooni osa ning keskenduti lineaarselt polariseeritud ristkülikukujulise planaarantennile. Hiljem prooviti kärbitud nurkade meetodil saavutada ka ringpolarisatsiooni, selleks tuli teha eraldi skript (Lisa 4), kus antenni käsitleti kui konkreetset kolmekihilist trükkplaati. Olgu mainitud, et eelnevalt arvutatuid tulemusi tuli simuleerimise käigus veidi muuta, sest ÜL mudeli valemeid rakendades saadakse kõigest ligikaudsed väärtused.

### 4.1 Lineaarselt polariseeritud ristkülikukujuline planaarantenn

Järgnevalt on välja toodud planaarantenni disaini parameetrid. Simulatsiooni esmasteks lähteandmeteks on võetud alapeatükkides 3.1 ja 3.2 leitud antenni parameetrid. Vajalikud mõõtmete nihutamised on märgitud nooltega.

Esmased lähteandmed olid:

1. Pikkus ( $L$ ) = 0,749 cm  $\rightarrow$  0,706 cm
2. Laius ( $W$ ) = 0,946 cm
3. Kõrgus ( $h$ ) = 0,3048 mm
4. Dielektrik = Arlon 25FR ( $\epsilon_r = 3,58$ , kaonurga tangens  $\delta = 0,0035$ )
5. Maakihi pikkus = 1 cm
6. Maakihi laius = 1 cm
7. Toitepunkti asukoht ( $y_0$ ) = 0,283 cm  $\rightarrow$  0,15 cm

Simuleerimise tulemusel selgus, et antenn resoneeris soovitava 10,475 GHz asemel hoopis 9,85 GHz juures ning impedants oli 130  $\Omega$ . Sellest võis järeldada, et antenni

pikkus oli liiga suur ja toitepunkt äärele liiga lähedal. Nihutades toitepunkti rohkem keskpunkti suunas, saab leida vajaliku impedantsi ( $50 \Omega$ ) ning vähendades pikkust, saab resonantssagedust ülespoole nihutada. Alternatiivseks lahenduseks oleks olnud maaplaadi vähemalt kolmekordne suurendamine, mis ei oleks mõistlik, sest võtaks liiga palju ruumi. Järgnevalt leiti optimaalne antenni pikkus ja uus toitepunkti asukoht katse-eksituse meetodil. Osutus, et sobilik antenni pikkus ( $L$ ) on 0,706 cm, selleks et resonantssagedus ( $f_r$ ) oleks 10,475 GHz ning toitepunkti asukohaks määrati 0,15 cm keskpunktist.

#### 4.1.1 Planaarantenni simulatsiooni tulemused ja graafikud

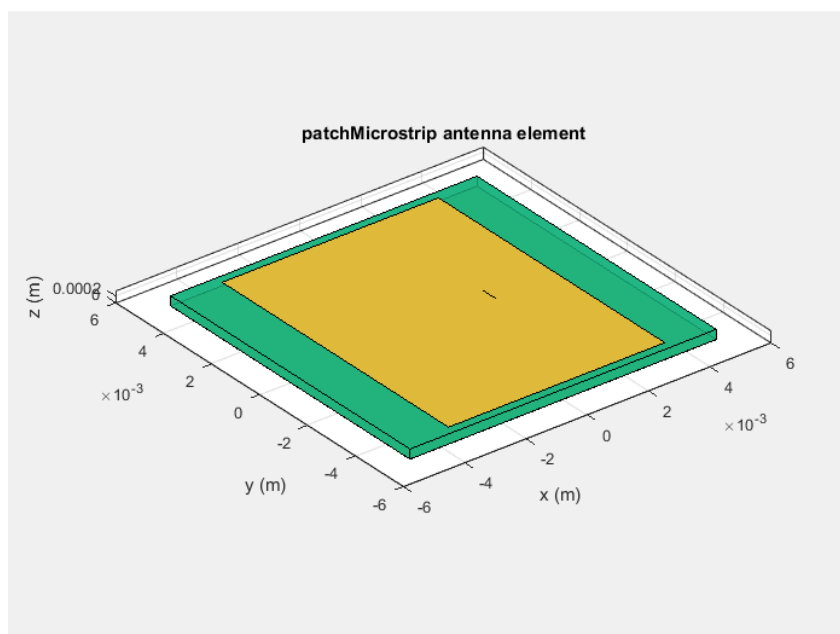
Simuleeritud planaarantenni antennielement on disainitud ristkülikukujuline, maaplaadiks on ruut, mille peal on alusmaterjali kiht ning toitepunkti tähistab peenike must joon (Joonis 12). Voolutihedus on suurim pikkusega määratud külgedel ( $y$ -telje otspunktid) ning toitepunkti juures (Joonis 13).

Impedantsi graafikult (Joonis 14) on näha, et reaalosa on 10,475 GHz juures  $50 \Omega$  ja imaginaarosa  $0 \Omega$ . Tähendab, et antenn resoneerib õigel sagedusel ja antenni impedants on võrdne koaksiaalkaabli impedantsiga, milleks on  $50 \Omega$ .

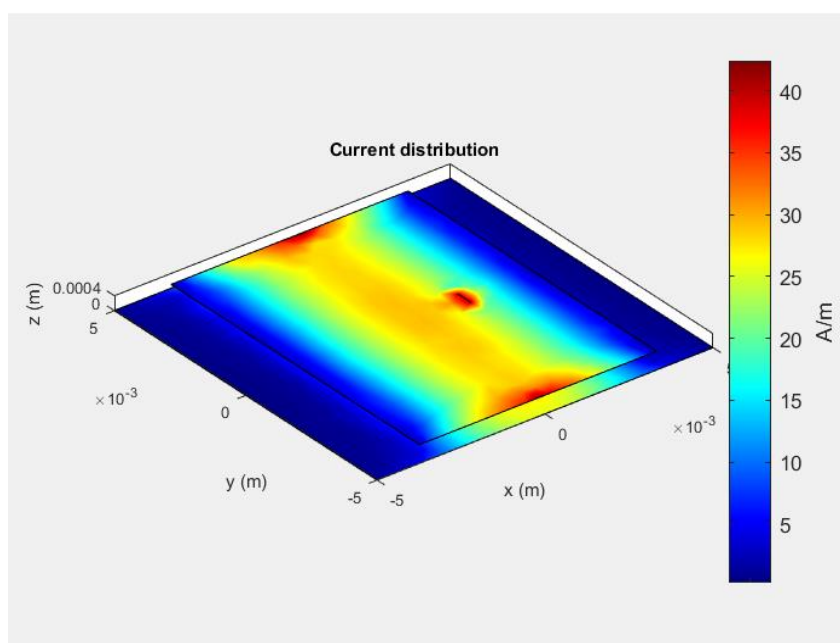
Peegeldusteguri ( $S_{11}$ ) graafikult (Joonis 15) on näha, et 10,475 GHz juures on peegeldustegur  $-27,5$  dB. Peegeldusteguri puhul on olemas  $-10$ dB kriteerium. Kriteerium ütleb, et ainult 10% antenni suunas kulgeva laine võimsusest peegeldatakse tagasi ning 90% jõuab antennini. Üldjuhul peab efektiivse antenni disainimiseks jääma peegeldustegur töösagedusel sellest ( $-10$ dB piirist) allapoole. Jooniselt on näha, et  $\Gamma$  jääb kogu kasutatava ribalaiuse ( $10,45 - 10,55$  GHz) ulatuses allapoole  $-10$ dB, mis on väga hea tulemus.

Ruumilise suunadiagrammi joonise (Joonis 16) vasakul üleval nurgas on näha ka antenni võimendusi resonantsagedusel, maksimaalseks võimenduseks on antud juhul  $5,65$  dBi. Arvestades kasutatava alusmaterjali dielektrilist läbitavust on see üsnagi oodatav tulemus.

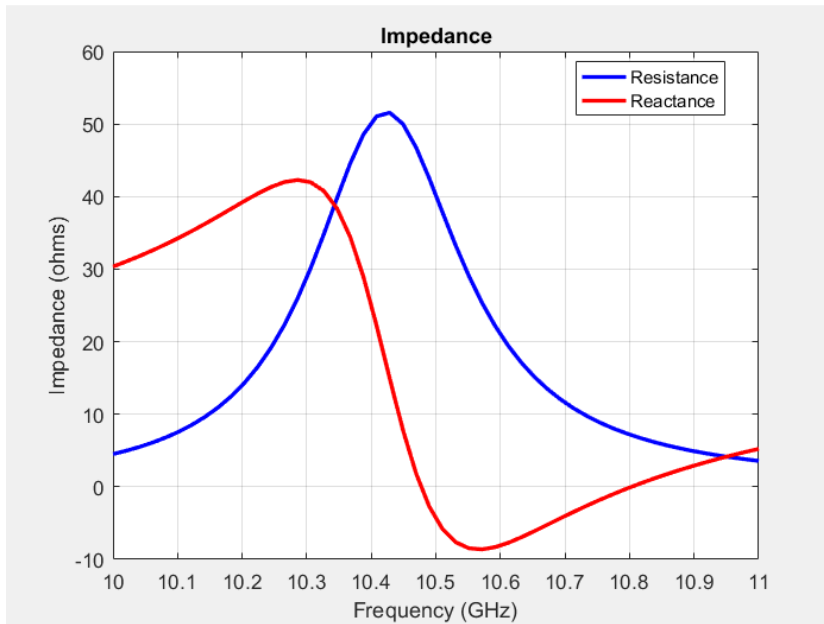
Elektrivälja polarisatsiooni graafikutelt (Joonis 17 ja Joonis 18) on näha, et samasihilise ja ortogonaalse polarisatsiooni võimenduste erinevused on ligi 50 dB, tähendab et ortogonaalse polarisatsiooni võimendus on  $10^5$  korda nõrgem. Sellest võib järeldada, et antenn on lineaarselt polariseeritud, ehk elektrivälja võngub ainult ühes tasapinnas.



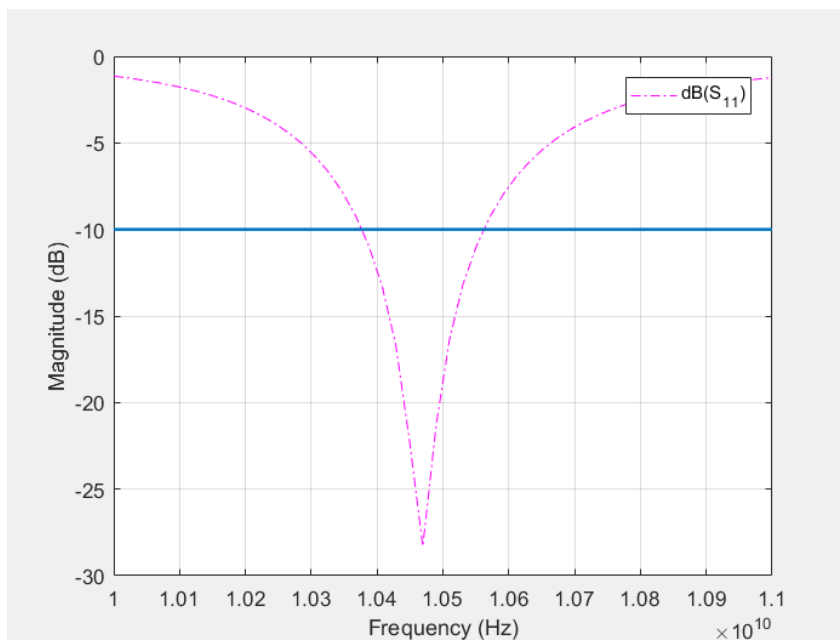
Joonis 12. Planaarantenni element ja alusmaterjal (resoneeriv plaat on rohelise alusmaterjali peal).



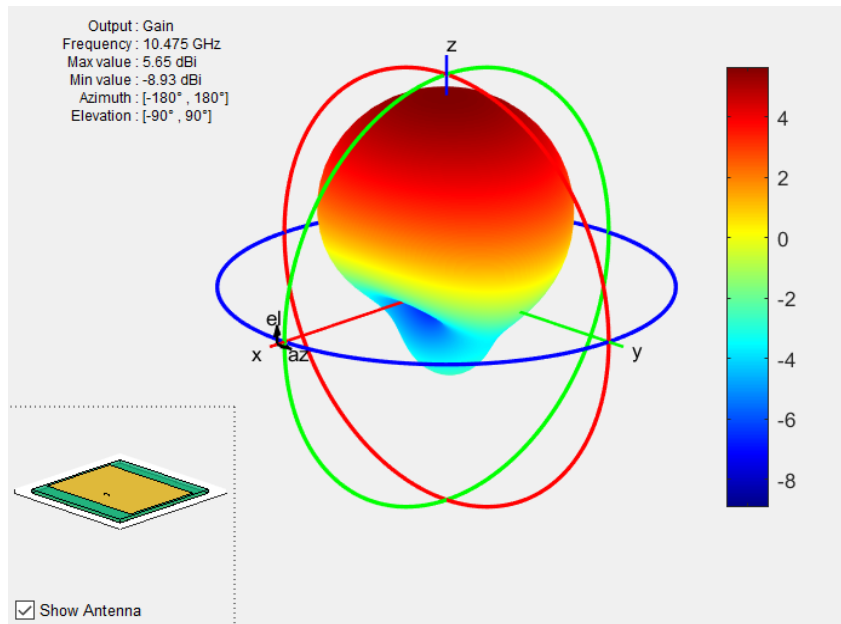
Joonis 13. Voolu jaotus planaarantenni pinnal.



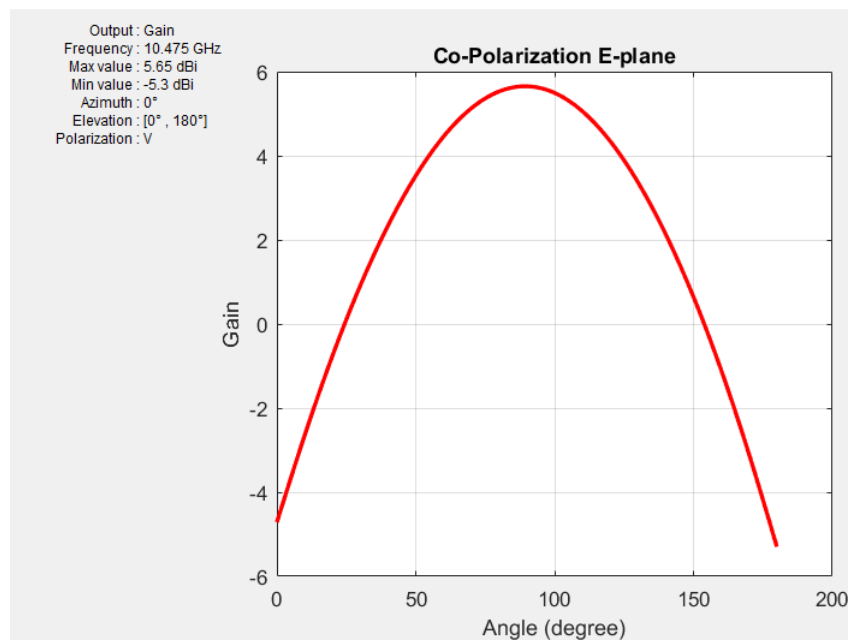
Joonis 14. Planaarantenni impedantsi graafik.



Joonis 15. Planaarantenni peegeldustegur ( $S_{11}$ ).

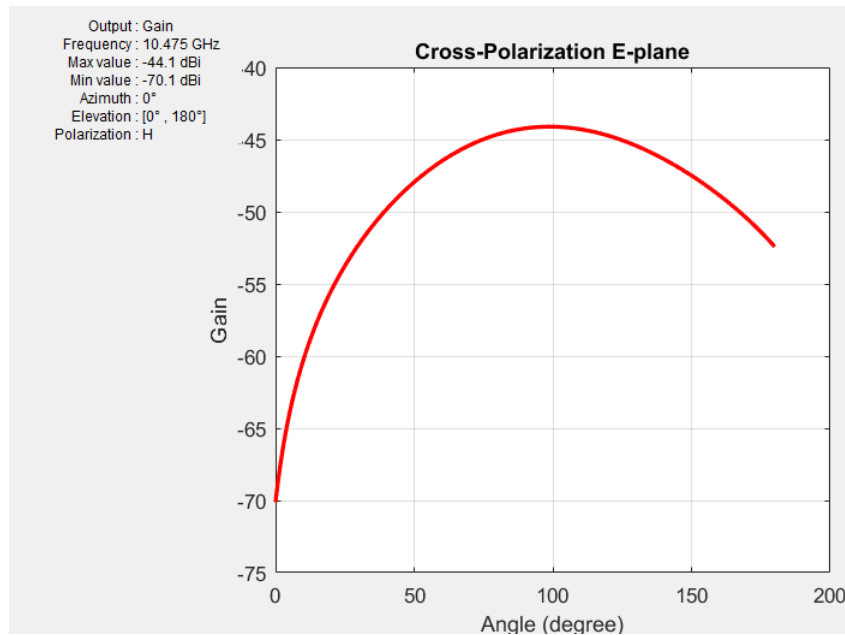


Joonis 16. Planaarantenni suunadiagramm.



Joonis 17. Planaarantenni elektrivälja samasihiline polarisatsioon.





Joonis 18. Planaarantenni elektrivälja ortogonaalne polarisatsioon.

## 4.2 Ringpolariseeritud ruudukujuline planaarantenn

Kuna ringpolarisatsiooni rakendatakse enamjaolt ainult ruudukujulistele või peaaegu ruudukujulistele antennielementidele, siis uueks antenni mõõtmeks võeti lineaarselt polariseeritud antenni jaoks simuleerimise käigus saadud pikkus ( $L$ ). Sellest tulenevalt valiti ruudu mõõdud  $L = W = 0,706$  cm.

Ringpolarisatsiooni saavutamiseks kasutatakse antud töös nurkade kärpimise meetodit. Selle meetodi valik sõltus jällegi tema lihtsusest ning modelleerimise võimalikkusest. Samuti sai määravaks antud meetodi kompaktsus ning lihtne valmistamine.

Kärbitud nurga  $a$  pikkuse leidmiseks prooviti esialgu erinevaid meetmeid, millest ükski ei andnud soovitud tulemusi. Selleks, et ringpolarisatsiooni tekitada peab kärbitud nurga pikkus olema antenni pikkusega võrreldes piisavalt suur. Vastasel korral ei ergastata kahte ortogonaalset moodi, mis tekitavad  $90^\circ$  faasinihke. Silmas võib pidada asjaolu, et nurga pikkust suurendades saame aksiaalsuhte ribalaiust laiendada. Katse-eksituse meetodil leiti  $a$  optimaalseks pikkuseks  $\frac{1}{4}$  antenni pikkusest.

Lähteandmed olid:

1. Pikkus ( $L$ ) =  $0,706$  cm  $\rightarrow$   $0,7177$  cm

2. Laius ( $W$ ) = 0,706 cm  $\rightarrow$  0,7177 cm
3. Kõrgus ( $h$ ) = 0,3048 mm
4. Dielektrik = Arlon 25FR ( $\epsilon_r = 3,58$ , *kaonurga tangens*  $\delta = 0,0035$ )
5. Maakihi pikkus = 1 cm
6. Maakihi laius = 1 cm
7. Kärbitud nurkade pikkus ( $a$ ) = 25 % pikkusest ( $L$ ) = 0,18 cm
8. Toitepunkti asukoht ( $y_0$ ) = 0,15 cm  $\rightarrow$  [0,105 ; 0,05] cm
9. Toiteava diameeter = 0.03 cm

Kuna ringpolarisatsiooniga planaarrantenni simuleerimiseks kasutati MATLAB-is vastavat PCB antenni funktsiooni, siis sai määrata ka reaalselt kasutatava toiteava suuruse (0,03 cm) koaksiaalkaabli konnektori jaoks. Simuleerimise tulemusel selgus, et antenn resoneeris soovitud 10,475 GHz asemel seekord 10,56 GHz juures, samuti polnud impedants puhtalt aktiivne ning takistus oli 42  $\Omega$ . Siit võis järeldada, et antenni pikkus oli liiga väike ja toitepunkti asukoht polnud enam lõigatud nurkade ja suurenenud toiteava tõttu sobilik. Pärast pikka katsetamist leiti, et uus sobilik ruudu külje pikkus ( $L = W$ ) on 0,7177 cm, selleks et resonantssagedus ( $f_r$ ) oleks 10,475 GHz ning toitepunkti asukohaks valiti 0,105 cm x-telje ning 0,05 cm y-telje keskpunktist.

#### 4.2.1 Ringpolariseeritud planaarrantenni simulatsiooni tulemused ja graafikud

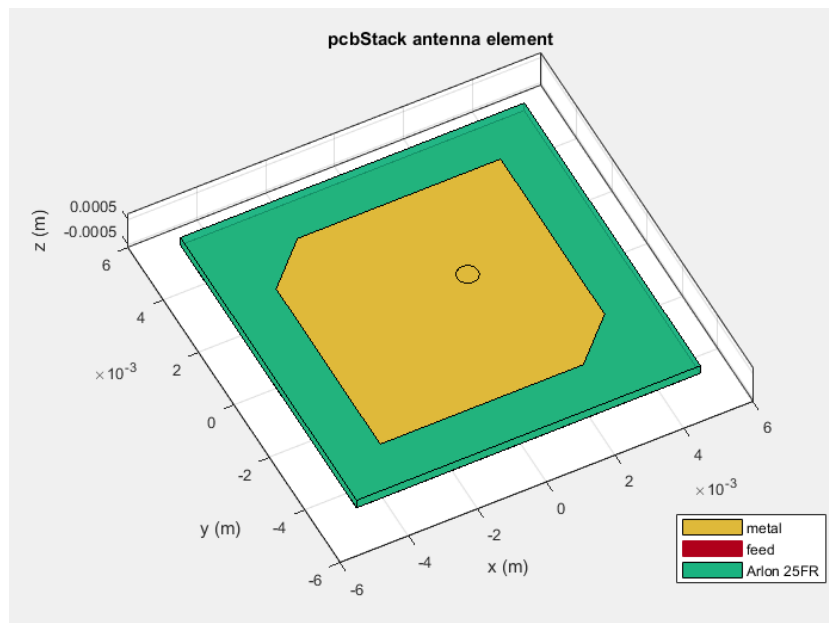
Simuleeritud planaarrantenni antennielement on disainitud ruudukujuline, millel on kärbitud nurgad. Maaplaadiks on suurem ruut, mille peal on alusmaterjali kiht, toitepunkti tähistab ringikujuline ava (Joonis 19). Voolutihedus on suurim antennielemendi äärtel, eriti kärbitud nurkadel ning ka keskosas, kus moodustub ringikujuline ala (Joonis 20).

Impedantsi graafikult (Joonis 21) on näha, et reaalosa on 10,475 GHz juures 50  $\Omega$  ja imaginaarosa 0  $\Omega$ . Tähendab, et antenn resoneerib soovitud sagedusel ja antenni impedants on võrdne koaksiaalkaabli impedantsiga.

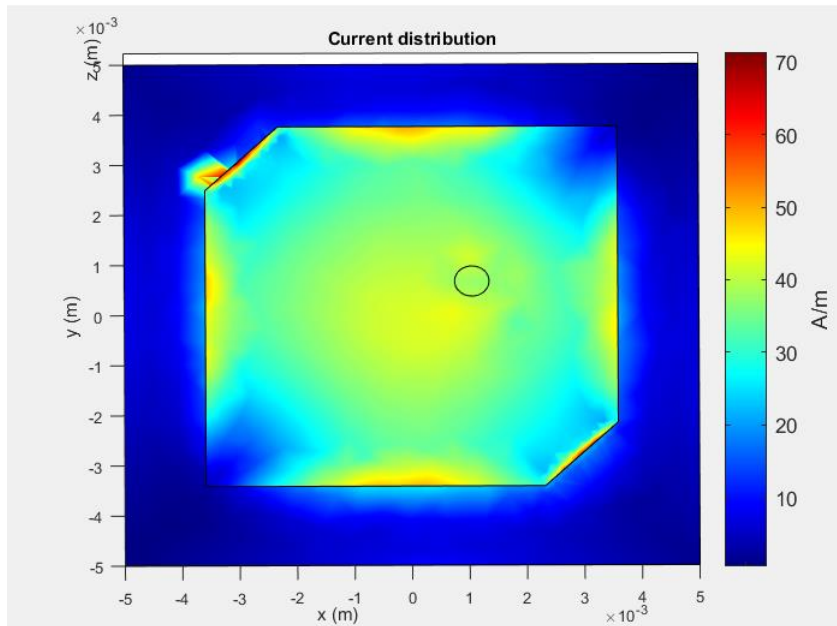
Peegeldusteguri ( $S_{11}$ ) graafikult (Joonis 22) on näha, et 10,475 GHz juures on peegeldustegur -22 dB lähedal. Antud graafikult paistab ka silma, et kärbitud nurgad on muutnud antenni sobituse ribalaiust kitsamaks, mis tegi perfektse sobituse ka natuke keerulisemaks. Sellegipoolest on tulemus hea ja on näha, et  $\Gamma$  jääb kogu kasutatava ribalaiuse (10,45 – 10,55 GHz) ulatuses allapoole -10dB.

Ruumilise suunadiagrammi jooniselt (Joonis 23) võib välja lugeda, et antenni maksimaalseks võimenduseks on 5,85 dBi, mis on isegi 0,20 dBi parem kui lineaarse polarisatsiooni korral. Antenni kiirgus on maksimaalne z-telje positiivses osas.

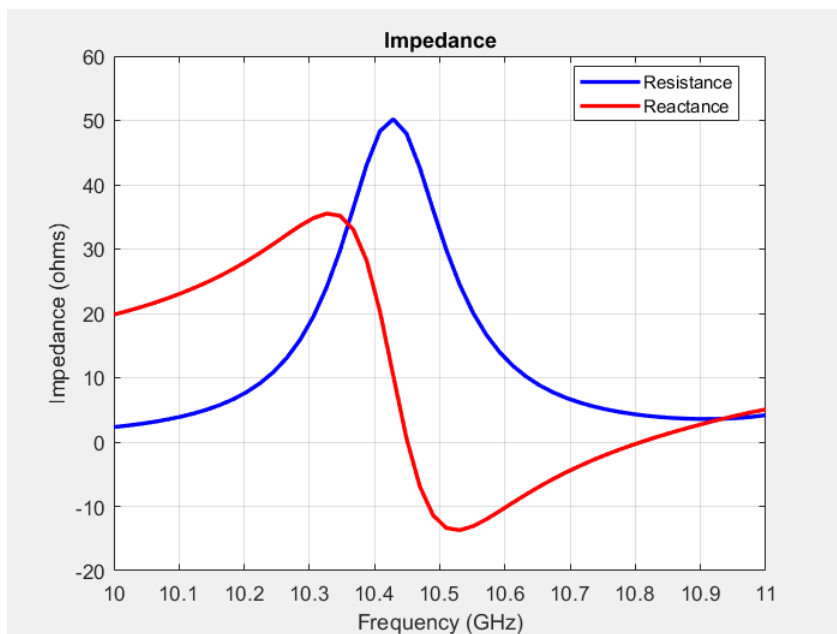
Elektrivälja polarisatsiooni graafikutelt (Joonis 24 ja Joonis 25) on näha, et samasihilise ja ortogonaalse polarisatsiooni võimenduste erinevused on kõigest 0,6 dB, mis tähendab et aksiaalsuhe (AR) on seega 1,15. Antud tulemus jääb ilusti alla 3 dB, mis tähendab et antenn on ringpolariseeritud.



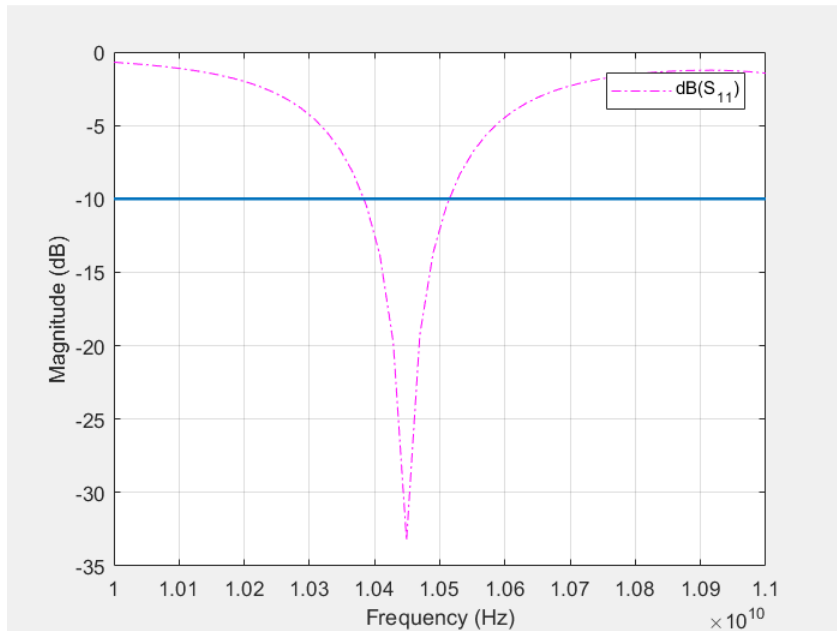
Joonis 19. Ringpolariseeritud planaarrantenni element ja alusmaterjal.



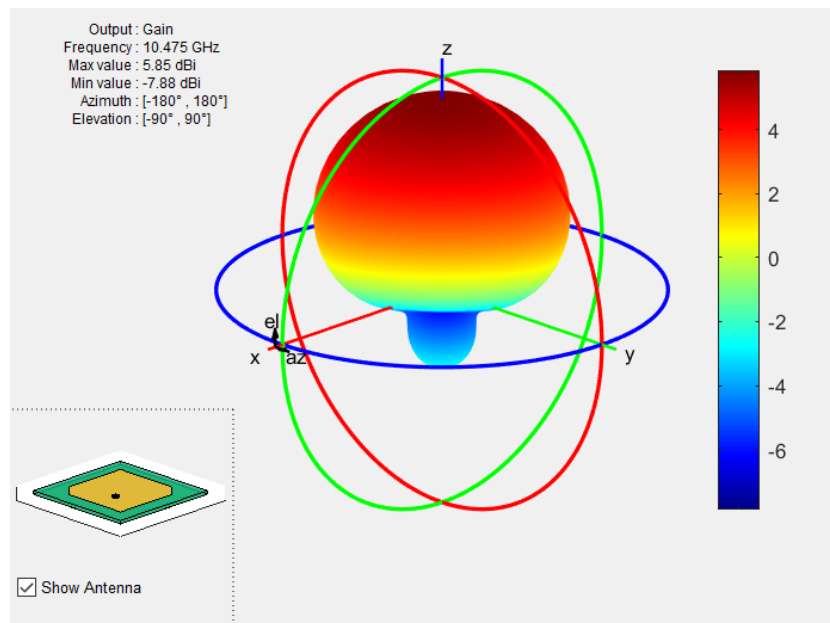
Joonis 20. Voolu jagunemine ringpolariseeritud planaarrantenni pinnal.



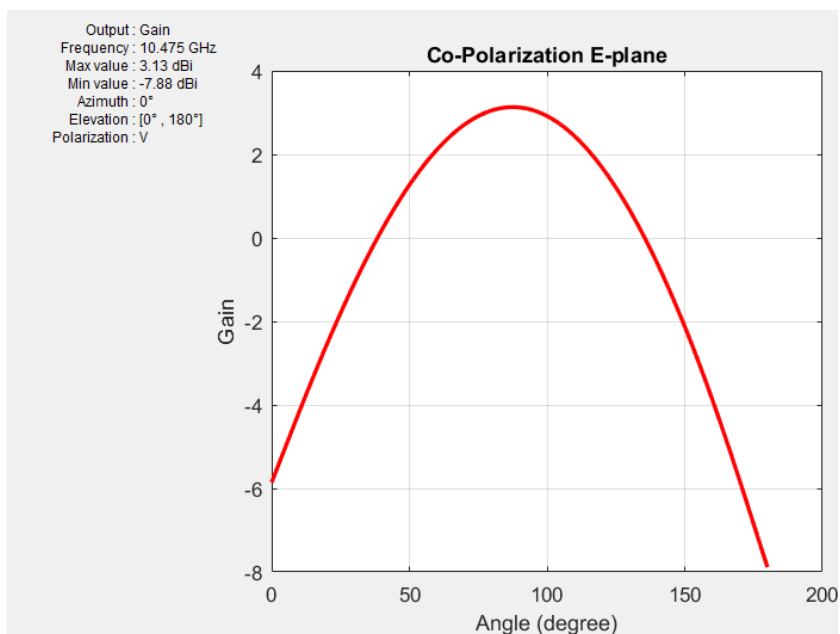
Joonis 21. Ringpolariseeritud planaarrantenni impedantsi graafik.



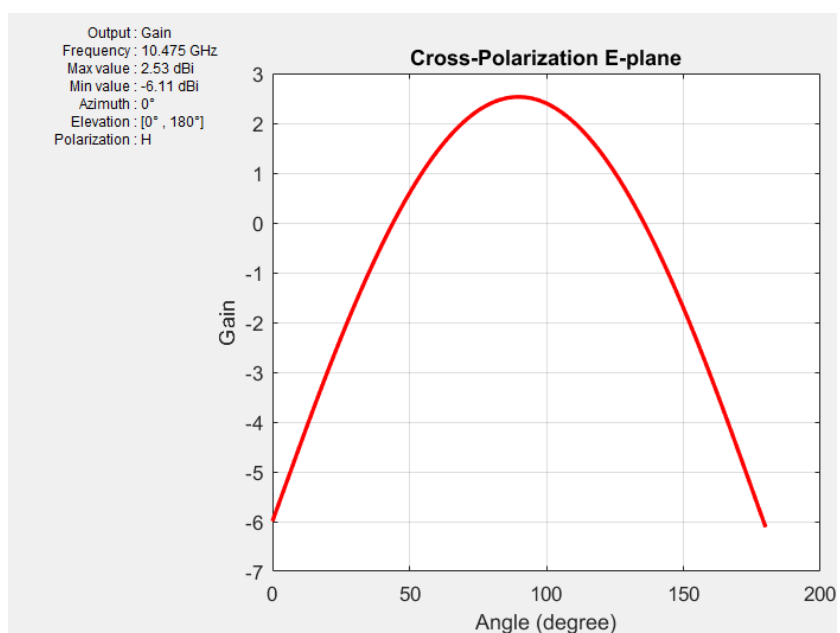
Joonis 22. Ringpolariseeritud planaarrantenni peegeldustegur ( $S_{11}$ ).



Joonis 23. Ringpolariseeritud planaarrantenni suunategur.



Joonis 24. Ringpolariseeritud planaarrantenni elektrivälja samasihiline polarisatsioon



Joonis 25. Ringpolariseeritud planaarrantenni elektrivälja ortogonaalne polarisatsioon.

## 5 PCB disain

Mõlema simuleeritud planaarrantenni jaoks loodi trükkplaadi disain, et tulevikus füüsilisel kujul antenn valmis teha. PCB disaini tegemiseks kasutati CircuitMaker tarkvara, kus disainiti ka koaksiaalkaabli kinnitamiseks vajalik konnektor.

### 5.1 Konnektor

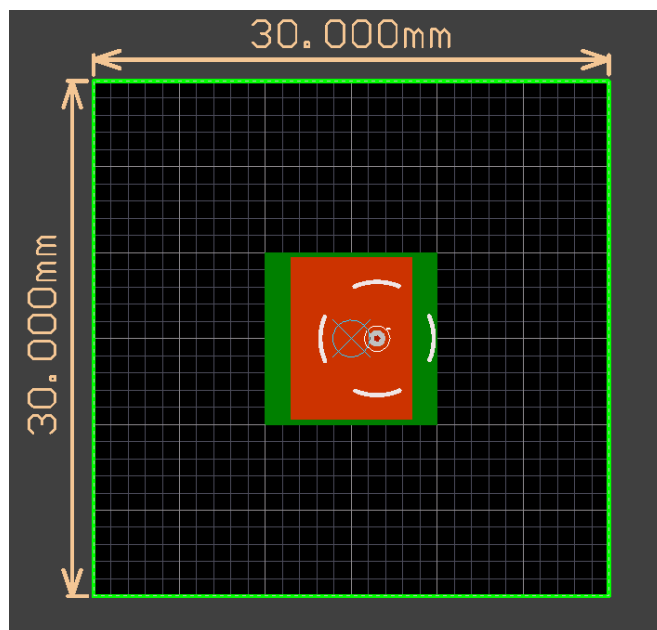
Koaksiaalkaabli konnektoriks valiti SMP (*SubMiniature push-on*) tüüpi pistik, sest see on mõõtmetelt väike ja kergesti kinnitav. Konkreetseks mudeliks on Amphenol RF SMP-MSLD-PCT-3 (Joonis 26), mille impedants on  $50 \Omega$  ja maksimaalseks töösageduseks 15 GHz.



Joonis 26. Koaksiaalkaabli konnektor - SMP-MSLD-PCT-3 [21].

### 5.2 Lineaarselt polariseeritud planaarrantenni trükkplaat

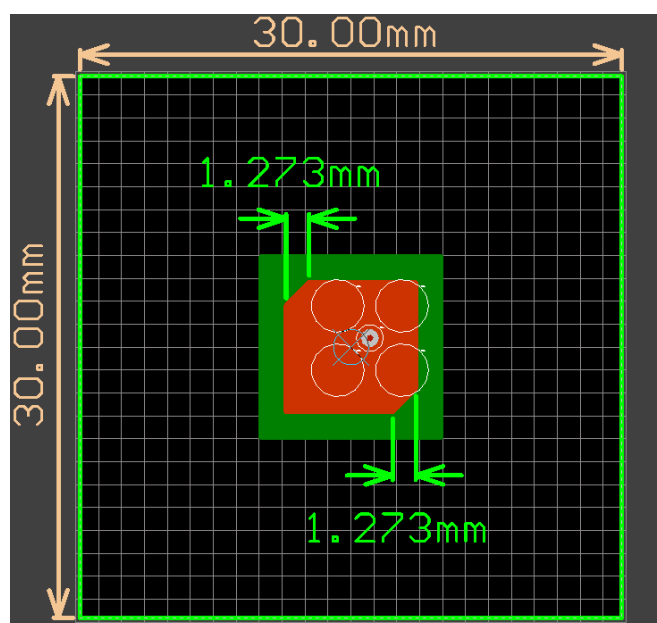
Trükkplaadi kontuuriks on valitud ruut pikkusega 3 x 3 cm ning kõik ülejäänud mõõdud on vastavad simuleerimise käigus saadud tulemustele. Konnektori jalad on asetatud maaplaadi tagumisele küljele ning väike ring tähistab kruviauk läbiviigu jaoks. Äärmised valged kaared näitavad konnektori suurust (Joonis 27).



Joonis 27. PCB - lineaarselt polariseeritud planaarrantenn.

### 5.3 Ringpolariseeritud planaarrantenni trükkplaat

Trükkplaadi kontuuriks on samuti ruut pikkusega 3 x 3 cm ning lõigatud nurk on  $45^\circ$ , pikkus endisest nurga tipust kuni lõikekohani on 0,1273 cm ning diagonaali pikkus 0,18 cm. Kõik ülejäänud mõõdud on vastavad simuleerimise käigus saadud tulemustele. Valged ringid näitavad konektori jalgade kontuure (Joonis 28).



Joonis 28. PCB - ringpolariseeritud planaarrantenn.



## 6 Kokkuvõte

Lõputöö põhieesmärgiks oli etteantud sagedusvahemikus (10,45 - 10,5 GHz) töötava ringpolariseeritud planaarrantenni arvutamine ja disainimine. Töö käigus leiti mitmete arvutuste ja katsetuste teel vajalikud planaarrantenni mõõtmed ning valiti mõistlikud lahendused antenni toitmiseks ja ringpolarisatsiooni tekitamiseks. Saavutatud tulemused vastavad kenasti efektiivse planaarrantenni nõuetele ning edaspidised hinnangud saab anda ainult reaalse mõõtmistega. Lõpptulemusega võib rahule jääda, sest antenni simuleeritud parameetrid on väga head ja rahuldavad kõiki esitatud nõudmisi.

Lisaks simulatsioonile tehti valmis ka trükkplaadi kujundus, mis annab visuaalse ülevaate lõplikust ehitusest ning antenni ja konnektori mõõtmetest.

## Kasutatud kirjandus

- [1] „TTÜ Mektory,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ttu.ee/projektid/mektory-est/satelliidiprogramm-4/satelliidiprogramm/>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [2] C. A. Balanis, Antenna theory : analysis and design. Third edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [3] „Antenna.Theory.Analysis.and.Design(3rd.Edition),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://docs.google.com/file/d/0B7OQo6ncgyFjNUNUSjlrSUhZRGM/edit>. [Kasutatud 18 03 2017].
- [4] „Patch antenna - Wikipedia,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://en.wikipedia.org/wiki/Patch\\_antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Patch_antenna). [Kasutatud 22 05 2017].
- [5] P. Bevelacqua, „Microstrip Antennas: The Patch Antenna,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [6] D. M. G. Orban, „The Basics of Patch Antennas,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://orbanmicrowave.com/wp-content/uploads/2014/12/Orban-Patch-Antennas-2009-rev.pdf>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [7] A. R. S. Taklaja, „ANTENNID JA RF ELEKTROONIKA,“ 13 12 2005. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://lr.ttu.ee/irm/antennid/SUURKONSPEKT.pdf>. [Kasutatud 19 03 2017].
- [8] P. Bevelacqua, „S-Parameters for Antennas (S11, S12, ...),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>. [Kasutatud 20 05 2017].
- [9] P. Bevelacqua, „Antenna-Theory.com - Bandwidth,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.antenna-theory.com/basics/bandwidth.php>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [10] „Antenna Basics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://wireless.ictp.it/handbook/C4.pdf>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [11] „Polarisatsioon - Vikipeedia,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.wikipedia.org/wiki/Polarisatsioon>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [12] „Horizontal polarization vs Vertical polarization,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Horizontal-polarization-vs-Vertical-polarization.html>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [13] P. Bevelacqua, „Antenna-Theory.com - Axial Ratio,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.antenna-theory.com/definitions/axial.php>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [14] R. H. P. Galuscak, „Circular Polarization and Polarization Losses,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.attplus.cz/hamradio/projekty/article/cppl\\_b.pdf](http://www.attplus.cz/hamradio/projekty/article/cppl_b.pdf). [Kasutatud 22 05 2017].
- [15] „What is a Feed Line? - Definition from Techopedia,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.techopedia.com/definition/16795/feed-line>. [Kasutatud 20 05 2017].
- [16] G. A. S. Bazán, „Design of a Circularly Polarized Patch Antenna for Satellite Mobile Communications in L-band,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11708/PFC-Gustavo\\_Sotelo.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11708/PFC-Gustavo_Sotelo.pdf). [Kasutatud 22 05 2017].
- [17] K. Nikolova, „LECTURE 20: MICROSTRIP ANTENNAS – PART I,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L20\\_Mstrip1.pdf](http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L20_Mstrip1.pdf). [Kasutatud 22 05 2017].
- [18] A. F. Alsager, „Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pdfs.semanticscholar.org/a3f9/07961ef65e51d605518407cf0d71ab4053e8.pdf>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [19] „High Frequency, Low Loss Thermoset Laminates and Prepreg for Double Sided, Multilayer and Mixed Dielectric Printed Circuit Boards,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://imageserv10.team-logic.com/mediaLibrary/303/25N25FR.pdf>. [Kasutatud 22 05 2017].
- [20] K. Nikolova, „LECTURE 20: MICROSTRIP ANTENNAS – PART II,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L21\\_Mstrip2.pdf](http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L21_Mstrip2.pdf). [Kasutatud 22 05 2017].
- [21] „SMP-MSLD-PCT-3 Amphenol RF | Mouser Estonia,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.mouser.ee/ProductDetail/Amphenol-RF/SMP-MSLD-PCT-3/?qs=XhnSkQAMKthlwGBegoDaAA==>. [Kasutatud 20 05 2017].
- [22] R. Garg, „Microstrip Antenna Design Handbook - Google Books,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://books.google.ee/books?id=\\_er1LO5pEnUC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ee/books?id=_er1LO5pEnUC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). [Kasutatud 22 05 2017].

## Lisa 1 – Planaarantenni toiteviiside võrdlus

Table 1. Comparison of Various Types of Feed Structures for Microstrip Patch Antenna [22].

Characteristics	Coaxial-Probe Feed	Radiating Edge Coupled	Nonradiating Edge Coupled	Microstrip Feed Types		Proximity Coupled	Aperture Coupled	CPW Feed
				Gap Coupled	Inset Feed			
Configuration	Nonplanar	Coplanar	Coplanar	Coplanar	Coplanar	Planar	Planar	Planar
Spurious feed radiation	More	Less	Less	More	More	More	More	Less
Polarization purity	Poor	Good	Poor	Poor	Poor	Poor	Excellent	Good
Ease of fabrication	Soldering and drilling needed	Easy	Easy	Easy	Easy	Alignment required	Alignment required	Alignment required
Reliability	Poor due to soldering	Better	Better	Better	Better	Good	Good	Good
Impedance matching	Easy	Poor	Easy	Easy	Easy	Easy	Easy	Easy
Bandwidth (achieved with impedance matching)	2–5%	9–12%	2–5%	2–5%	2–5%	13% [30]	21% [33]	3% [39, 40]

## Lisa 2 – MATLAB skript toitepunkti arvutamiseks

```
clear all

c = physconst('Lightspeed'); % Valguskiirus (konstant)

f = input( 'Sisesta sagedus f0 (Ghz): ');
Er = input ( 'Sisesta substraadi dielektriline konstant Er: ');
h = input( 'Sisesta substraadi kõrgus h (mm) : ');
L = input( 'Sisesta planaarrantenni pikkus L (m) : ');
W = input( 'Sisesta planaarrantenni laius W (m) : ');

f=f*1e9; % Teisendab sageduse Hz-ideks
h=h/1000; % Teisendab kõrguse meetriteks

% Toitepunkti kauguse arvutus
k=(2*pi*f)/c;

fun = @(x) ((sin(k*W*0.5*cos(x))/cos(x)).^2*(sin(x)).^3);
fun2 = @(x)
(((sin(k*W*0.5*cos(x))/cos(x)).^2)*(sin(x).^3)).*besselj(0,k*L*sin(x));

I1 = integral(fun,0,pi);
G1 = I1/(120*pi*pi);
G12 = G1*integral(fun2,0,pi);
% Rin = 1/(2*(G1+G12));
Rin = 50;
y0 = (L/pi)*(acos(sqrt(2*Rin*(G1+G12))));

['Toitepunkti asukoht = ', num2str(y0), ' m']
```

### Lisa 3 – MATLAB skript planaarrantenni simuleerimiseks

```
clear all

fc = 10.475e9; % Resonantssagedus
fmin = 10e9; % Minimaalne antenni tööks mõeldud sagedus
fmax = 11e9; % Maksimaalne antenni tööks mõeldud sagedus
c = physconst('Lightspeed'); % Valguskiirus (konstant)
lambda = c/fc; % Lainepikkus

p = patchMicrostrip;
p.Length = 0.00706;
p.Width = 0.0094563;
p.Height = 0.0003048;
p.Substrate = dielectric('Name','Arlon
25FR','EpsilonR',3.58,'LossTangent',0.0035, 'Frequency',10e9);
p.GroundPlaneLength = 0.01;
p.GroundPlaneWidth = 0.01;
p.PatchCenterOffset = [0.000 0];
p.FeedOffset = [0.0015 0];
p.Tilt = 0;
p.TiltAxis = [1 0 0];
p.FeedWidth = 0.00028;
```

## Lisa 4 – MATLAB skript ringpolariseeritud planaarrantenni simuleerimiseks

```
clear all

% Töösageduse määramine
fc = 10.475e9; % Resonantssagedus
fmin = 10e9; % Minimaalne antenni tööks mõeldud sagedus
fmax = 11e9; % Maksimaalne antenni tööks mõeldud sagedus
c = physconst('Lightspeed'); % Valguskiirus (konstant)
lambda = c/fc; % Lainepikkus

% Antenni mõõtmete määramine
Lp = 0.007177;
Wp = 0.007177;
Lgp = 0.01;
Wgp = 0.01;
h = 0.0003048;

% Antennielemendi genereerimine
p1 = antenna.Rectangle('Length',Lp,'Width',Wp,'NumPoints',20);

% Antenni nurkade lõikamine
Lcorner = 0.25*Lp; % 25 protsenti pikkusest
Wcorner = 0.25*Wp;
cornerCenter1 = [-Lp/2,Wp/2,0]; % Nurgad lõigatakse
% tegelikult ruudukujulise tükikesega, esimene parameeter
% näitab ruudu nurga asukohta X-teljel ja teine parameeter
% Y-teljel, Z-telge pole vaja. -Lp/2, Wp/2 asukoht
% tähendab, et ruudukujulise tükikese keskpunkt asetatakse
% antennielemendi nurgale.
cornerCenter2 = [Lp/2,-Wp/2,0];
pcorner1 = antenna.Rectangle('Length',Lcorner,'Width',Wcorner);
pcorner1 = rotateZ(pcorner1,45);
pcorner1 = translate(pcorner1,cornerCenter1');
pcorner2 = antenna.Rectangle('Length',Lcorner,'Width',Wcorner);
pcorner2 = rotateZ(pcorner2,45);
pcorner2 = translate(pcorner2,cornerCenter2');
radiator = p1 -pcorner1-pcorner2;

% Antenni maaplaadi genereerimine
p2 = antenna.Rectangle('Length',Lgp,'Width',Wgp);

% Dielektriku määramine
```

```
d1 = dielectric('Name','Arlon 25FR','EpsilonR',3.58,'LossTangent',0.0035,
'Frequency',10e9);

% PCB stacki omaduste määramine
truncatedCornerPatch = pcbStack;
truncatedCornerPatch.Name = 'Basic Patch';
truncatedCornerPatch.BoardThickness = h;
truncatedCornerPatch.BoardShape = p2;
truncatedCornerPatch.Layers = {pradiator,d1,p2};
truncatedCornerPatch.FeedLocations = [0.00105 0.0005 1 3];
% Cartesiuse koordinaatides [x, y, SigLayer, GndLayer]
truncatedCornerPatch.FeedDiameter = 0.0003;
```