

# Loksodromski antenski niz za 1,6 GHz

---

**Kral, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:763081>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni dodiplomski studij**

**LOKSODROMSKI ANTENSKI NIZ ZA 1,6 GHz**

**Diplomski rad**

**Tomislav Kral**

**Osijek, 2015.**

## SADRŽAJ:

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ANTENSKI NIZOVI – TEORIJSKI DIO.....</b>	<b>3</b>
2.1	Opća definicija antene .....	3
2.2	Antenski niz dva ili više elemenata .....	4
2.3	Konformni antenski niz.....	6
2.4	Polu sferni antenski niz loksodromske konfiguracije .....	7
2.5	Mikrotrakaste (eg. patch) antene .....	8
2.6	Pravokutna mikrotrakasta antena.....	9
2.7	Napajanje mikrotrakastih antena .....	11
2.8	Mikrotrakaste antene kružnoga oblika.....	13
2.9	Značajni parametri mikrotrakastih antena .....	15
2.10	Pasivni djelitelji snage .....	16
2.10.1	Raspršni parametri.....	17
2.10.2	Otporno djelilo .....	19
2.10.3	Wilkinsonovo djelilo snage .....	20
<b>3</b>	<b>PRAKTIČNA IZVEDBA RADA.....</b>	<b>24</b>
3.1	Izrada polu sfernog antenskog niza s mikrotrakastim antenama .....	24
3.2	Postupak izrade djelitelja snage s integriranim krugovima PD4W18-12.....	28
<b>4</b>	<b>MJERENJA NA ANTENSKOM NIZU .....</b>	<b>32</b>
4.1	Izvedba i opis modela .....	32
4.2	Premjeravanje antenskih elemenata.....	34
4.3	Mjerenja na Loksodromskom antenskom nizu.....	34
4.4	Provjera ispravnosti djelovanja izrađenog djelitelja snage.....	36
4.5	Mjerenje dijagrama zračenja za razne brojeve pobuđenih antenskih elemenata.....	36
4.6	Prikaz rezultata mjerenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u E i H ravnini ..	37
4.7	Razmatranje rezultata mjerenja .....	43
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>SAŽETAK.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>49</b>

# 1 UVOD

Za unaprjeđenje komunikacijskih sustava razvijene su raznovrsne antene sa specifičnim električnim i geometrijskim karakteristikama. Za pojedine antenske sustave jedan antenski element nema dovoljni dobitak ili pak ima nezadovoljavajući dijagram zračenja. Spajanjem pojedinih antenskih elemenata u tzv. antenski niz može se doći do rješenja spomenutog problema. Svaki antenski element ima svoju karakteristiku zračenja, a ukupna se karakteristika zračenja znatno mijenja spajanjem više ovakvih elemenata u antenski niz. Antenski nizovi se mogu izvesti pomoću raznih zračećih elemenata kao što su primjerice dipol antene, rezonatori, tiskani dipoli ili mikrotrakaste antene koje su primijenjene u ovome radu. Mikrotrakaste (eg. Patch) antene u današnje vrijeme spadaju u najčešće primjenjivi tip antena za frekvencijski pojas od stotinu megaherca do desetina gigaherca.

Za napajanje elemenata antenskog niza potrebno je osigurati djelitelj ulazne snage koji tu snagu podijeli u jednakim iznosima i ne izaziva promjenu u fazi između pojedinih izlaza. U sklopu ovoga rada je izrađen jedan takav djelitelj snage. On ulaznu snagu dijeli na 32 jednaka dijela koji se prosljeđuju na jednaki broj mikrotrakastih antena.

Glavni cilj teorijskog djela ovoga rada bazira se na opisivanju izvedbi mikrotrakastih antena, te opisu osnovnih parametre antena. Spomenuti opis je dan u drugom poglavlju. Vezano uz to iznesene su i osnovne karakteristike antenskog niza prvo općenito a onda i antenskog niza sačinjenog od mikrotrakastih antena smještenih na sfernu podlogu tvoreći tako geometrijski oblik loksodroma. U danjem teorijskom djelu spomenuti osnovni principi i izvedbe djelitelja snaga, otporni djelitelj i Wilkinsonov djelitelj snage, s njihovim osnovnim karakteristikama i parametrima kojima se opisuju.

Glavni zadatak praktičnog djela ovoga rada je izrada konformnog antenskog niza sačinjenog od 40 jednakih okruglih mikrotrakastih antena koje su smještene na aluminijsku polu sferu postavljene na način da tvore oblik Arhimedove spirale, loksodromski oblik. Sve antene antenskog niza se povezuju na napajanje preko N-konektora na koje se spajaju koaksijalni kablovi s pobudama. Ovaj je oblik napajanja pogodan za sustave u kojima se svaki antenski element može napajati s različitom snagom, amplitudom ili fazom, što omogućava veliku upravljivost sustava. U svrhu napajanja 32 antenska elementa izrađen je djelitelj snage sačinjenog od 11 integriranih krugova djelitelja snage 1 na 4, PD4W12-18.

Treće poglavlje ovoga rada opisuje tehnološke postupke izradbe, i proračune za izradu okruglih mikrotrakastih antena. Postupak njihovih montaža na polu sfernu podlogu po zadanom geometrijskom rasporedu i konačnog dobivanja komfornog spiralnog antenskog niza. U istom poglavlju se nadalje opisuje tehnološki postupak izgradnje uređaja djelitelja snage 1 na 32.

Četvrto poglavlje se odnosi na prikaz rezultata mjerenja na izrađenom antenskom nizu. Mjerenja se izvode za različite konfiguracije pobuđenih elemenata niza primjenom izrađenog djelitelja snage. Ovim mjerenjima je prethodilo premjeravanje svih antenskih elemenata pojedinačno. Svrha mjerenja je analizirati mogućnosti usmjeravanja glavne latice u željenom smjeru.

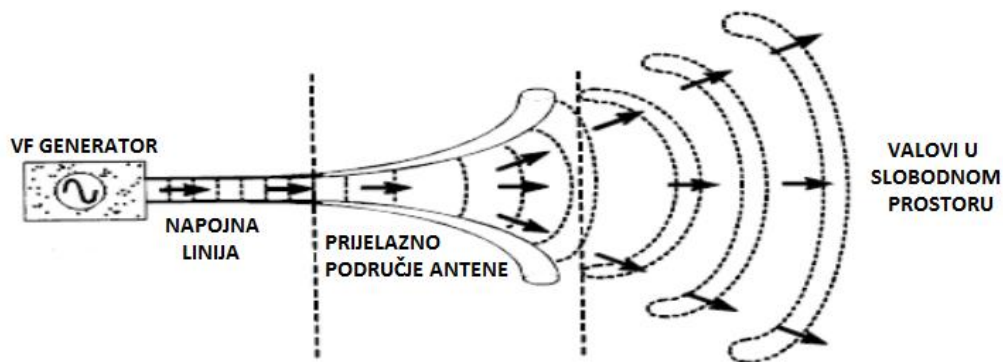
Peto poglavlje daje zaključke o izrađenim uređajima i dobivenim rezultatima mjerenja.

## 2 ANTENSKI NIZOVI – TEORIJSKI DIO

### 2.1 Opća definicija antene

S obzirom da se tema ovoga diplomskog rada veže uz antene za sam početak bilo bi dobro ukratko spomenuti što su to u stvari antene i nabrojati njihove osnovne karakteristike. Antene možemo definirati kako sklopove koji vrše zračenje ili pak prijem elektromagnetskih valova.

Glavna podjela antena je na odašiljačke i prijemne, iako to nije u potpunosti ispravno jer svaka antena može vršiti zračenje i prijem (vrijedi princip reciprociteta). Za antenu se može reći da je ona prijelazna struktura ili granični član radio komunikacijskog sustava. Osigurava prijelaz elektromagnetskih valova dovedenih valovodom, mikrotrakastom linijom ili prijenosnim vodom - koaksijalnim kabelom na elektromagnetske valove koji se šire u slobodnom prostoru. Ovaj je princip prikazan slikom 2.1.



*Slika 1.1* Antena kao prijelazno sredstvo. [12]

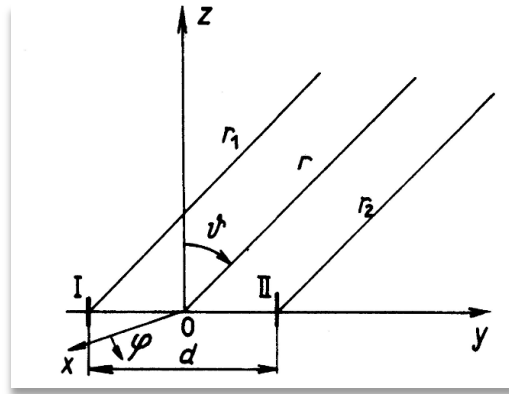
Jedan od temeljnih parametara antenskih struktura je impedancijsko prilagođeniye. Za slučaj kada je impedancija antenske strukture jednaka impedanciji napojne linije možemo govoriti o idealnoj impedancijskoj prilagodbi. Najčešće upotrebljavane impedancije iznose  $50 \Omega$  ili  $75 \Omega$ . Valovi koji su izračeni u slobodan prostor nazivaju se kružni elektromagnetski valovi ili češće prostorni valovi. Prostornim valom se smatra kao idealizirani dio kružnoga vala na velikoj udaljenosti od zračećeg tijela. U praksi je vrlo teško postići sve zadane parametre postavljene za neki antenski sustav. Tako da se kao vrlo često rade kompromisi između željenog, tj. idealnog i mogućeg kako sa konstrukcijskih strana tako i financijske isplativosti. Parametri antene su međusobno povezani, promjenom strukture antene uspiju nam se poboljšati neki od traženih parametara, dok s druge strane mora se računati da će se ostali parametri bitno promijeniti i gotovo da neće odgovarati postavljenim zahtjevima.

## 2.2 Antenski niz dva ili više elemenata

Poznato je kako svaka linearna antena - antenski element posjeduje svoje karakteristike, jedna od najznačajnijih je da antena zrači elektromagnetske valove u jednom smjeru najintenzivnije dok je to zračenje u drugim smjerovima umanjeno ili zanemarivo. U praksi se često puta pojavljuje potreba da u određenom smjeru imamo znatno veće zračenje – usmjerenost nego što ga može dati jedan antenski element – u našem slučaju je to jedna mikrotrakasta antena. Na mjestima gdje je potrebna velika usmjerenost antene, kao što su to primjerice satelitske komunikacije gdje se traži koncentracija izračene energije u jednu zonu prijema, koriste se antenski nizovi. Antenskim se nizovima osim oblikovanja tj. usmjeravanja elektromagnetskog polja u fiksnu točku omogućava pomicanje tog snopa u vremenu, ili praćenje pokretnog objekta u vremenu kao što je primjer prije spomenutog satelita.

Antenski nizovi se nude u mnogim konstrukcijskim rješenjima, ali temeljno za sve je da se sastoje od većeg broja jednakih antenskih elemenata. Vodeći računa o frekvencijskom pojasu u kojem se primjenjuju, pravilnim odabirom tipa i oblika antene, njihovom broju i međusobnim razmacima mogu se dobiti dijagrami zračenja raznih oblika kao i raznih stupnjeva usmjerenosti. Zračeci elementi su u većini slučajeva dipoli, mada se mogu koristiti i drugi elementarni oblici antena kao u što je slučaj u izradi antenskog niza u ovome radu gdje su korištene mikrotrakaste antene. Svaka antena u antenskom nizu napaja se strujom jednake frekvencije i amplitude a fazni pomaci mogu biti jednakih ili različitih vrijednosti. Izračeno elektromagnetsko polje iz pojedinog antenskog elementa se vektorski zbraja s ostalim poljima drugih elemenata, tvoreći tako rezultatno polje. Ovo polje ima u pojedinom smjeru maksimalnu vrijednost, nastalu algebarskim zbrojem pojedinih polja, dok je vrijednost polja u drugim smjerovima mala ili zanemariva.

U danjem će se razmatranju promatrati sustav sačinjen od dva kolinearna dipola udaljena za  $d$  i njihovo međudjelovanje u stvaranju rezultatnog elektromagnetskog polja u nekoj udaljenoj točki . (Slika 2.2.)



Slika 2.2. Zračenje dvaju poluvalnih dipola. [11]

Primjenom zakona superpozicije resultantno polje možemo zapisati kao zbroj polja pojedine antene prema sljedećoj jednačbi (2-1)

$$E_{\vartheta} = E_{\vartheta_1} + E_{\vartheta_2} = j60 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\vartheta\right)}{\sin\vartheta} \left[ I_1 \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + I_2 \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right] \quad (2.1)$$

Ovaj izraz vrijedi samo približno, pretpostavimo li da karakteristika pojedine antene ne ovisi o utjecaju susjednih. U realnim situacijama ovi utjecaji nisu zanemarivi oni djeluju na raspodjelu struja, impedanciju i samu karakteristiku pojedine antene.

Ako zanemarimo spomenute utjecaje tada približno vrijede sljedeći izrazi (2-2):

$$r_1 = r + \frac{d}{2} \sin\vartheta \sin\varphi, r_2 = r - \frac{d}{2} \sin\vartheta \sin\varphi \quad (2-2)$$

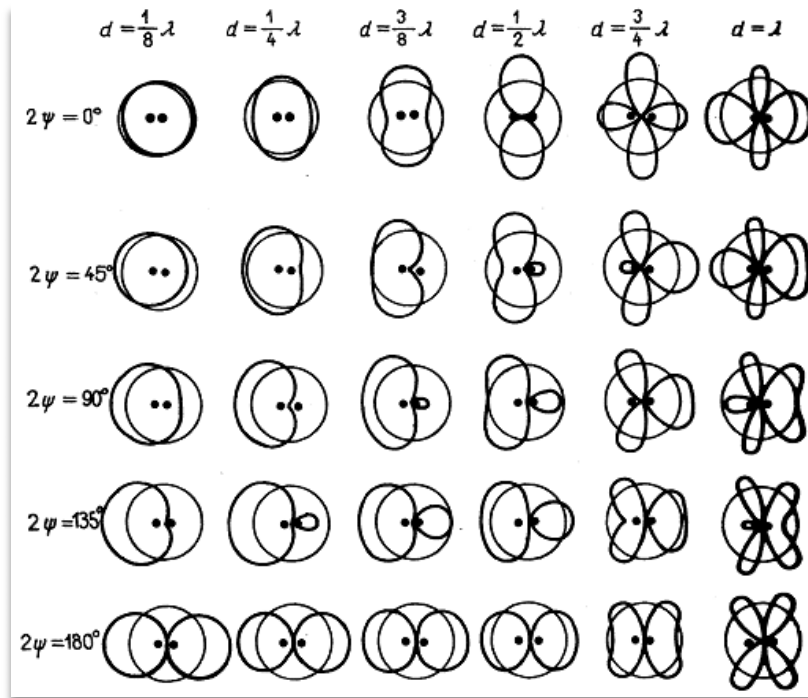
Tako da vrijedi izraz (2-3):

$$E_{\vartheta} = AF_1(\vartheta) \frac{e^{-jkr}}{r} \left[ I_1 e^{-jk\left(\frac{d}{2}\right)\sin\vartheta \sin\varphi} + I_2 e^{+jk\left(\frac{d}{2}\right)\sin\vartheta \sin\varphi} \right] \quad (2-3)$$

Gdje je  $F_1(\vartheta)$  karakteristika usmjerenosti jednog zračećeg elementa. Izrazi u uglatoj zagradi [ $F_2$ ] izražavaju prostornu raspodjelu intenziteta električnog polja dvaju antena takvih za koje vrijedi  $F_1(\vartheta) = 1$ . On je funkcija napojnih struja (amplituda i faza) i udaljenosti antena. Naziva se karakteristika dva ili u slučaju više antena karakteristika funkcije antenskog niza.

Karakteristične funkcije dvaju antena pri raznolikim udaljenostima i faznim pomacima prikazane su slikom 2.3.





**Slika 2.3.** Karakteristične funkcije dvaju zračećih elemenata uz razne udaljenosti i fazne pomake. [1]

Za slučaj kada su antena napajane strujama jednakih amplituda ali fazno pomaknuti:

$$I_1 = I_0 e^{j\psi}, \quad I_2 = I_0 e^{-j\psi}, \text{ tada vrijedi izraz (2-4):}$$

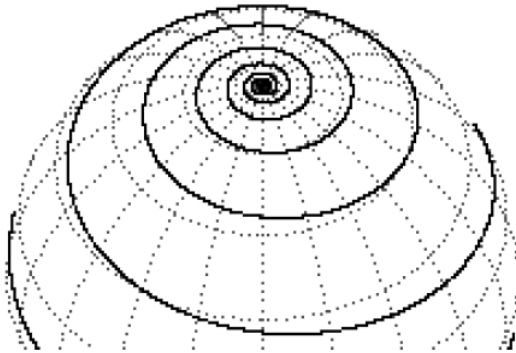
$$\left[ F_2 = 2I_0 \cos\left(\frac{kd}{2} \sin\theta \sin\varphi - \psi\right) \right] \quad (2-4)$$

### 2.3 Konformni antenski niz

Pod nazivom konformni antenski krije se niz antenskih elemenata koji su postavljeni na plohu koja nije ravna kao što je to slučaj kod planarnih sustava. Postavljeni antenski elementi se prilagođavaju površini podloge na koju su postavljeni. Dva najzastupljenija oblika konformnih nizova su cilindar i sfera, odnosno polu sfera kao što je primjer kod antenskog niza izrađenog ovim radom. Raspored antenskih elemenata ovakvog niza ovisi o podlozi na koju se postavljaju, radijusu njene zakrivljenosti, potrebnom obliku dijagrama zračenja. Pobuđivanjem pojedinih antenskih elemenata unutar niza može se kut pomicanja glavne latice bez opadanja dobitka mijenjati duž površine čitavog antenskog niza. Konformne antene se zbog ovih prednosti pred planarnim antenama mogu primijeniti u različitim područjima, pogotovo uz elektroničko zakretanje glavne latice niza.

## 2.4 Polu sferni antenski niz loksodromske konfiguracije

Antenski elementi su postavljeni i raspoređeni na polu sfernoj površini tako da omogućuju zakretanje glavne latice preko cijele hemisfere, uz to da se dijagram zračenja ne mijenja, jednako kao i dobitak antene. Antene mogu biti postavljene na sfernu podlogu prema različitim zakonitostima i pravilima, tvoreći tako odgovarajući geometrijski oblik. Jedan od njih je i Arhimedova spirala primijenjena u ovom slučaju. Ova vrsta konfiguracije ima sposobnosti koje zadovoljavaju postojanje optimalne količine prijemnog signala u bilo kojem prostoru sfernog koordinatnog sustava. Radi se o konfiguraciji antene u kojoj se pojavljuje veliki broj zračućih elemenata  $N$ . Spiralna krivulja projicirana na 3D sferu se naziva Loksodrom krivulja<sup>[2]</sup> čiji oblik vidimo na sljedećoj slici 2.4. Poznato je kako antenski elementi grupirani oko kuta najjačeg zračenja imaju dijagram zračenja s uskom glavnom laticom, te potisnute bočne latice.



*Slika 2.4. a) opći oblik spiralne krivulje - Loksodrom krivulja na 3D sferi<sup>[2]</sup>,*

Općenito spiralna krivulja je dana izrazom (2-5):

$$\rho = a\varphi^n \quad (2-5)$$

Gdje je  $a$  realan broj i uzima se  $a > 0$ .

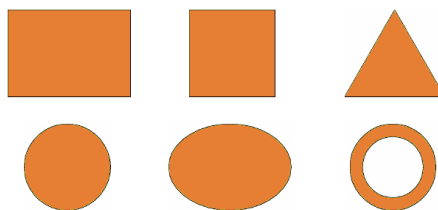
Za slučaj kada je  $n = 1$  dobiva se oblik krivulje nazvan Archimedova spirala. Archimedova spirala je polje točaka koje su gledano kroz vrijeme raspoređene od položaja početne točke sa stalnom brzinom duž linije koja rotira konstantnom kutnom brzinom. Okrugle mikrotrakaste antene su postavljene na metalnu (aluminijску plohu) sfernog oblika prateći danu raspodjelu.

## 2.5 Mikrotrakaste (eg. patch) antene

Mikrotrakaste antene su u sustavima bežičnih komunikacijskim vrlo česta i raširena pojava. Ove se antene odlikuju malim fizikalnim veličinama, upravo su to razlozi što se mogu bez većih poteškoća ugrađivati na mnoga mjesta kao što trupovi aviona, u pročelje zgrada, ili pak u mobilne telefone. Nadalje izrađene su najčešće istom tehnologijom kao i svi tiskani vodovi elektroničkih naprava, zbog toga je njihova proizvodnja prilično jeftina i dobro prihvaćena. Nisu osjetljive na vibracije. U samoj konačnici mikrotrakaste antene je moguće vrlo uspješno integrirati izravno u mikroelektroničke sklopove. Kod ovakve primjene za antenu nisu potrebni nikakvi spojni kablovi, prilagodni članovi, konektori kao što je to primjer kod klasičnih antena.

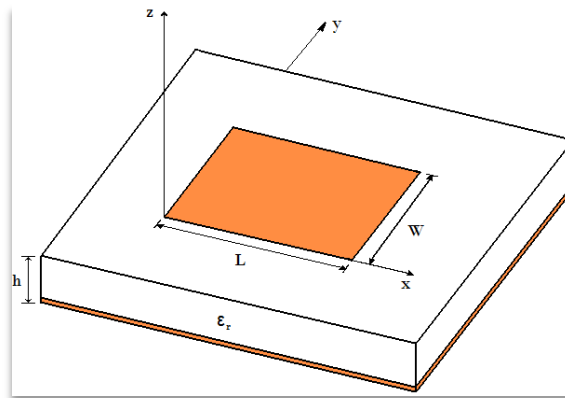
Mikrotrakaste antene se ponašaju kao planarne rezonantne šupljine, kod kojih struja koja protječe po obodima antene zrači. Za realizaciju mikrotrakastih antena koje imaju konstantnu širinu pojasa, impedanciju ili dobitak potrebno je imati kvalitetne materijale čije se osobine nikada ne mijenjaju. Pri realizaciji mikrotrakaste antene važno je voditi računa svim dimenzijama antene. Debljina supstrata (materijala) ima ključni utjecaj na frekvencijski pojas u kojemu će se antena primjenjivati, jednako kao i na impedanciju antene. U primjeni su supstrati čija se dielektričnost kreće u opsezima  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Čim je debljina supstrata veća, veća je i impedancija antene uz konstantnu veličinu. Zahvaljujući tome antena je energetskog gledišta produktivnija ali proizvodi veće materijalne gubitke. Antene proizvedene sa debljim supstratom i niskim  $\epsilon_r$  imaju bolju korisnost i veću širinu frekvencijskog pojasa. Nasuprot tome upotrebom tankoga supstrata sa visokom dielektričnom konstantom  $\epsilon_r$  znači i niža korisnost i manja širina pojasa, prednost ovakvih antena je to što su elementi antene znatno manji i lakše se integriraju u složene strukture.

Mikrotrakasta antena se sastoji od metalne trake odgovarajućeg oblika i dimenzije - radijatora, najčešće je izrađena od bakra, neki od osnovnih oblika traka su prikazana slikom 2.5. Zračeci element najčešće imati oblik pravokutnika, kvadrata ili kruga kao što je slučaj kod izrade i proučavanja ove antene. Postoje i drugi plošni oblici ali njihova primjena jednako kao i karakteristike su složenije za proračun i izradu.



*Slika 2.5. Neki od osnovnih oblika mikrotrakastih antena. [3]*

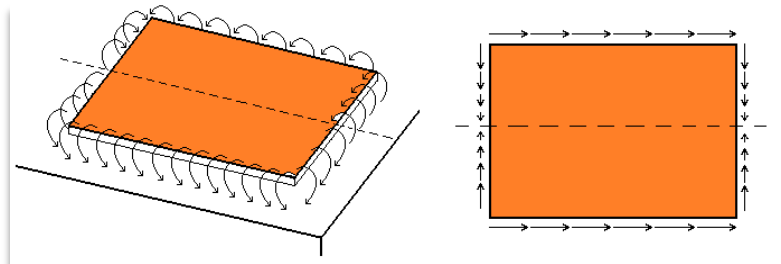
Metalna traka leži na dielektričnoj podlozi s poznatim karakteristikama. Na drugoj strani dielektrika nalazi se uzemljena ploha. Većina se ovih antena danas proizvodi fotopostupkom. Prvenstveno iz razloga što omogućuje preciznost i točnost oblikovanja antene a time i na frekvencijski pojas. Osnovna struktura pravokutne mikrotrakaste antene je prikazana sljedećom slikom 2.6.



*Slika 2.6. Primjer izvedbe pravokutne mikrotrakaste antene. [4]*

## 2.6 Pravokutna mikrotrakasta antena

Jedna od najjednostavnijih i najraširenijih mikrotrakastih (eg. *patch*) antena je pravokutna patch antena koja ima vodljivu površinu dimenzija L i W (*Length* i *Width*). Prilikom konstrukcije mikrotrakastih antena širina vodljive trake (W) se određuje uvijek tako da bude znatno manja od valne duljine vala u slobodnom prostoru. Debljina supstrata h, (udaljenost između trake i uzemljene površine) se odabire u granicama  $0,003\lambda_0$  pa do  $0,05 \lambda_0$ , gdje  $\lambda_0$  označava valnu duljinu u slobodnom prostoru. Duljina antenske trake L kreće se u opsezima  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ . Kao što je prikazano slikom 2.6., gdje se primjećuje se uzemljena ploha, zahvaljujući kojoj se stvara površinski val koji na krajevima vodljive plohe razmjera L i W stvara električno i magnetsko polje koje zrači. Primjeri tih zračenja prikazani su na slici 2.7.



*Slika 2.7. a) raspodjela električnog polja na mikrotrakastoj anteni,  
b) raspodjela magnetskog polja na mikrotrakastoj anteni. [5]*

Značajan utjecaj na rezonantnu frekvenciju antene ima duljina  $L$ , ona se računa prema izrazu (2-6 i 2-7):

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta, \quad (2-6)$$

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2-7)$$

Gdje je:  $f$  - rezonantna frekvencija  
 $h$  - debljina-visina supstrata na kojoj se nalazi traka  
 $\epsilon_{\text{eff}}$  - efektivna dielektrična konstanta (definirana izrazom (2-9))  
 $\epsilon_r$  - relativna permitivnost  
 $c$  -  $3 \times 10^8$  - brzina svjetlosti  
 $\Delta$  - skraćenje (opisano izrazom (2-8))

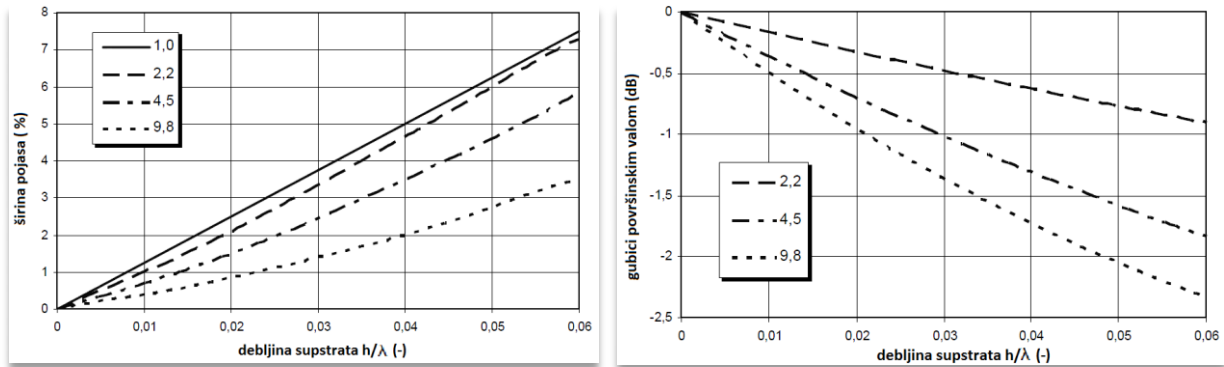
Mikrotrakaste antene zrače zahvaljujući struji stvorenoj na mikrotraci, magnetskim strujanjima oko mikrotrake, ili pak površinskim valom koja je inducirana u dielektriku supstrata. Površinski val zrači u slučaju kada dosegne rubove supstrata, a njihovo zračenje doprinosi zračenju cijele mikrotrakaste antene. Skraćenje efektivne duljine antene  $\Delta$  se računa prema izrazu (2-8). Velika većina silnica električnog polja prolazi kroz supstrat, ali ne može se u potpunosti zanemariti postojanje rasipnog električnog polja koje se pojavljuje u zraku. Iz tog razloga se uvodi pojam efektivne dielektrične konstante  $\epsilon_{\text{eff}}$  koja se računa prema izrazu (2-9).

$$\Delta = h \times 0,412 \frac{\epsilon_{\text{eff}+0,3} \frac{W}{h} + 0,262}{\epsilon_{\text{eff}} - 0,258 \frac{W}{h} + 0,813}, \quad (2-8)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{10h}{W}}}, \quad (2-9)$$

Uz mikrotrakastu antenu vežu se tri vrste gubitaka: gubici u zračnoj traci, gubici u dielektriku i gubici zbog utjecaja površinskog vala. Gubici u traci nastaju prvenstveno zbog prisutnosti omskog otpora i visokofrekventnog površinskog (plošnog) otpora. Gubici u dielektriku izravno su vezani uz faktor  $\text{tg}\delta$  koji zadaje proizvođač supstrata. Posljednji gubici pod utjecajem širenja površinskih valova koji nastaju širenjem elektromagnetskih valova duž granica dielektrika. Ovi gubici izravno ovise o karakteristikama supstrata prvenstveno o permitivnosti i debljini.

Osnovni utjecaji debljine supstrata  $h$  i relativne permitivnosti  $\epsilon_r$  na parametre mikrotrakaste antene prikazani su grafovima na slici 2.8 .



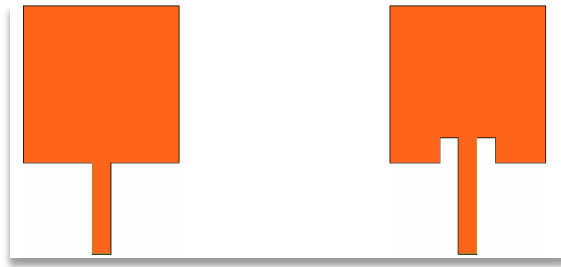
a) b)  
**Slika 2.8.** a) utjecaj debljine supstrata na širinu propusnog pojasa mikrotrakaste antene za razne veličine relativne permitivnosti dielektričnog supstrata, b) utjecaj debljine supstrata na gubitke zbog površinskog vala za razne veličine relativne permitivnosti.

## 2.7 Napajanje mikrotrakastih antena

Napajanje mikrotrakastih antena možemo podijeliti u dvije osnovne kategorije s obzirom na vrstu pobude – izravne (galvanske) i neizravne (pomoću elektromagnetske veze).

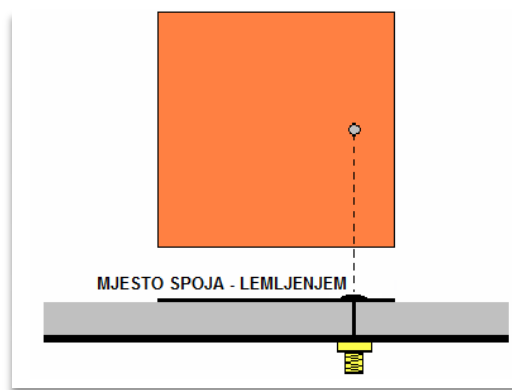
Izravno napajanje podrazumijeva vodljivi spoj između mikrotrake antene i izvora mikrotrakastom linijom čije su dimenzije znatno manje od dimenzije antene. Izravno napajanje se izvodi i pomoću koaksijalne linije, kao što je slučaj kod izvedbe antenskog niza u ovome radu. Izvedba napajanja elektromagnetskom vezom izvodi se preko raspورا u dielektriku tj. pobudom mikrotrake bliskim poljem.

Gotovo najčešća izvedba napajanja mikrotrakastih antena je napajanje pomoću nesimetrične mikrotrakaste linije koja je galvanski povezana sa obodom mikrotrakaste antene. Prilikom izrade mikrotrakaste antene izrađuje se odmah i mikrotrakasta linija kao sastavni dio antene, radi se o konstrukcijski jednostavnom rješenju. Ovaj tip napajanja je prikazan nadolazećom slikom 2.9. a). Problem ovoga napajanja se očituje u tome što ulazna mikrotrakasta linija mijenja širinu plohe antene što rezultira nastajanjem većeg broja površinskih valova . Pri obodima antenskog lika, na mjestu gdje se spaja napojna linija je njegova impedancija većinom najveća. Kako bi se izvršila bolja impedancijska prilagodba, napojna linija se uvlači unutar antenskog lika prema njegovu središtu kao što je to prikazano slikom 2.9. b).



a) napajanje na rubu mikrotrake    b) napajanje uvučeno prema središtu mikrotrake  
**Slika 2.9.** Izvedba napajanja mikrotrakastom linijom.

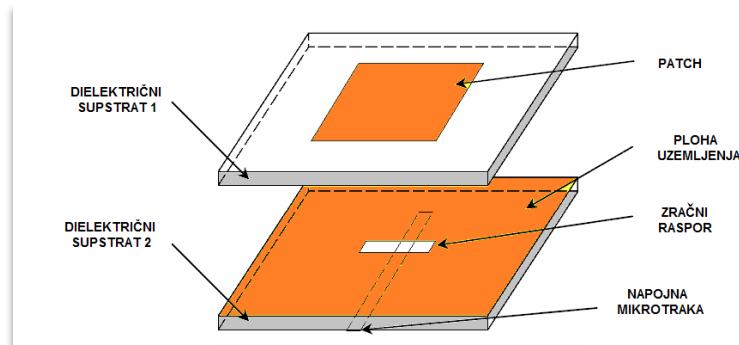
Druga često upotrebljavana metoda napajanja mikrotrakastih antena je posredstvom koaksijalne linije. Srednji vodič koaksijalnog voda prolazi ispod uzemljujuće plohe i spaja se (lemi) s antenskim likom kao što to prikazuje slika 2.10. Oplet koaksijalnog kabela se spaja s uzemljenom plohom antenskog elementa. Ovakva izvedba napajanja je primijenjena i u izradi ovoga rada, s time što se napojni koaksijalni vodovi spaja preko ugrađenih N konektora na uzemljenoj podlozi. Mjesto povezivanja srednjeg vodiča s mikrotrakom određuje i ulaznu impedanciju antene, slično kao što je to bilo kad izvedbe s upuštenom napojnom mikrotrakastom linijom prema središtu antenskog lika. Bez obzira na složenost ovakvim načinom napajanja on donosi i neke prednosti kao što je to prilagodba ulazne impedancije, fazno upravljanje svakog antenskog elementa ako se nalaze u nizu. S druge strane treba se uzeti u obzir djelovanje smetnji na napojni vod prilikom njegovog prolaska od uzemljene plohe kroz supstrat prema površinskom liku antene. Antene s ovakvom vrstom pobuda imaju usku širinu pojasa oko 1%.



**Slika 2.10.** Izvedba napajanja koaksijalnom linijom – N konektorom. [3]

Sljedeća vrsta napajanja je predstavnik beskontaktnog postupka napajanja mikrotrakaste antene. Struktura antene se sastoji od tri djela kao što je to prikazano slikom 2.11. Pločice dielektričnog supstrata su odijeljene plohom uzemljenja, spajanje napajanja je u ovom slučaju izvedeno mikrotrakastom linijom ispod drugog supstrata i rasporedom unutar uzemljene plohe. Maksimalni spoj se ostvaruje u slučaju kada su raspored i mikrotraka postavljeni okomito. Ova vrsta napajanja

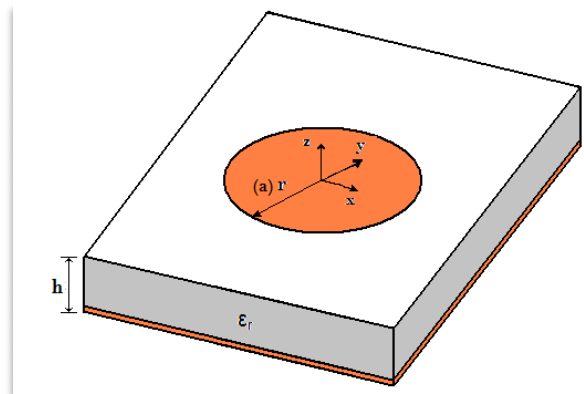
je često puta primijenjena u praksi ali prvenstveno prilikom strojne izrade antenskog niza. Ovime se smanjuje utjecaj nepoželjnih zračenja a ujedno i povećava širina pojasa.



*Slika 2.11. Izvedba napajanja preko zračnog raspora. [3]*

## 2.8 Mikrotrakaste antene kružnoga oblika

Kružni oblik mikrotrakaste antene se prvenstveno koristi zbog malih razmjera, zauzima manje prostora nego pravokutna mikrotraka. Za pravokutni oblik smo imali dvije nezavisne vrijednosti (*duljina L i širina W*). Za kružni oblik imamo jednu nezavisnu veličinu, polumjer mikrotrake *r*.



*Slika 2.12. Primjer izvedbe okrugle mikrotrakaste antene. [5]*

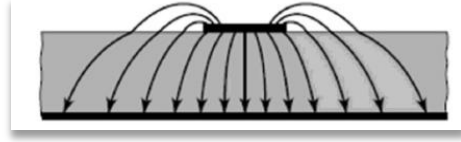
Rezonantna frekvencija okrugle mikrotrakaste antene dana je izrazom (2-10):

$$f_0 = \frac{1.8412 \times c}{a \times 2 \times \pi \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-10)$$

Gdje je:      a - polumjer patcha                                       $\epsilon_r$  - dielektrična konstanata vitroplasta  
                   $f_0$  - rezonantna frekvencija                                      c - brzina svjetlosti,  $3 \times 10^8$   
                  h - debljina-visina supstrata                                       $\pi$  – konstanta 3,14159



Ovaj izraz ne uzima u obzir i rasipno električno polje koje se pojavljuje između mikrotrake i uzemljene plohe kao što je to prikazano slikom 2.13. Ovo rasipanje djeluje na to da mikrotraka izgleda s električkog stajališta veći. Zbog toga se u obzir mora uzeti i korekcijski faktor duljine, te se u obzir uzima efektivni polumjer kruga  $a_e$  koji se dobiva izrazom (2-11):



**Slika 2.13.** Prikaz zatvaranja silnica električnog polja između mikrotrake i uzemljene površine.[2]

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

Iz ovoga je razloga potrebno modificirati izraz za rezonantnu frekvenciju te on poprima oblik (2-12):

$$f_0 = \frac{1.8412 \times c}{2 \times \pi \times a_e \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-12)$$

Praktično se do potrebnih mjera mikrotrake antene kružnog oblika dolazi analizom vrijednosti dielektrične konstante supstrata  $\epsilon_r$ , antena se gradi za poznati – željeni frekvencijski pojas s rezonantnom frekvencijom  $f_0$  [Hz] i poznatom debljinom supstrata  $h$  [cm]. Na temelju ovih veličina računa se stvarna vrijednost polumjera mikrotrake  $r$  pomoću izraz (2-13):

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2-13)$$

Gdje je  $F$  dan izrazom (2-14):

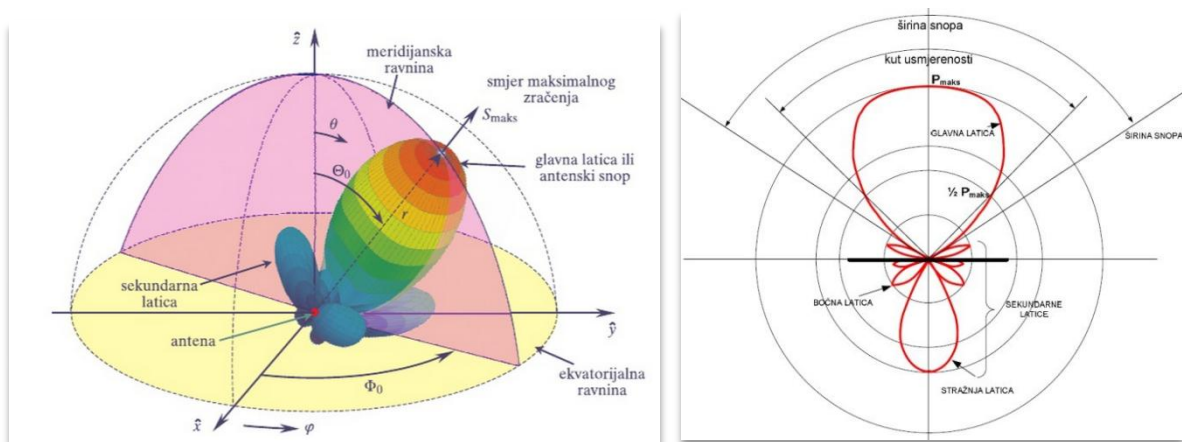
$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_0 \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-14)$$

Izrađeni elementi antenskog niza u ovome radu su kružnog oblika, i napajani su koaksijalnom linijom, kako bi se antena impedancijski prilagodila napojni koaksijalni vodič se pomiče iz središta u stranu. Nepisano ali eksperimentalno pravilo govori da se točka napajanja odabire na način da se pomakne za trećinu polumjera od centra okrugle mikrotrake.

## 2.9 Značajni parametri mikrotrakastih antena

Kao za svako zračeće tijelo tako i mikrotrakastu antenu možemo okarakterizirati s nekim od značajnijih parametara.

Dijagram zračenja antene grafički prikazuje raspodjele zračenja antene u horizontalnoj, vertikalnoj ili nekoj promatranoj ravnini. Svaka antena koja odašilje elektromagnetske zrake na dovoljno velikoj udaljenosti od nje se ponaša kao točkasti izvor. Zračenje energije iz takvog izvora je radijalno. Raspodjelu gustoće snage na površini kugle dovoljno velikog polumjera nazivamo prostornim dijagramom zračenja.[6]



*Slika 2.14. Prostorni dijagram zračenja antene u sfernom koordinatnom sustavu. [7]*

Umjesto prostornog dijagrama zračenja u praksi se češće koristi vertikalni dijagram u dvije međusobno ortogonalne ravnine, ravnine električnog i magnetskog polja ili u vertikalnoj(meridijanskoj) i horizontalnoj(ekvatorijalnoj) ravnini. Ravnini koja je okomito položena na smjer maksimalnog zračenja antene.

- Usmjerenost antene – sposobnost antene da zrači elektromagnetske valove u željenom smjeru.
- Kut usmjerenosti – ovaj je kut zadan dijagramom usmjerenosti (Slika 2.14.,desna), unutar toga kuta gustoća zračene snage ne pada ispod polovice one snage koja se zrači u smjeru maksimalnog zračenja tj. opada ne manje od 3dB.
- Dobitak antene – podatak o tome koliko puta moramo dati u poluvalni dipol veću ulaznu snagu kako bi on imao u točki promatranja jednaku snagu kao promatrana usmjerenana antena.

- SWR faktor – omjer između povratnih i izračenih valova, prikazuje mjeru prilagodbe antene kako bi postigla čim veći stupanj iskoristivosti, ukoliko je  $SWR=1$  ne dolazi do refleksija tj. povrata vala, uz  $SWR >1$  određeni dio izračene snage se vraća nazad u antenu.
- Ulazna impedancija  $Z[\Omega]$  – vlastita impedancija antene koja bi trebala biti mala i realna (bez imaginarnih komponenata), ona se prilagođava i premjerava, definira se i kao omjer napona i struje u napojnoj točki. Sastoji se od otpora zračenja  $R_Z$  (pomnožen sa kvadratom ulazne struje  $I_{ul}$  dobije se izračena snaga), gubici u vodičima i dielektriku antene mogu se prikazati otporom  $R_{dis}$  ( pomnožen sa ulaznom strujom dobiva se vrijednost snage koja se unutar antene i njene okoline pretvara u toplinu). Reaktivna komponenta  $X_a$ (opisuje neprestano kruženje privedene energije između antene i elektromagnetskog polja u njenoj okolini). Otpor zračenja i reaktancija zračenja tvore impedanciju zračenja  $Z$ .

## 2.10 Pasivni djelitelji snage

Djelitelji snage su pasivne mikrovalne komponente, koje služe za podjelu ulaznog signala u dva ili više signala niže energije. Najrašireniji su djelitelji sa jednakom raspodjelom signala, ali pojavljuju se i izvedbe sa raznim stupnjevima podjele. U ovom radu će biti obrađene osnovne izvedbe najjednostavnijih dijelila u obliku troprolaza, gdje jedna grana predstavlja ulaz a dvije izlaz. Kako su dijelila obično recipročne naprave mogu poslužiti i kao naprave za zbrajanje signala iz više izvora. Tipični zastupnici ovakvih sklopova su: T spoj, otporna dijelila ili Wilkinsonovo dijelilo. U praksi često puta uz djelitelje snage nalazimo i koeficijent dijeljenja  $k = \frac{1}{2}$  ili  $-3\text{dB}$ , što bi značilo da se snaga dijeli na dva jednaka djela. Djelilo može i ne mora imati gubitke. T spojevi su bez gubitka, ali njihovi ulazi i izlazi se moraju impedancijski prilagođavati a između izlaznih grana ne postoji nikakva izolacija.

### 2.10.1 Raspršni parametri

Pri mjerenjima napona i struje u mikrovalnim frekvencijskim područjima pojavljuje se niz problema jer ona uključuju mjerenje veličine i faze putujućeg elektromagnetskog vala koji se rasprostire u danome smjeru. Iz tog se razloga u mikrovalnim mrežama koriste ekvivalentni napon i struje a njihove impedancijske i admitancijske matrice postaju vrlo složeni sustavi. Iz tog se razloga ekvivalenti napona i struje prikazuju preko raspršne matrice, koje su praktičnije u izravnim mjerenjima i bolje se slažu s idejom upadnog, reflektiranog i prenesenog vala. Mikrovalne strujne krugove možemo opisati pomoću raspršenih parametara (S – parametri). Radi se o parametrima koji opisuju odnos prolaska signala između pojedinih prolaza u N prolaznoj mreži. Odnosi između amplituda upadnih i raspršenih valova kod linearne N – prolazne mreže simbolički su prikazani na slici 2.15. Izražavaju se prema sljedećoj linearnoj matričnoj jednadžbi (2-15):

$$[b] = [S][a] \quad (2-15)$$

Gdje je:  $[b]$  - stupčasti vektor amplituda napona raspršenih valova

$[S]$  - raspršna matrica

$[a]$  - stupčasti vektor amplituda napona upadnih valova



*Slika 2.15. Linearna N prolazna mikrovalna mreža.*

$a_n$  - amplitude ulaznih (upadnih) napon u N prolaza

$b_n$  - amplitude izlaznih (raspršenih) napon iz N prolaza

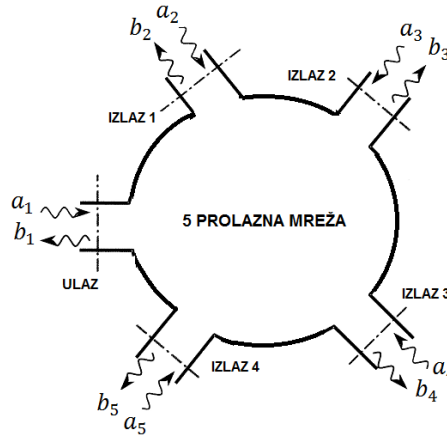
Pojedine članove jednadžbe (2-16) možemo izraziti na sljedeći način:

$$[b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} \quad [a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Ponovnim uvrštavanjem u početnu jednadžbu i njenim sređivanjem dobivamo izraz (2-17) za amplitude raspršenih valova:

$$\begin{aligned}
b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + \dots + S_{1N}a_N \\
b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + \dots + S_{2N}a_N \\
&\vdots = \vdots + \vdots + \ddots + \vdots \\
b_N &= S_{N1}a_1 + S_{N2}a_2 + \dots + S_{NN}a_N
\end{aligned} \tag{2-17}$$

U ovome radu se koristi djelatelj sa pet prolaza, jedan ulazni i četiri izlazna izveden u obliku integriranog kruga. Blokovski prikaz i parametri raspršne matrice ove izvedbe dani su slikom 2.16. i izrazima (2-18, 2-19)



*Slika 2.16. Pet prolazna mreža predočena rasipnim parametrima.*

$$\begin{aligned}
b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 + S_{14}a_4 + S_{15}a_5 \\
b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 + S_{24}a_4 + S_{25}a_5 \\
b_3 &= S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 + S_{34}a_4 + S_{35}a_5 \\
b_4 &= S_{41}a_1 + S_{42}a_2 + S_{43}a_3 + S_{44}a_4 + S_{45}a_5 \\
b_5 &= S_{51}a_1 + S_{52}a_2 + S_{53}a_3 + S_{54}a_4 + S_{55}a_5
\end{aligned} \tag{2-18}$$

Matrični oblik ovog sustava poprima oblik:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} \tag{2-19}$$

Gdje su:

- $a_1$ - upadni val snage na prolazu ULAZ
- $a_{2,3,4,5}$ - upadni val snage na prolazu IZLAZA
- $b_1$ - izlazni - reflektirani val snage na prolazu ULAZ
- $b_2$ - izlazni - reflektirani val snage na prolazima IZLAZ

Pojedini element raspršene matrice se izražava kao:

$$S_{mn} = \frac{b_m}{a_n}, \text{ pri čemu su ostali članovi } a \text{ jednaki nuli} \tag{2-20}$$

Elementi glavne dijagonale  $S_{m,m}$  predstavljaju veličinu koeficijenta refleksije mreže na m-tom prolazu, uz uvjet da su svi ostali prolazi zaključani karakterističnim -zaključnim impedancijama. Elementi  $S_{m,n(n \neq m)}$  koji se nalaze van glavne dijagonale raspršene matrice ukazuju na veličinu

prijenosa od prolaza  $n$  do prolaza  $m$ , pri čemu ostali prolazi moraju biti zatvoreni idealno prilagođenim opterećenjem kako bi se izbjegla refleksija.

Snaga refleksije  $P_{ref}$  od  $n$ -tog prolaza se dobiva izrazom:

$$P_{ref[n]} = P_{upad[n]} |S_{nn}|^2 \quad (2-21)$$

Gdje je  $P_{upad[n]}$  snaga upadnog vala na  $n$ -ti prolaz.

Uz pretpostavku jednakih karakterističnih impedancija ulaznih linija za snagu  $P_{mn}$ , prenesenu s prijelaza  $n$  do prijelaza  $m$  dobivamo sljedeći izraz:

$$P_{mn} = P_{upad[n]} |S_{mn}|^2 \quad (2-22)$$

U slučaju da karakteristične impedancije pojedinih prijelaza nisu identične, potrebno je provesti transformaciju raspršenih parametara na normirane raspršne parametre.

$$a_{n\_nor} = \frac{a_n}{\sqrt{Z_{0n}}}; \quad b_{n\_nor} = \frac{b_n}{\sqrt{Z_{0n}}}; \quad (2-23)$$

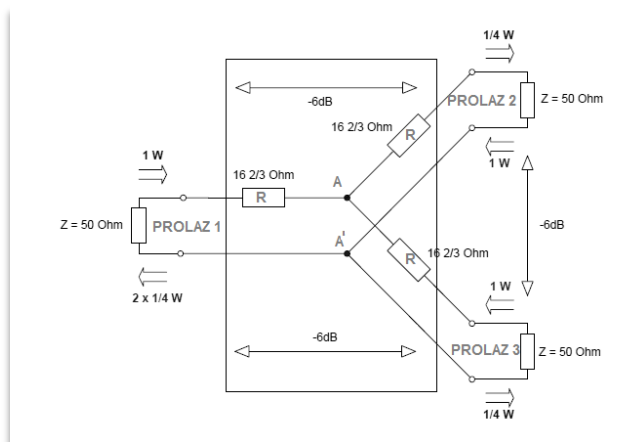
Gdje su:  $a_{n\_nor}$  - normirana amplituda napona vala na ulazu u prijelaz  $n$

$b_{n\_nor}$  - normirana amplituda napona vala na izlazu iz prijelaz  $n$

$Z_{0n}$  - karakteristična impedancija  $n$ -tog prijelaza

### 2.10.2 Otporno djelilo

Otporna djelila su predstavnici najjednostavnijih sklopova djelila čiji se ulazi i izlazi mogu impedancijski prilagođavati na jednostavan način. Problem pak predstavljaju gubici, disipacija snage koji se pojavljuju unutar samog djelila. Djelilo je sastavljeno od tri koncentrirana otpora u zvjezdastom spoju. Na njima se razvijaju toplinski gubici koji iznose polovinu privedene, ulazne snage što će se kasnije u tekstu prikazati proračunom djelila. Shematski prikaz jednog takvog otpornog djelila prikazan je slikom 2.17.



**Slika 2.17.** Izvedba otpornog djelila snage.[8]

Zbog simetrije snaga na izlaznim prolazima će imati jednake iznose, to se može prikazati i primjenom jednostavnih zakonitosti teorija mreža iz kojih proizlazi kako impedancija u točki a ima iznos (2-24):

$$Z_A = \frac{R+Z_0}{2} \quad (2-24)$$

Ulazna impedancija  $Z_{ul}$  na prolazu 1 iznosi:

$$Z_{ul} = Z_A + R = \frac{R+Z_0}{2} + R \quad (2-25)$$

Kako sklop ne bi bio refleksivan mora postojati potpuno impedancijska prilagodba  $Z_{ul} = Z_0$ , tako da vrijednost otpora R iznosi(2-26):

$$R = \frac{Z_0}{3} \quad (2-26)$$

Kao što je prikazano na slici 2.12. za vrijednost ulazne impedancije  $50\Omega$ , vrijednost otpora R iznosi  $16,2/3\Omega$ . Ako se promotri oblik raspršne matrice otpornog djelila uz postojanje simetrije i vrijednost otpora R  $16,2/3\Omega$ , dobije se:

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0 \quad (2-27)$$

Ako se pobudom prolaza 1 na kojem se inducira napon efektivne vrijednosti  $V_1$ , vrijednost napona u točki A dobiva prema izrazu

$$V_A = \frac{Z_A}{R+Z_A} V_1 = \frac{\frac{2Z_0}{3}}{\frac{Z_0}{3} + \frac{2Z_0}{3}} V_1 = \frac{2}{3} V_1 \quad (2-28)$$

Naponi na izlaznim prolazima 2 i 3 jednaki su:

$$V_2 = V_3 = \frac{Z_0}{Z_0+R} V_A = \frac{Z_0}{Z_0+\frac{Z_0}{3}} V_A = \frac{1}{2} V_1 \quad (2-29)$$

Snaga na ulazu u djelilo možemo odrediti sljedećim izrazom:

$$P_{ul} = P_1 \frac{V_1^2}{Z_0} \quad (2-30)$$

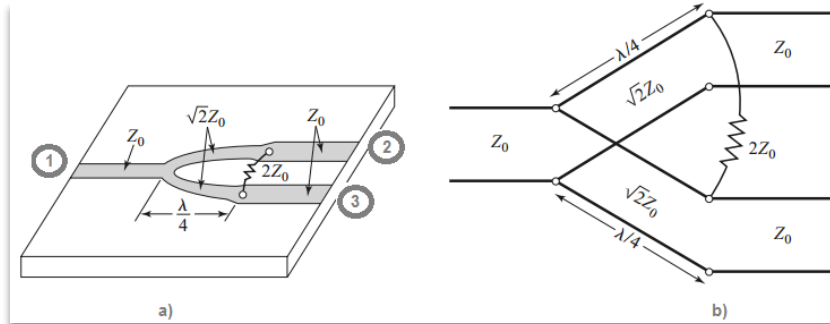
Snaga predana na izlaznim prolazima 2 i 3 se određuje prema:

$$P_2 = P_3 = \frac{\left(\frac{1}{2}V_1\right)^2}{Z_0} = \frac{1}{4} P_{ul} \quad (2-31)$$

### 2.10.3 Wilkinsonovo djelilo snage

Wilkinsonovo djelilo snage se može izvesti s proizvoljnim koeficijentima dijeljenja snage. U ovome radu ćemo prvenstveno napraviti osvrt na troprolazni sklop djelila s ravnomjernom preraspodjelom snage. Ovaj sklop ima sve prolaze impedancijski prilagođene s tim da su mu dva izlazna prolaza (2 i 3) međusobno izolirana. Ulazni se signal dovodi na prolaza 1, nakon toga se

dijeli na dvije jednake polovine s jednakim amplitudama i fazama i privodi se na prolaze 2 i 3 kao što je to prikazano na slici 2.18. Kod svakog Wilkinsonovog djelila je ulazni prolaz impedancijski prilagođen (u slučaju da su prolazi 2 i 3 zatvoreni prilagođenim teretom), i od njega se ništa ne reflektira.



**Slika 2.18.** a) izvedba Wilkinsonova djelila u mikrotrakastoj izvedbi, b) nadomjesna shema. [9]

Prijenosna linija od prolaza do mjesta grananja ima karakterističnu impedanciju  $Z_0$ . Na mjestu grananja se signal dijeli na dva djela, koja su dugačka četvrtinu valne duljine i imaju karakteristične impedancije  $\sqrt{2}Z_0$ . Nakon toga prijelazne linije prema izlazima 2 i 3 opet imaju karakterističnu impedanciju  $Z_0$ . Kod prilagođenog djelila se između prijelaznih linija prema izlazima smješta SMD otpornik prilagođene veličine  $2Z_0$  kao što je to prikazano slikom gore. Dva četvrtvalna linijska odsječka transformiraju impedanciju  $50\Omega$  na dvokratnik, ovime se osigurava da prilikom zaključavanja ulaznih linija impedancijama od  $50\Omega$  sklop bude impedancijski prilagođen. Spojeni izlazni otpornik od  $100\Omega$  osigurava prilagodbu ulaznih prolaza dok prilikom prijenosa u suprotnom smjeru poboljšava izolacijski otpor ulaznih prolaza. Drugim riječima ovaj otpor ne dolazi do izražaja ukoliko je u sklopu sve impedancijski prilagođeno. U slučaju da je spojeni teret impedancijski neprilagođen došlo bi do refleksije djela energije, otpor  $2Z_0$  bi tu energiju potrošio.

Raspršna matrica Wilkinsonova djelila sa dva izlaza je simetrična matrica razmjera  $3 \times 3$ :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

Raspršna matrica Wilkinsonova simetrična djelila bez gubitaka poprima oblik:

$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & S_{22} & S_{23} \\ 1 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

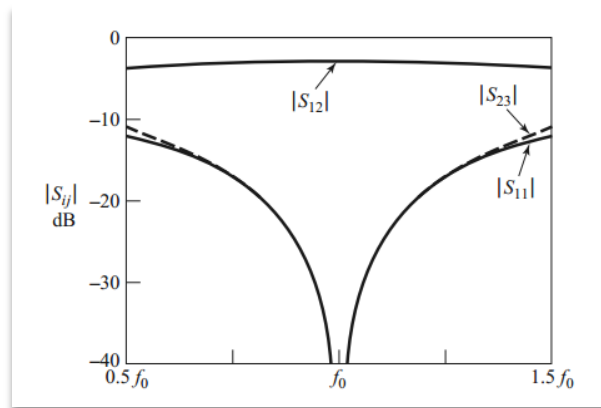
Iz prolaza 1 do prolaza 2 i 3 stiže polovina ulazne snage  $S_{21} = S_{31} = 0,707$ . Negativna imaginarna jedinica u gornjem izrazu predstavlja pojavu faznog pomaka na četvrt valnim



djelovima od  $90^\circ$ . Ako je sklop recipročan tada vrijedi  $S_{12} = S_{21} = S_{31}$ . Za prilagođeni simetrični djelitelj su refleksije u prijelazima 2 i 3 jednaki 0, a prijenos  $S_{23}$  između prijelaza 3 i 2 (s obzirom na reciprotet) jednak ravno 0. Raspršena matrica poprima konačan oblik:

$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & \frac{-j}{\sqrt{2}} & \frac{-j}{\sqrt{2}} \\ \frac{-j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{-j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (2-34)$$

Za analizu ponašanja simetričnih krugova koristi se razlaganje elektromagnetskog polja s pogleda parnog i neparnog. Parni pogled kod simetričnog Wilkinsonovog djelila znači da pobudni naponi i struje imaju jednaku amplitudu i polaritet u obje grane. Tada su naponi i struje jednaki u svakoj grani. Neparan pogled nastaje kada se pobudi prolaza 1 ili istodobno pobude prolazi 2 i 3 jednakim naponima. Kod neparnog pogleda naponi i struje u obje grane imaju suprotne polaritete.



*Slika 2.19. Frekvencijski odaziv Wilkinsonova djelila s jednakim stupnjem dijeljenja.[19]*

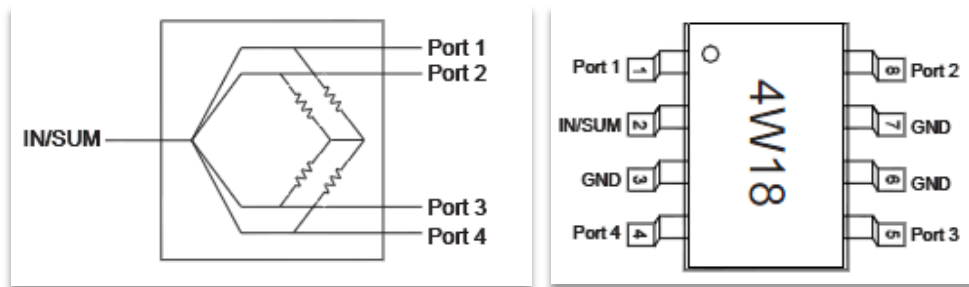
Rješavanjem valnih jednadžbi sklopa dolazi se do izraza koji ukazuje da bi valna impedancija  $\lambda/4$  linije trebala biti:

$$Z_0 = \sqrt{n}R_0 \quad (2-35)$$

Gdje je:  $n$  - broj grana djelila

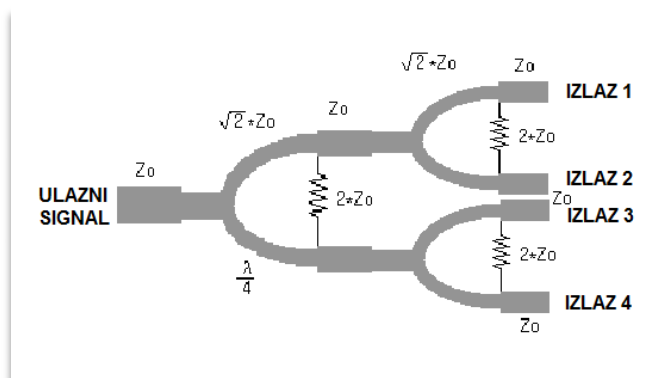
$R_0$  - vanjski opteretni otpor

U ovome se radu prilikom izrade djelitelja snage koristi Wilkinsonov tip djelitelja, izveden u integriranoj SMD izvedbi, planarnom tehnologijom. Radi se o integriranom krugu PD4W12-18 čiji blok dijagram i raspored izvoda prikazuje slika 2.20.



**Slika 2.20.** Blok dijagram, raspored izvoda integriranog kruga djelila snage PD4W12-18. [13]

Ovaj sklop Wilkinsonova djelitelja je izveden u mikrotrakastoj izvedbi, s obzirom na ranije objašnjenu građu i funkciju ovog djelila ova se izvedba može prikazati slikom 2.21.



**Slika 2.21.** Mikrotrakasta izvedba djelitelja snage 1 na 4.

### 3 PRAKTIČNA IZVEDBA RADA

#### 3.1 Izrada polu sfernog antenskog niza s mikrotrakastim antenama

Sve antene sfernog antenskog niza – točnije njih 40 izvedene su na dvostranoj vitropplast tiskanoj pločici. Izrađene su tehnologijom foto postupka. Sama izrada antena je započela izradom predloška pomoću kojega su se onda izrađivale sve antene. Mjere za izradu tiskanih pločica preuzete su od prethodno postavljenih mikrotrakastih antena na polu sfernu podlogu koje su zbog vrlo neujednačenih karakteristika morale biti zamijenjene novima. Polumjer kruga antene  $a$  je izračunat uz pomoću matematičkih izraza iz drugog poglavlja (2-9) uz pomoć poznatih karakteristika materijala za izradu antene i željene frekvencije  $f_0$ .

$f_0 = 1,575$ GHz,	rezonantna frekvencija
$h = 1,6$ m	debljina-visina supstrata na kojoj se nalazi antena - vitropplast
$\epsilon_r = 4,5$	dielektrična konstanta vitropplasta
$c = 3 \times 10^8$	brzina svjetlosti
$\pi = 3,14159$	

$$a = \frac{1.8412 \times c}{2 \times \pi \times f_0 \times \sqrt{\epsilon_r}}$$

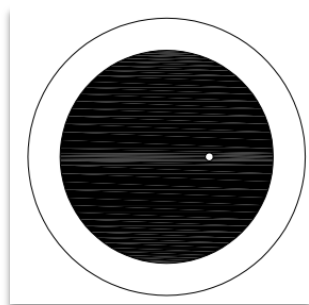
$$a = \frac{1.8412 \times 3 \times 10^8}{2 \times \pi \times 1,575 \times 10^9 \times \sqrt{4,5}}$$

$$a = 2,65$$

$$f_0 = \frac{1.8412 \times 3 \times 10^8}{2,65 \times 2 \times \pi \times \sqrt{4,5}}$$

$$f_0 = 1,565 \text{ GHz}$$

Točka pobude antene  $f_p$  određeni su uz pomoć simulacijskog programa za mikrotrakaste antene „RF Design software“ – MstripAnt, te se dobiva sljedeća vrijednost:  $f_p = 1,06$  cm od centra kružne antene. Predložak za izradu tiskane pločice mikrotrakaste antene izrađen je u programskom alatu AutoCad prikazan je slikom 3.1.



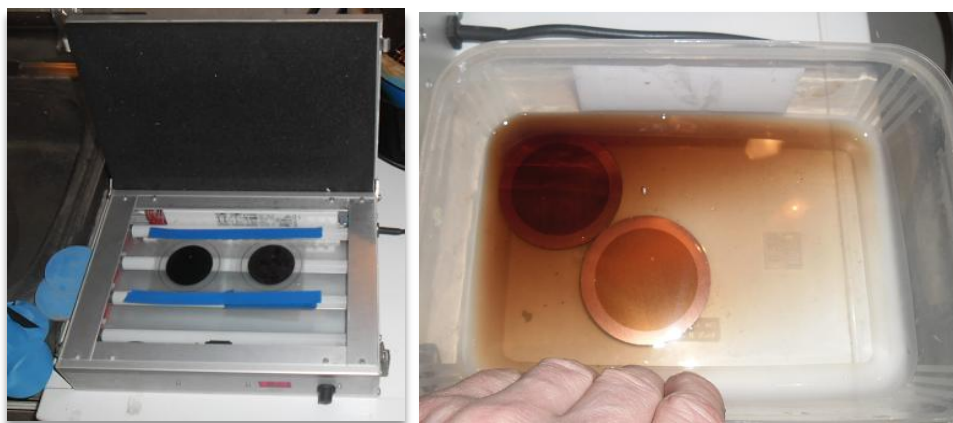
*Slika 3.1 Predložak za izradu mikrotrakaste antene.*

Laboratorij za izradu antena foto postupkom, te kompletnog antenskog niza na aluminijskoj polu sfernoj podlozi bio je improviziran – točnije kotlovnica obiteljske kuće.

Prvi problem koji se pojavio u izradi antena bio je izrezivanje fotooslojenih vitroplast pločica kružnog oblika na zadanu mjeru. Uz razne improvizacije i pokušaje, te uglavnom nezadovoljavajuće rezultate, potrebna je bila stručnu pomoć. Pločice su izrezane u daruvarskom obrtu za izradu reklamnih panoa TF-Studio, uz pomoć CNC frezera.

Postupak izrade antena foto postupkom započinje smještanjem predloška ispisanog na prozirnicu na osvijetljenje u UV osvijetljivaču, dužina osvijetljivanja 3,5 minuta.

Nakon osvijetljivanja pločica se ubace u posudu s razvijanjem NaOH, u kojoj se na osvijetljenim mjestima skida foto lak. Izgled osvijetljivača s predlošcima i pločice u razvijanju prikazani su na slici 3.2. a, b.



**Slika 3.2.** a) osvijetljivača s predlošcima, b) antene u razvijanju – otopini NaOH.

Nakon postupka razvijanja pločica se umeće u kiselinu za nagrizanje – jetkanje  $\text{Fe}_3\text{Cl}$ . Kako postupak nagrizanja traje i do pola sata a više od jedne pločice u posudi izaziva njihovo međusobno grebanje i oštećenje sloja foto laka, za tu svrhu je osmišljena plastična mrežica na koju su se utaknule pločice te se na taj način istovremeno moglo vršiti nagrizanje 4 komada. Slika 3.3 prikazuje posudu sa kiselinom i improvizirano podnožjem za umetanje tiskanih pločica.

Nakon nagrizanja pločice se peru pod mlazom vode a poslije slijedi pranje s „nitro“ razrjeđivačem, kako bi se s pločice skinuo postojeći foto lak, i kako bi bakrena površina poprimila prirodnu boju bakra, ujedno se na bakrenoj površini omogućuje lemljenje bez poteškoća.

Po izradi svih pločica mikrotrakastih antena, točnije njih 40, uslijedilo je njihovo bušenje na stupnoj bušilici svrdlom promjera 2mm.



**Slika 3.3** Postupak nagrizanja pločica.

Nakon bušenja provrta za smještanje srednjeg (signal) kontakta N-konektora vršeno je upuštanje provrta pomoću svrdla promjera 4 mm sa strane metalizirane podloge (GND), zbog izbjegavanja mogućnosti za spajanje signala s masom. S gornje strane isto tako je napravljeno upuštanje svrdlom promjera 3,5mm. Razloga upuštanja je povećanje površine i osiguravanja dobrog i kvalitetnijeg spoja između srednjeg kontakta konektora i metalne površine mikrotrakaste antene prilikom postupka lemljenja. Postupak bušenja provrta prikazan je slikom 3.4.a).



**Slika 3.4** a) postupak bušenja provrta, b) pričvršćen N konektor na metalnu polu sferi.

Kako su na aluminijskoj polu sferi prethodno bile montirane mikrotrakaste antene po premjerenoj spiralnoj konfiguraciji nije bilo potrebno vršiti nova premjeravanja već se montaža novih antena izvršila na prijašnja mjesta.

Svi konektori s polu-sfere su uklonjeni i nanovo pričvršćeni pomoću novih pleh vijaka. Ovime postupkom se ostvario siguran i čvrsti spoj N konektora na aluminijskoj podlozi.

Višak pleh vijka koji je izašao na drugu stranu polu sfere je izbrušen pomoću kutne brusilice. Prije same montaže N konektora signal kontakt je omotan teflonskom trakom kako bi se

osiguralo sigurno izoliranje kontakta od aluminijske podloge, kao što je to prikazano slikom 3.3 b). Prilikom montaže konektora ispod jednog pričvrstnog vijka svakog konektora umetnuta je okrugla stopica na koju je kasnije zalemljen fino žičani-vodič. Fino-žičani vodič je s jedne strane točnije pri stražnjem rubu mikrotrakaste antene lemljenjem spojen na njenu masu - GND. Za ovu svrhu su na polu-sferi izbušeni provrti od 2mm kod svake antene. Kroz njih se uvode vodiči i lemljenjem na okruglu stopicu donji dijelovi antene električki odvoje na metalnu polu sferu odnosno zajedničku metalnu podlogu.

Izgled antenskog niza s konektorima s unutarnje strane gdje se mogu primijetiti okrugle stopice prikazani su na slici 3.5 a).

Proces montaže antena na polu sferu započeo je lemljenjem fino žičnog vodiča pri rubu donje strane antene i njegovo uvođenje kroz provrt prema unutrašnjosti polu sfere. Na donju stranu antene se nanosi sloj neutralnog silikona kako bi se ona učvrstila i fiksirala na predviđeno mjesto na metalnoj polu sferi. Slika 3.5 b) zorno prikazuje postupak.

Kada su sve antene bile na svojim mjestima a silikon je odstajao i fiksirao antene, slijedio je proces lemljenja središnjeg kontakta N konektora sa mikrotrakom antene. Ovdje je valjalo voditi računa o tome da se lem žica nanese u pravilnoj količini, temperatura vrha lemilice pravilno pogodena kako bi se metalni dio kontakta i tanka bakrena ploha stopili.

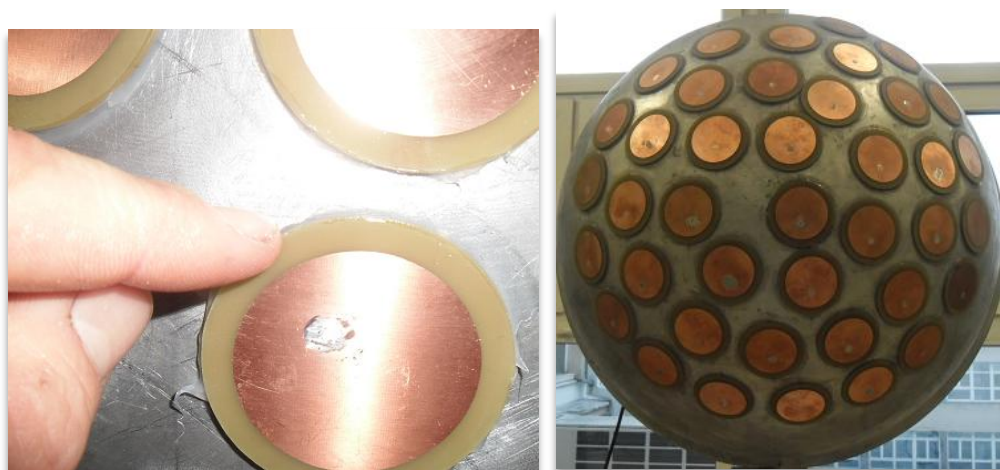
Uklanjanje viška lema sa spoja kontakta i antene je poseban dio priče, odabir pravilnog alata za uspješno uklanjanje tog lema je bio dug i mukotrpan posao. Problem bi se uvijek pojavio kada je materijal za brušenje zapeo za vrlo tanku bakrenu pločicu i izvršio njeno oštećenje. Na posljetku se mali brusni frezer pričvršćen na malu bušilicu za bušenje tiskanih pločica pokazao kao najbolji alat. S time da nije ostavljao u potpunosti glatku i zaglađenu površinu. Ali svi ostali pokušaji su davali možda glađu površinu ali i izazivali velika oštećenja na bakrenoj površini.



**Slika 3.5.** a) postavljeni N konektori u unutarnje strane polu sfere, b) priprema antene za postavljanje na polu sferu.

Nakon lemljenja i odstranjivanja viška lem žice kako bi antena bila u funkciji preostajalo je zalemiti, tj. povezati fino žične vodove donjih strana antena uvedenih u unutarnji dio polu sfere sa okruglom stopicama.

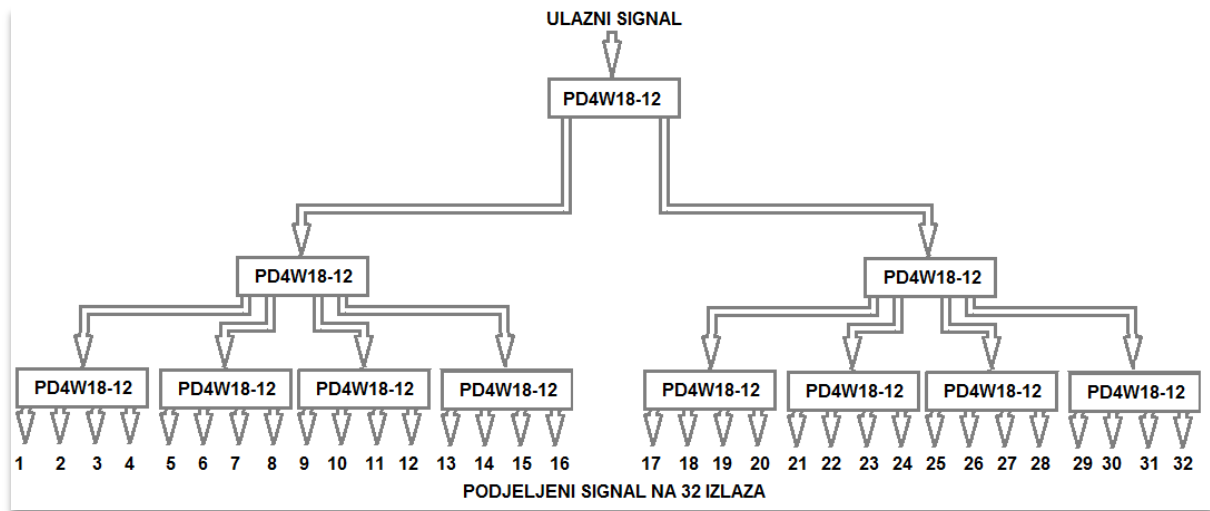
Na samome kraju prostor između antene i polu sferne podloge se popunjavao s neutralnim silikonom, kako bi se dobila zatvorena i estetski uredna površina, postupak kao i krajnji izgled prikazan je slikom 3.6 a) i b).



*Slika 3.6. a) popunjavanje prostora između antene i metalne podloge neutralnim silikonom, b) izgled gotovog antenskog niza s mikrotrakastim antenama.*

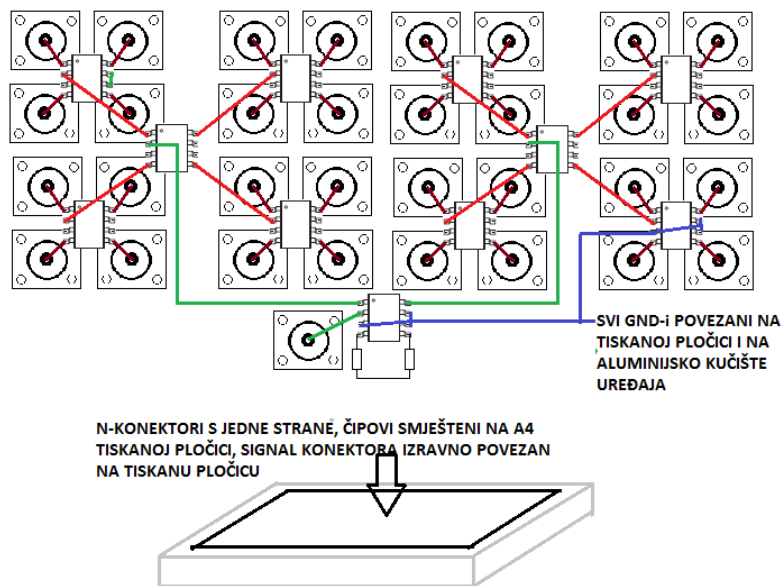
### **3.2 Postupak izrade djelitelja snage s integriranim krugovima PD4W18-12**

Cijeli postupak izrade je započeo pronalaskom integriranih krugova PD4W18-12LF. Pronalazak integriranih krugova djelitelja PD4W18-12LF predstavljao je veliki i dugotrajni postupak. Prije dolaska samih čipova djelitelja snage izrađene su sve pripremne radnje kako bi se čipovi samo zaleмили. Blok shema izvedbe pasivnog djelitelja snage prikazana je na slici 3.7.



*Slika 3.7. Blok shema djelitelja snage s integriranim krugom PD4W18-12*

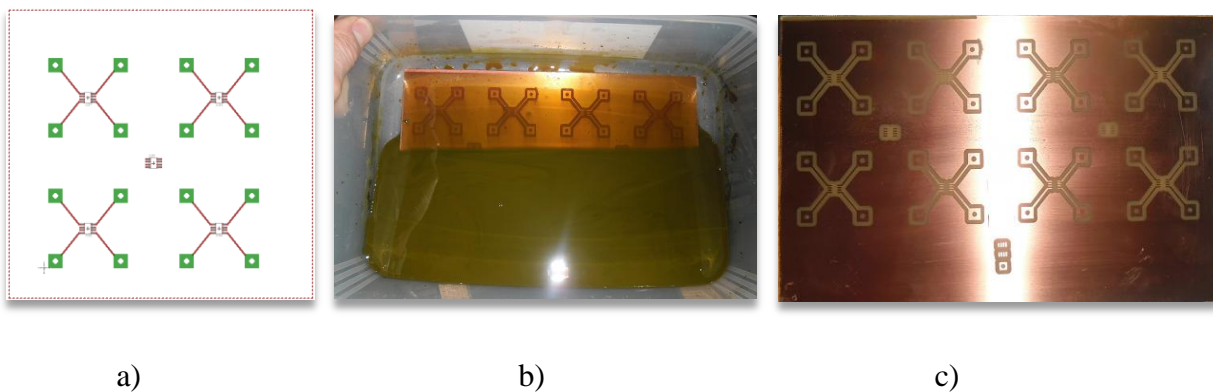
Uz blok shemu trebalo je osmisliti izvedbu kućišta na koje će se montirati konektori kao i tiskanu pločicu za smještaj integrirane krugove djelila, kao i razvod signala do konektora. Tako je nastala i blok shema za realizaciju čitavog sklopa prikazana na slici 3.8.



*Slika 3.8. Skica za izvedbu djelitelja snage 1 na 32*

U programskom alatu „Eagle“ napravljen je predložak za izradu tiskane pločice, kako program ograničava veličinu predloška na  $\frac{1}{2}$  A4 formata, predložak je sastavljen od dva dijela koja su se spojila na fotooslojenoj pločici. Nakon toga je pločica izrađena foto postupkom. Izgled predloška i izrađene tiskane pločice vidljivi su na slici 3.9.

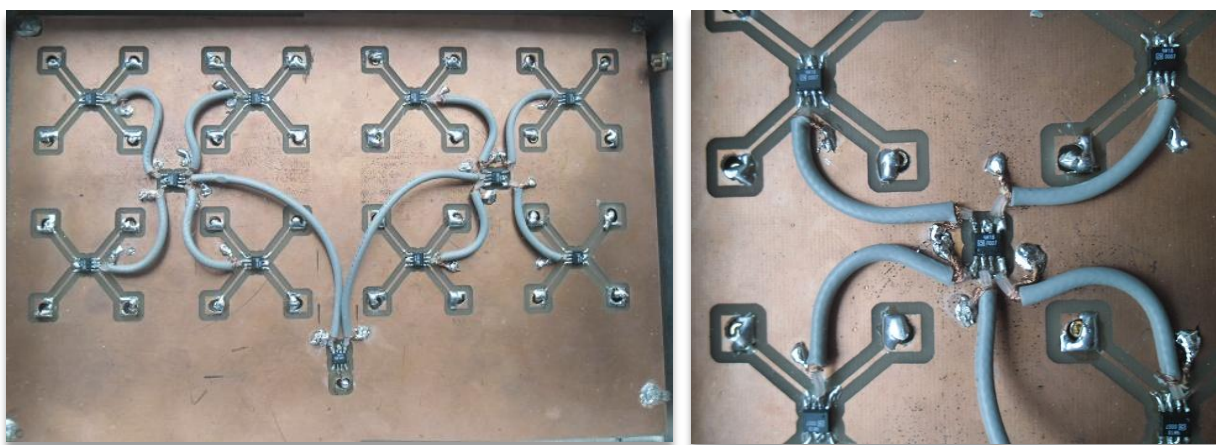




**Slika 3.9.** Postupak izrade tiskane pločice a) dio predloška, b) nagrizanje (jetkanje), c) gotova tiskana pločica

Po izradi tiskane pločice slijedilo je njeno bušenje i izvođenje pripremnih radnji za lemljenje integriranih krugova SMD izvedbe oblika kućišta SOIC8. Izlazni izvodi čipa 1,4,5 i 8 su izravno povezani tiskanom vezom na mjesto spajanja signal - srednjeg kontakta N-konektora. Kako su se na pločici izbjegavali dugački tiskani vodovi zbog podložnosti smetnjama ulazi u pojedine integrirane krugove djelitelja su izvedeni od zalemljenih komada koaksijalnih kabela. Izrađena pločica je dvoslojna, s jedne strane se nalaze tiskani i koaksijalni vodovi, te integrirani krugovi. Između postavljenih čipova i tiskanih vodova postoji izolacijski prostor dok je ostatak ispunjen masom (GND), jednako kao i druga strana tiskane pločice. Spoj odgovarajućih izvoda čipa (3, 6 i 7) s masom izveden je na način da su kroz probušeni provrt pomoću postavljenih i zalemljenih metalnih stupića izravno odvedeni na drugu stranu tiskane pločice i odvedeni na masu.

Prilikom povezivanja određenih ulaza i izlaza koaksijalnim kabelima oplet kabela je uvijek spojen na masu dok se signalni dio spaja izravno na izvod integriranog kruga. Izgled spojeva na tiskanoj pločici, odnosno unutrašnjost izvedenog djelitelja snage prikazana je na sljedećoj slici 3.10.



**Slika 3.10.** Izgled unutrašnjosti sklopa djelitelja snage, izvedbe povezivanja tiskanim vodovima i koaksijalnim kabelom.

Kućište uređaja je napravljeno od aluminijskog lima debljine 1mm. Sastavljeno je od dva djela glavne prednje i bočnih stranica te poklopca s donje strane. Na komadu lima su označene potrebne mjere za izradu oba djela. Kutnom brusilicom su izrezani potrebni komadi lima koji su nakon toga savijeni na ručnoj motalici za lim. Prije motanja limova izvršeno je bušenje provrta za smještaj 33 N-konektora pomoću stepenastog svrdla. Na oblikovano kućište su postavljeni konektori pričvršćeni pomoću 4 vijka za lim s upuštenom glavom. Nakon povezivanja svih elemenata na tiskanoj pločici pločica je umetnuta u kućište tako da konektori sjednu u svoje provrte na pločici gdje su zalemljeni. Na ovaj način je masa tiskane pločice povezana sa metalnim kućištem. Zbog osiguravanja dobrog spoja između masa pločice i metalnog kućišta izveden je vijčani spoj između vodiča s okruglom stopicom zalemljenog na masu pločice i metalnog kućišta. Slika 3.11. prikazuje izgled kućišta s vanjske strane u postupku izrade, te završni izgled.

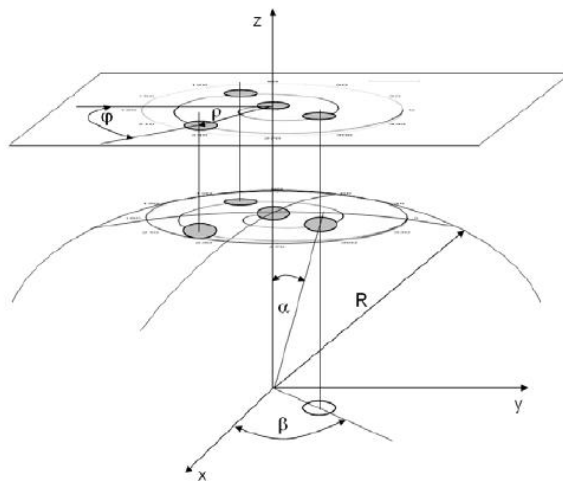


*Slika 3.11. Izgled kućišta s djelomično postavljenim konektorima, konačan izgled kućišta.*

## 4 MJERENJA NA ANTENSKOM NIZU

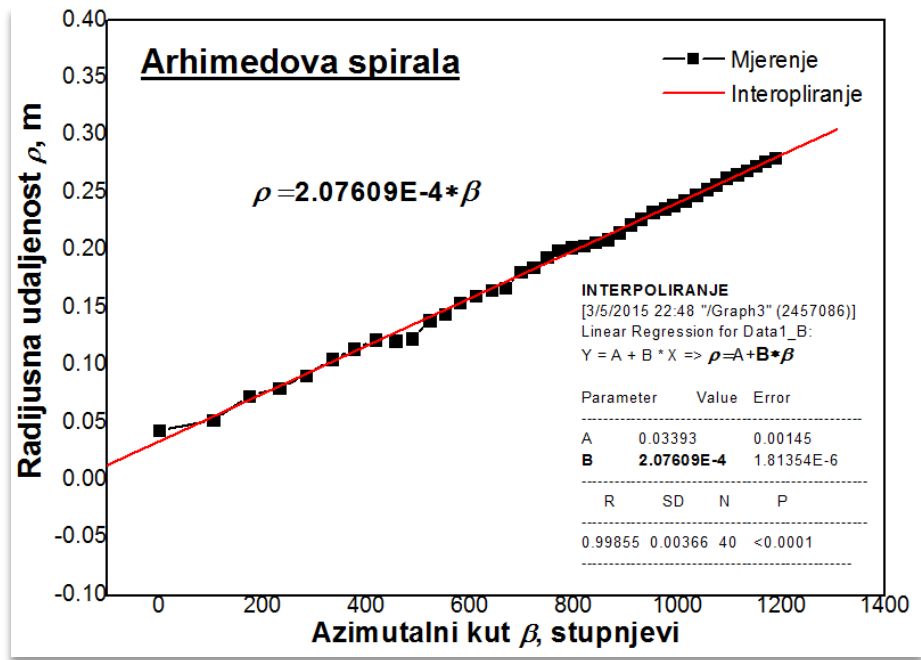
### 4.1 Izvedba i opis modela

Izrađeni antenski niz je polu sfernog oblika i na njemu su raspoređeni antenski elementi sačinjeni od okruglih mikrotrakastih antena. Razmještaj antenskih elemenata po polu sferi treba tvoriti oblik Arhimedove spirale, loksodroma. Na temelju formule koja je prikazana na slici 4.2. i iz koje su proizašle točne pozicije rasporeda antenskih elemenata, vršilo se razmjeravanje polu sfere i označavanje mjesta postavljanja antenskih elemenata. Nakon postavljanja antenskih elemenata na polu sfernu podlogu vršila se ponovna provjera kuta i radijusa svake pozicije antenskog elementa.

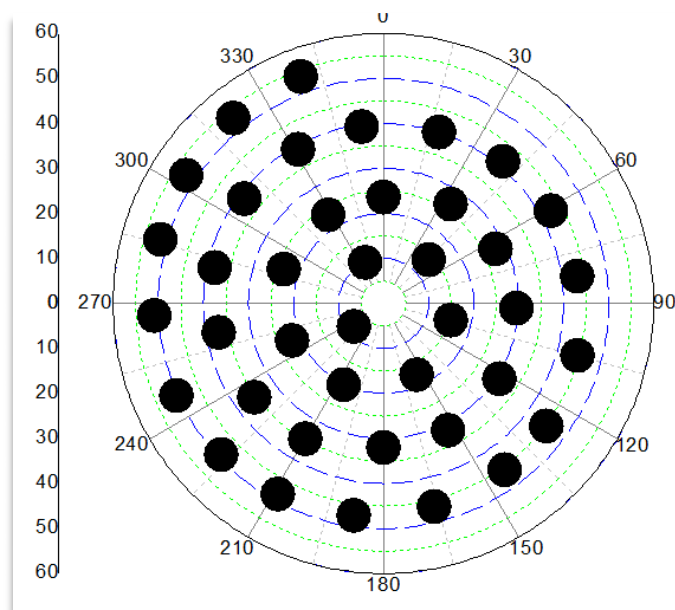


*Slika 4.1. Skica antenskog niza sa spiralnom - Loksodromskom raspodjelom elemenata. [2]*

Izmjereni podaci o kutovima uvršteni su u prije razvijeni računalni program. Program je razvijen u sklopu drugog rada koji je proučavao antenske nizove na polu sfernoj podlozi, za razne rasporede antenskih elemenata. [2,10] Rezultati simulacije u računalnom programu su prikazani grafom na slici 4.2. Ona ukazuje na postojanje izvjesnih odstupanja izmjerenih pozicija antenskih elemenata s obzirom na teorijsku vrijednost. Iz danog grafičkog prikaza vidljivo je da pozicija antenskih elemenata oko središta antenskog niza ima izvjesna manja odstupanja od traženih pozicija antena. Od polovice antenskog niza preklapanje teorijskih i izvedenih je puno preciznije. Zbog ovih odstupanja antenskih elemenata oko središta koji u pravilu imaju i najjači utjecaj prilikom formiranja glavne laticе, ukoliko se ne koristi fazno upravljanje, dolaziti će do manjih odstupanja teorijskih i izmjerenih dijagrama zračenja. U sklopu ove simulacije dobiven je i raspored antenskih elemenata u dvodimenzionalnom polju. Raspored elemenata je prikazan slikom 4.3.



Slika 4.2. Rezultati računalne provjere pozicija antenskih elemenata na izrađenom nizu i teorijske-pravilne raspodjele.



Slika 4.3. Raspored antenskih elemenata po izmjerenim elevacijskom i azimutnom kutovima dobiven simulacijom u računalni program.

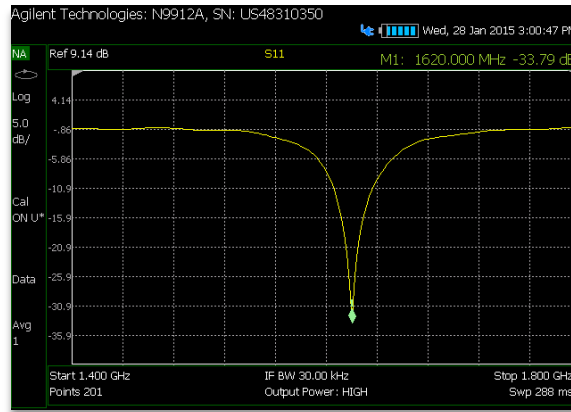
## 4.2 Premjeravanje antenskih elemenata

Ovim mjerenjem mjerio se koeficijent refleksije, povrata ulazne snage na antenu  $S_{11}$ , rezonantna frekvencija svakog antenskog elementa a iz tih se podataka može odrediti i impedancija antenskih elemenata. Mjerenje se provodila spajanjem uređaja marke: Agilent FieldFox RF Analyzer, N9912A, koji generira pobudni signal u frekvencijskim opsegu od 1,4 do 1,8GHz i na tom se području mjeri faktor refleksije  $S_{11}$ . Tamo gdje je njegova vrijednost najmanja to predstavlja najpogodnije frekventno područje za koju je antena izgrađena. Pomoću proračuna je ustanovljena vrijednost rezonantne frekvencije, premjeravanjem se pokušava utvrditi ispravnost izrade i proračuna. Premjeravanjem su dobiveni rezultati koji su prikazani tablično ( Tablica 4.1.).

ANTENA BR.	S11 faktor, dB	frekvencija, GHz
1.	-39,8	1614
2.	-26,42	1624
3.	-30,08	1622
4.	-39,11	1622
5.	-24,21	1620
6.	-32,16	1624
7.	-30,14	1624
8.	-28,76	1604
9.	-36,42	1622
10.	33,14	16
11.	-24,83	1618
12.	-27,75	1618
13.	-37,53	1622
14.	-27,27	1618
15.	-43,13	1620
16.	-40,7	1620
17.	-26,4	1614
18.	-39,2	1622
19.	-16,98	1614
20.	-16,37	1608
21.	-33,79	1620
22.	-31,32	1620
23.	-32,16	1620
24.	-35,35	1622
25.	-41,72	1622
26.	-31,04	1622
27.	-45,36	1618
28.	-33,09	1618
29.	-30,66	1614
30.	-27,89	1620
31.	-28,59	1620
32.	-27,71	1622
33.	-32,7	1622
34.	-28,21	1620

**Tablica 4.1.** Parametri antenskih elemenata antenskog niza

Kao što se može iz prikazane tablice uočiti velika većina antenskih elemenata ima rezonantnu frekvenciju u opsegu od 1618 do 1622 MHz, a faktor refleksije  $S_{11}$  u rasponu od -26 do -40 dB, što pokazuje kako su antene poprilično jednakih karakteristika. Odstupanja su gotovo neizbježna, jer postupak izrade nije strojni a kod mikroelektroničkih komponenata svako malo odstupanje izaziva velike poremećaje. Antene koje su ispale iz granica frekvencijskog opsega ili su se na njih vraćale velike količine odaslanog vala su zamijenjene novima ili je pak spojno mjesto nanovo lemljeno i izbrušeno. Ponovljena mjerenja su na tim antenama u većini slučajeva pokazivala dobre rezultate. Jedan primjer očitavanja s zaslona instrumenta prikazan je na sljedećoj slici 4.4.



*Slika 4.4. Primjer očitavanja zaslona instrumenta Agilent Tehnologies model 9912A za antenski element broj 14*

### 4.3 Mjerenja na Loksodromskom antenskom nizu

Mjerenja na izrađenom Loksodromskom antenskom nizu i djelilu snage izvedena su na hodniku Elektrotehničkog fakulteta (3.kat). Korištena je oprema laboratorija za VF mjerenja. Od opreme su korišteni:

- stalak za pričvršćivanje sfernog antenskog niza, pričvršćenje prijemne antene
- generator signala proizvođača AGILENT HP model 8648B
- analizator spektra zračenja AGILENT HP model 8590B,
- prijemne antene: spiralna – konusna, kružna otvor



*Slika 4.5. Postava za mjerenje dijagrama zračenja antenskog niza.*

Spojevi između pojedinih elemenata mjernog sustava ostvareni su koaksijalnim 50 omskim kablovima RG58 s BNC ili N konektorima. Za potrebe napajanja antenskih elemenata niza preko djelitelja snage izrađeno je 32 komada N muški-muški konektora duljine 0,3 m s 50  $\Omega$ -skim koaksijalnim kabelom RG240.

S generatora signala se odašilje najsnažniji signal snage 14,5 dBm, frekvencije 1,62 GHz. Koaksijalnim kabelom se odvede na djelitelj snage koji taj signal dijeli na jednake iznose. Sklop djelitelja je smješten u unutrašnjost polu sfere, s kojeg se pomoću kratkih koaksijalnih kablova ulazna snaga raspoređuje na potreban broj antenskih elemenata niza (Slika 4.6. a)). Na udaljenosti 1,3 m od antenskog niza postavljena je prijemna – kružni otvor antena (Slika 4.5.). Signal s antene je preko BNC konektora i koaksijalnog kabela odveden na analizator spektra gdje su se očitavale vrijednosti dozračene elektromagnetske energije. Izgled korištenog generatora signala i analizatora spektra prikazani su na slici 4.6. b)



a)



b)

**Slika 4.6.** a) Spoj izlaza s djelitelja snage na 32 antenska elementa, b) generator signala i analizator spektra

Prije početka mjerenja dijagrama zračenja valjalo je obratiti pozornost na to da antene budu jedna prema drugoj pravilno usmjerene, na način da srednji element antenskog niza bude usmjeren u središte otvor antene. Središte antenskog niza i središte prijemne kružni otvor antene su podignuti na visinu 1,3 m od podloge na koju su postavljeni. Svako mjerenje je vršeno u 37 mjernih točaka s jednakim kutnim razmacima od 5°, točnije u opsegu od -90 ° do 90 °. Sva su se mjerenja provodila u E i H ravnini. Za svaku poziciju odašiljačke antene zapisana je vrijednost polja prijemne antene u tablicu. Nakon svakog provedenog mjerenja u programski alat za grafičku obradu podataka unosili su se izmjereni podaci, a program je temeljem njih i postavki programa generirao dijagrame zračenja za mjerne točke.

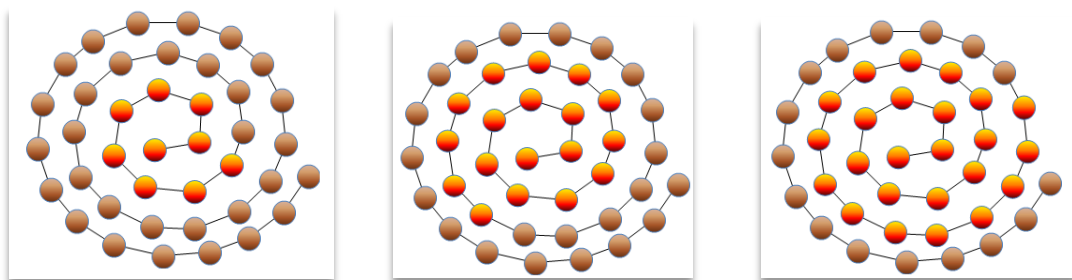
#### 4.4 Provjera ispravnosti djelovanja izrađenog djelitelja snage

Na ulaz djelitelja snage dovedena je pobudni signal sa generatora signala, snage 14,5 dBm i frekvencije 1,62GHz. Izlazni signal iz svakog pojedinačnog izlaza se odvodio na predajnu spiralnu konusnu antenu, dok je sa druge strane bila prijemna antena izvedbe kružni otvor. Signal s prijemne antene se odvodio na spektralni analizator čime se dobio podatak o prijemnoj odnosno predanoj snazi svakog od izlaza. Ovim postupkom je svaki izlaz djelila snage bio podvrgnut jednakoj provjeri efikasnosti, pod jednakim uvjetima. Ovim smo mjerenjem ustanovili kako većina izlaza djelila ima jednake karakteristike, njih 24. Pet izlaza je ukazalo na nešto manju prijemnu - odaslanu snagu. Dok su tri izlaza davala nešto veću snagu od većine. Svaki od izlaza koji na bilo koji način odstupao od većine adekvatno je označen.

Samom provjerom efikasnosti rada djelila zaključeno je kako je moguće pobuditi maksimalno 24 antenska elementa s identičnom privedenom snagom. Razlog ovakvom ponašanju pojedinih izlaza može se pripisati ili neispravnosti djelovanja pojedinih izlaza integriranih krugova, ili pak smetnjama koje ti izvodi poprimaju od nečega. Prilikom konstrukcije djelila vodilo se računa da svi izlazi budu identični. Sljedeći problem je možda i u tome što su integrirani krugovi PD4W12-18 građeni za frekvencijski opseg 1,71 – 1,99GHz, a u radu su korišteni na frekvencijskom području od 1,62 GHz.

#### 4.5 Mjerenje dijagrama zračenja za razne brojeve pobuđenih antenskih elemenata

Nakon izvršene provjere djelitelja snage, pobuđeno je prvih 9, 18 i 24 antenskih elemenata od centra kao što je to prikazano na slici 4.7.

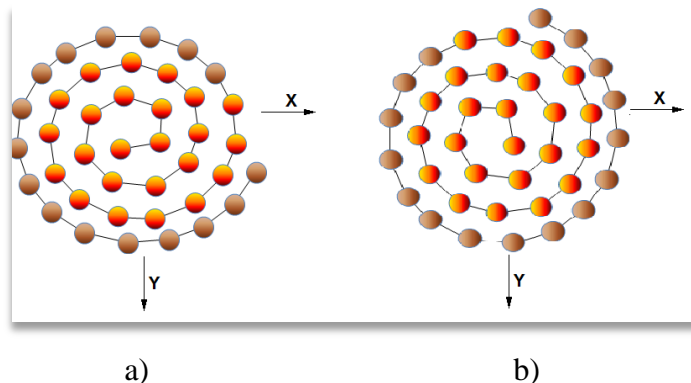


*Slika 4.7. Konfiguracija s 9, 18 i 24 pobuđenih antenskih elemenata niza*

Uz pomoć ranije spomenutog računalnog programa razvijenog u sklopu drugoga rada<sub>[10]</sub> izvršene su simulacije za Loksodromski – antenski niz za pobuđenih 9,18 i 24 elementa u E i H ravnini. Između dobivenih dijagrama zračenja mjerenjem i onih dobivenih izračunom na računalu biti će



vršena usporedba. Dobiveni dijagrami zračenja mjerenjem bi trebali slijediti izračunate iako se to preklapanje ne može očekivati u potpunosti. Prvo su izvedena mjerenja za pobuđenih 9, 18 i 24 elementa u E ravnini ( $x-z$  ravnina). Kako bi se promijenila polarizacija elektromagnetskog vala prijemne i odašiljačke antene (H ravnina) izvelo se zakretanje antena za kut od  $90^\circ$ . Prikaz orijentacije antenskog niza u H i E ravnini je prikazan slikom 4.8.

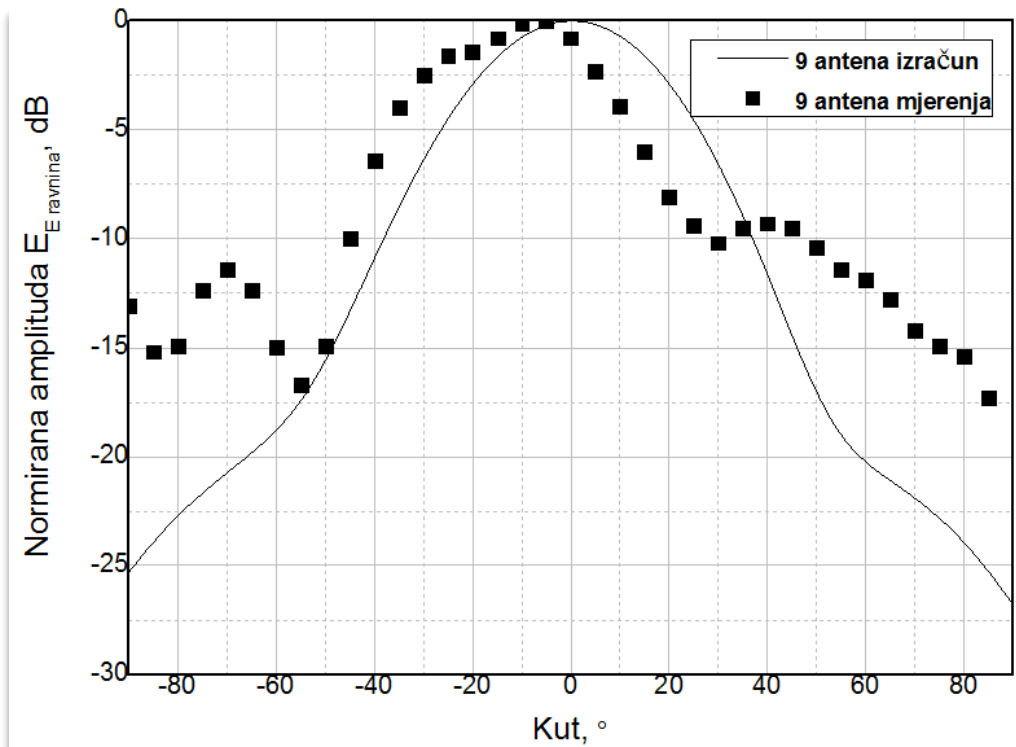


**Slika 4.8.** Konfiguracija antenskih elemenata u a) E ravnini, b) H ravnini

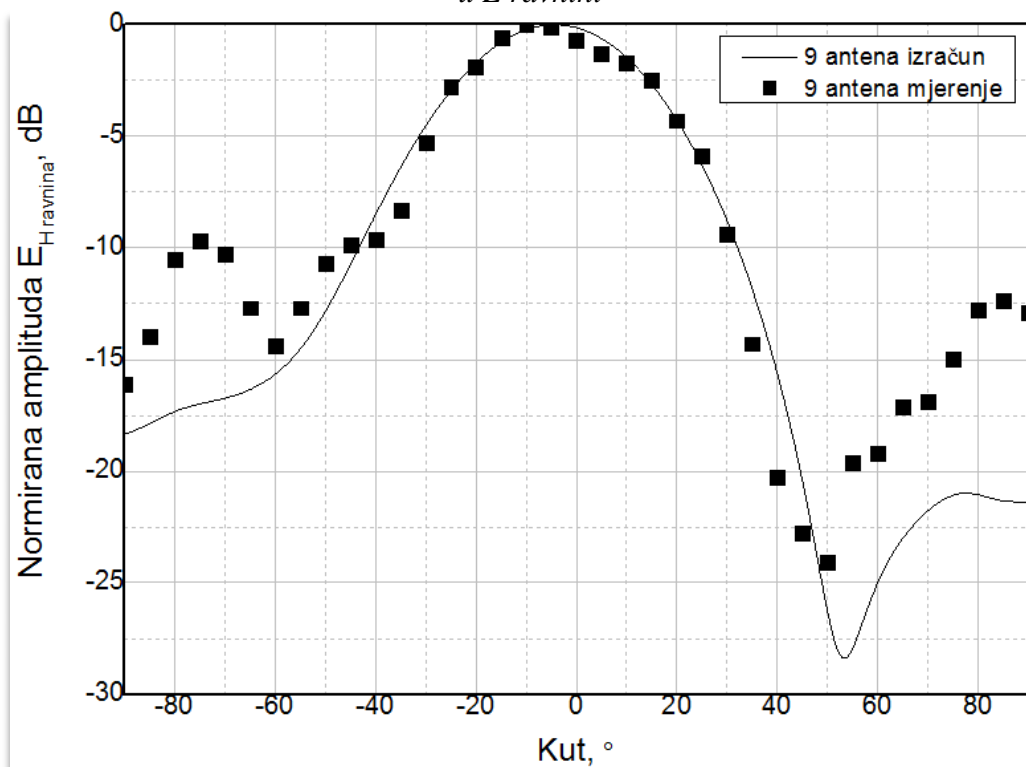
#### 4.6 Prikaz rezultata mjerenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u E i H ravnini

Sva mjerenja su provedena u jednakim uvjetima i jednakom broju mjernih točaka kao što je to opisano u poglavlju 4.5. Rezultati mjerenja su prikazani grafički, dobiveni su dijagrami zračenja za E i H ravninu s teorijskim - izračunatim i realnim - izmjerenim dijagramima zračenja. Ovi su dijagrami zračenja prikazani su na slikama 4.9 do 4.14.

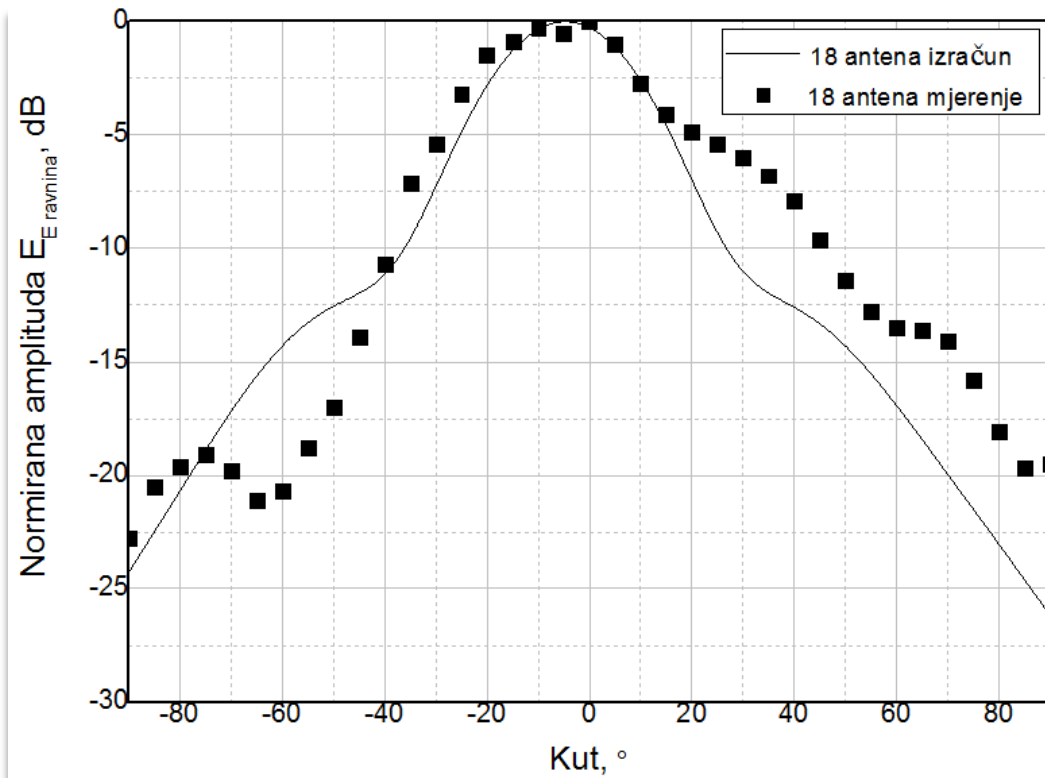
Dijagrami na slici 4.15. do 4.18. prikazuju skupne dijagrame zračenja u E i H ravnini koji su pogodni za analizu usmjerenosti antene za različiti broj antenskih elemenata.



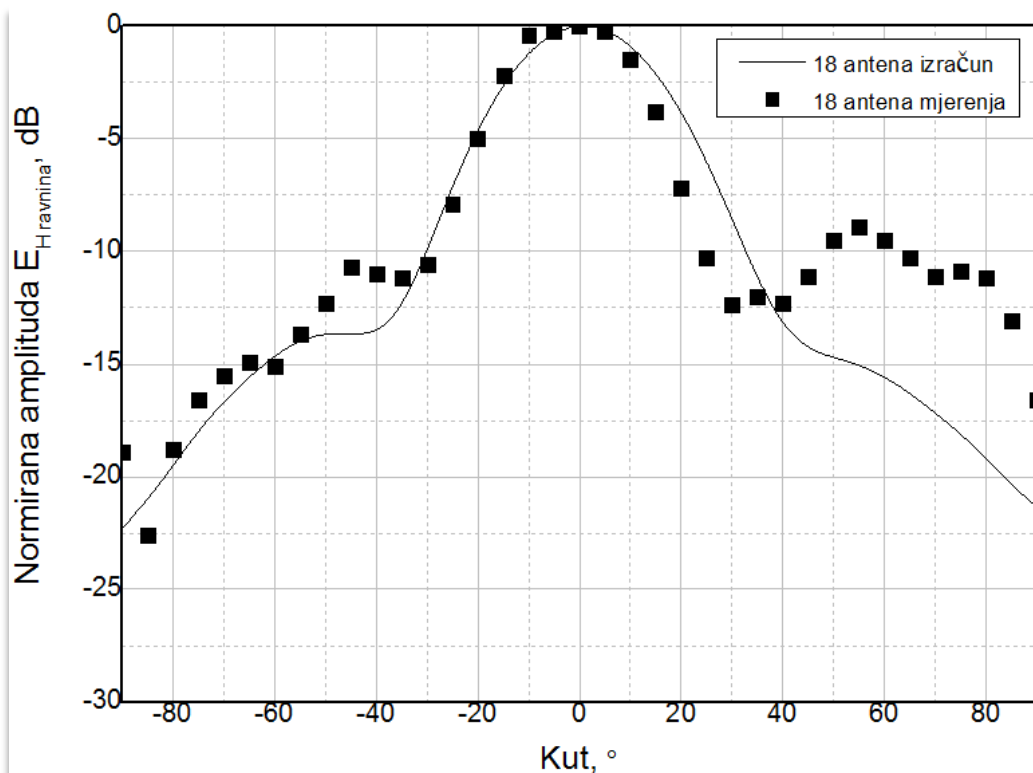
Slika 4.9. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 9 pobuđenih antenskih elemenata u E ravnini



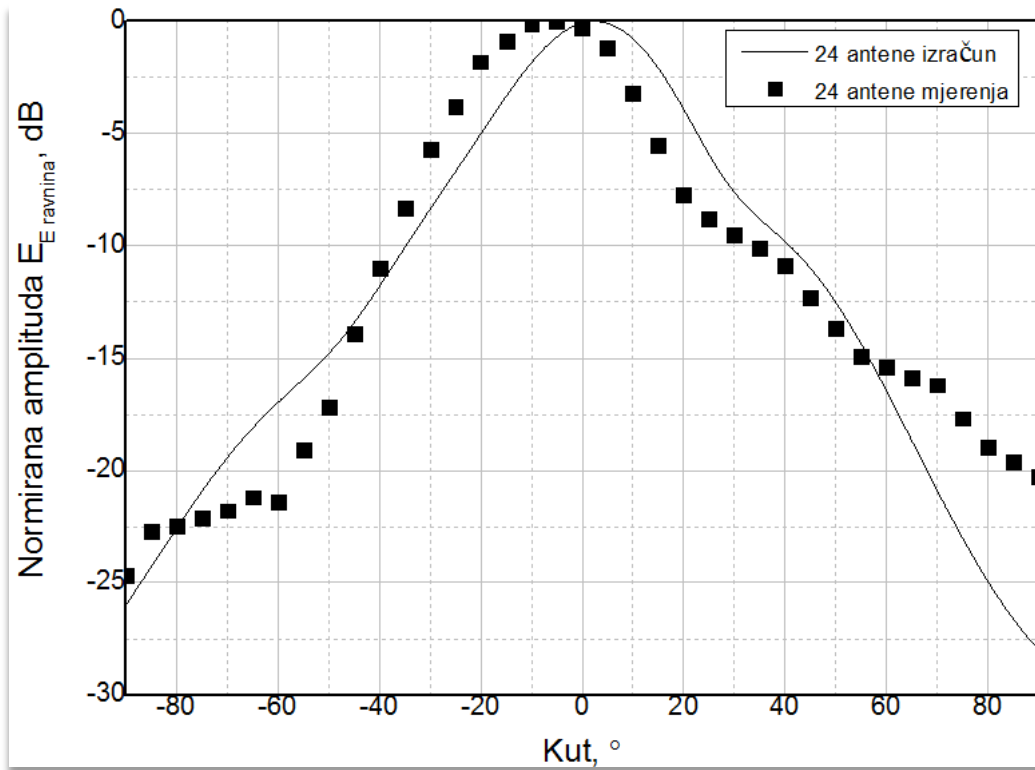
Slika 4.10. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 9 pobuđenih antenskih elemenata u H ravnini



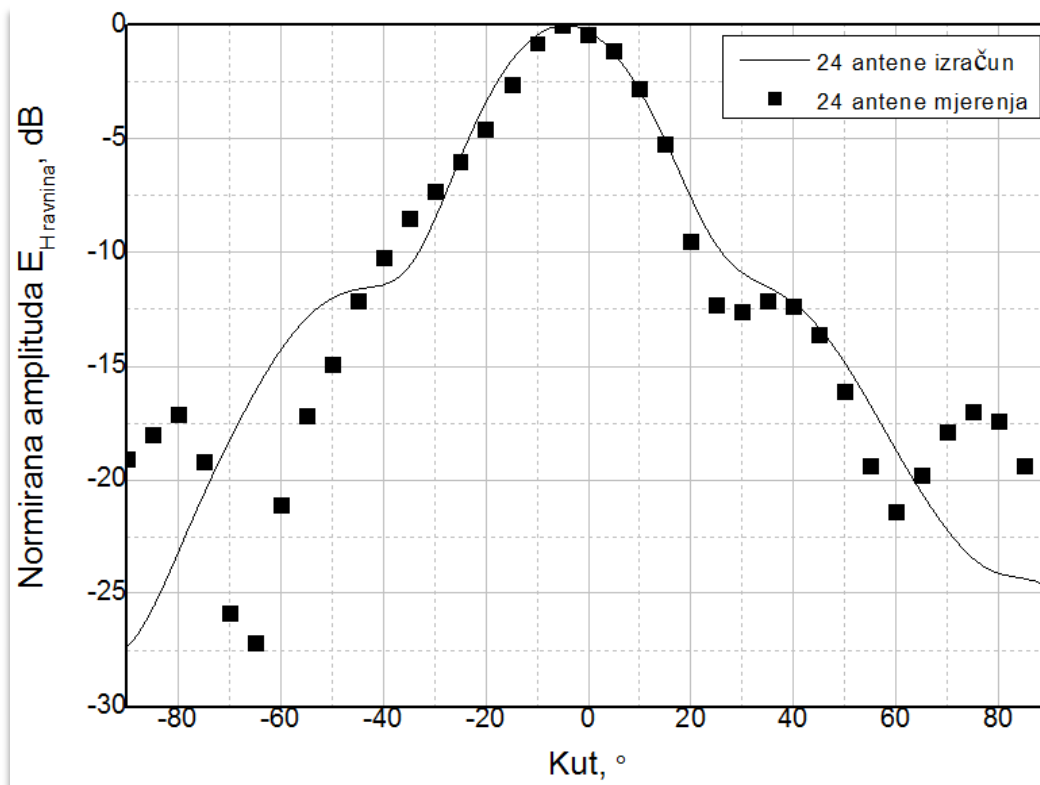
Slika 4.11. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 18 pobuđenih antenskih elemenata u E ravnini



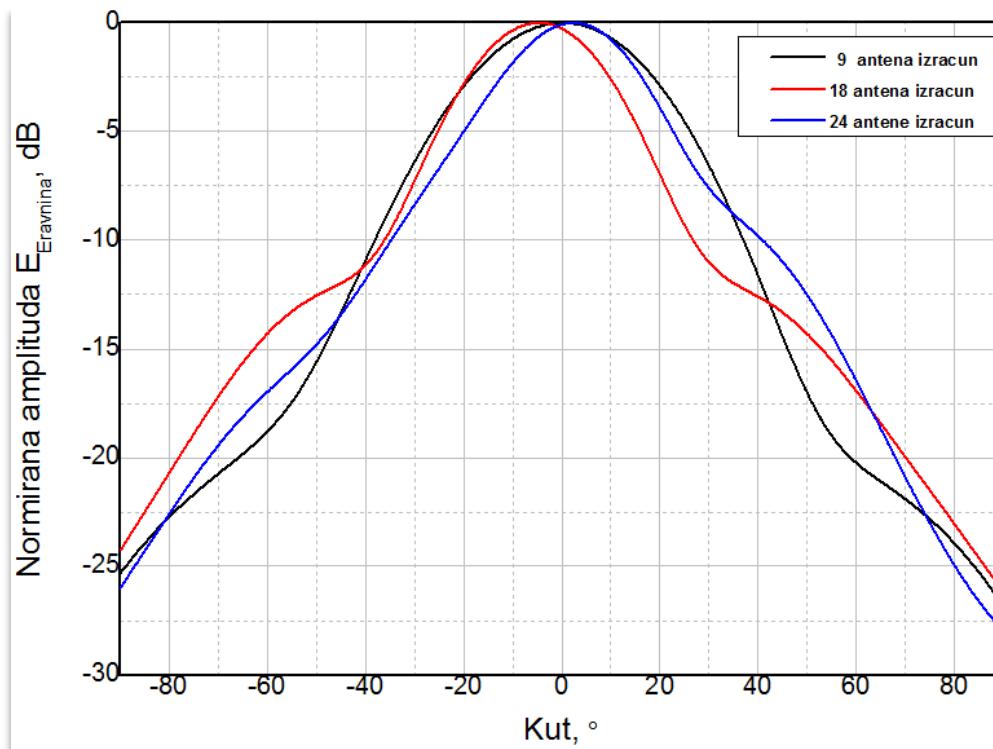
Slika 4.12. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 18 pobuđenih antenskih elemenata u H ravnini



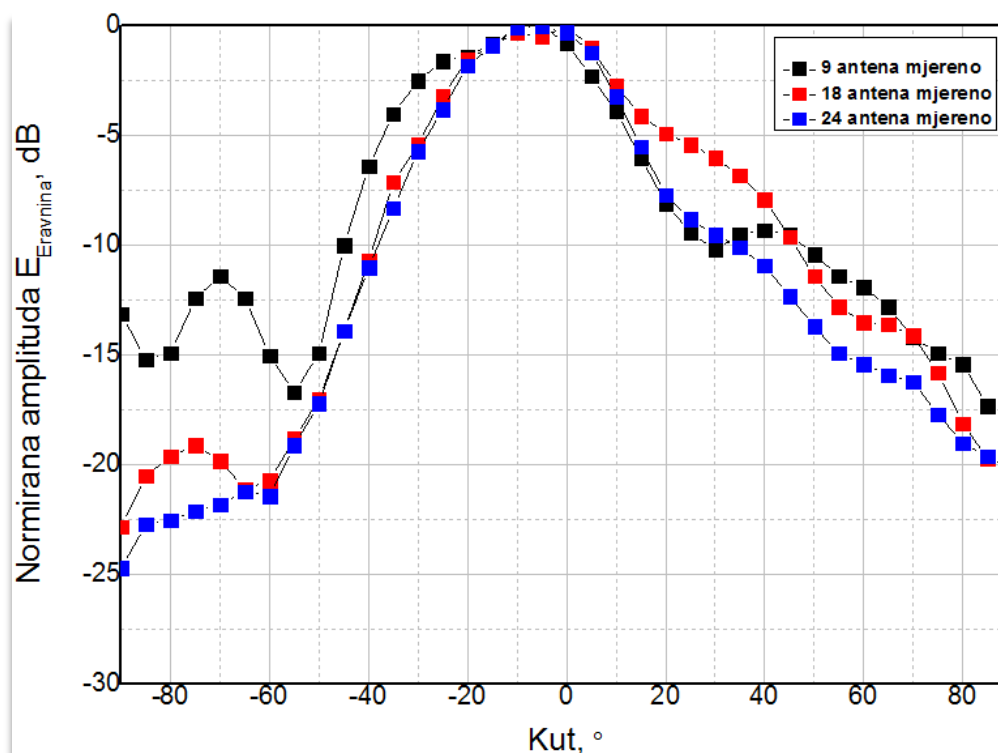
Slika 4.13. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 24 pobuđenih antenskih elemenata u E ravnini



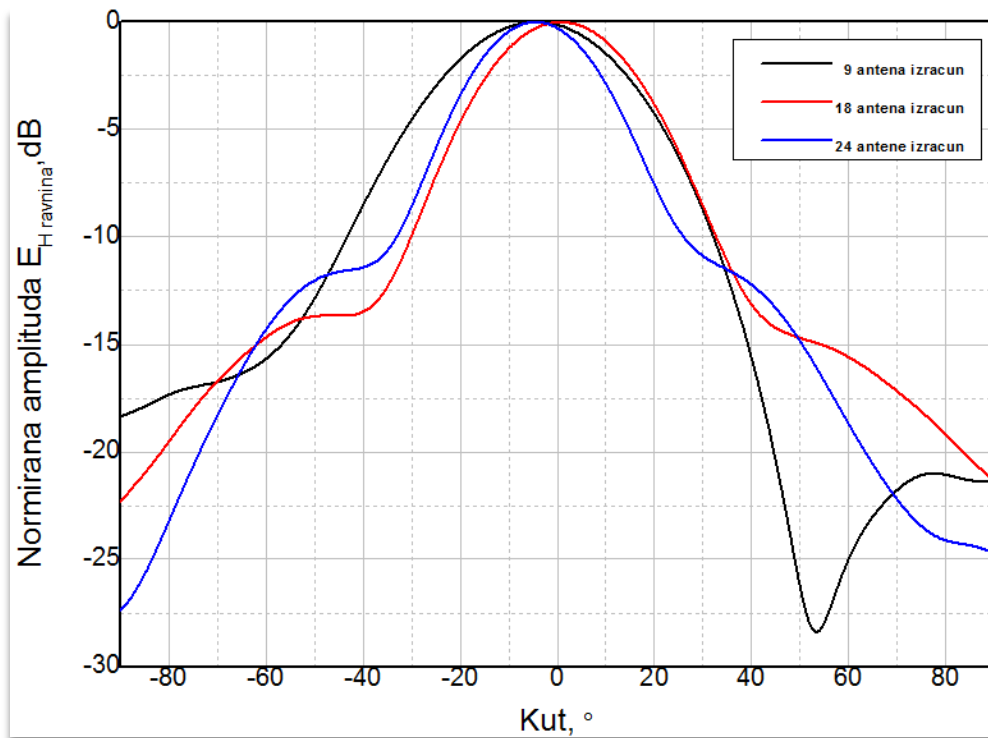
Slika 4.14. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja za 24 pobuđenih antenskih elemenata u H ravnini



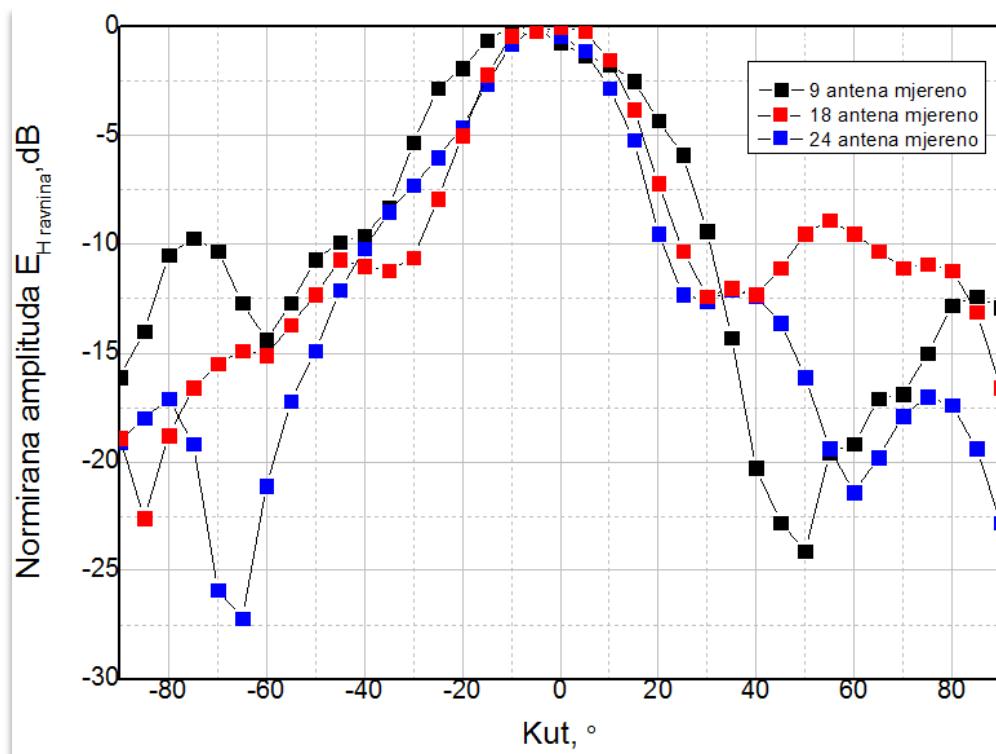
Slika 4.15. Skupni izračunati dijagrami zračenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u E ravni



Slika 4.16. Skupni izmjereni dijagrami zračenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u E ravni



Slika 4.17. Skupni izračunati dijagrami zračenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u H ravni



Slika 4.18. Skupni izmjereni dijagrami zračenja za 9, 18 i 24 pobuđena antenska elementa u H ravni

#### 4.7 Razmatranje rezultata mjerenja

Mjerenja su prikazana u grafičkom obliku, točnije prikazani su dijagrami zračenja antenskog niza za različite brojeve pobuđenih mikrotrakastih antena raspoređenih po polu sfernoj podlozi tvoreći oblik loksodroma. Svaki izmjereni dijagrami zračenja je uspoređen s izračunatim, na ovaj način je zorno prikazana razlika između teorijske i praktične realizacije antenskog niza.

Iz prikazanih dijagrama zračenja se može primijetiti kako se izmjereni i izračunati dijagrami ne poklapaju u potpunosti. Do odstupanja dolazi najviše kod većih kutova zakreta antenskog niza u pozitivnom i negativnom smjeru. Ovakva pojava se mogla i očekivati jer se uvijek pobuđuju antenski elementi počevši od središnjeg. Kod većih kutova do prijemne antene dolazi sve manja izračena snage, a ono što pristigne je podložno refleksijama i smetnjama. Najinteresantniji dio grafa u našim mjerenjima je onaj gdje je ujedno i najjače zračenje, a ti dijelovi grafa daju i zadovoljavajuće rezultate. Malo veće odstupanje u iscrtanim grafovima se pojavljuje na dijagramima sa slika 4.9 i 4.13. radi se o dijagramu zračenja u E ravnini za pobuđena 9 i 24 antenska elementa. Spomenuti dijagram zračenja imaju pomak u lijevu stranu. Razlog za ovakvu pojavu može biti u tome što predajna i prijemna antena nisu bile pravilno usmjerena jedna prema drugoj u početnom, nultom položaju. Svakako ne treba zanemariti niti male nepravilnosti u položajima postavljanja mikrotrakastih antena. Kao i pogreške mjernog instrumenta i njegova očitavanja.

Iz dobivenih dijagrama su izmjerene i širine glavnih latica na području -3dB. Širine glavne laticice su prikazane tablično u tablici 4.2., za svaki broj pobuđenih antena u E i H ravnini. Kutovi su prikazani za izračunate i izmjerene dijagrame zračenja.

BROJ POBUĐENIH ANTENA	ŠIRINA GL. LATICE -E, ° IZRAČUNATO	ŠIRINA GL. LATICE -E, ° IZMJERENO	ŠIRINA GL. LATICE -H, ° IZRAČUNATO	ŠIRINA GL. LATICE -H, ° IZMJERENO
9	42,3	39	45,8	38,5
18	32,25	35,4	32,7	29,4
24	30	32,3	27,9	26,9

**Tablica 4.1.** Širine glavnih latica na -3 dB

Širine glavne laticice su vrlo blizu izračunatim širinama, dolazi do manjih odstupanja, dok je u H ravnini primjetna bolja usmjerenost antenskog niza od izračunatog. Iz gornje tablice može se izvaditi zaključak kako je s povećanjem broja antenskih elemenata rasla i usmjerenost antenskog niza. Pobuđivanja većeg broja mikrotrakastih antena koje su udaljene od središnjeg elementa bez primjene faznog upravljanja ne bi mnogo doprinosile povećanju usmjerenosti.

## 5 ZAKLJUČAK

Zadatak ovoga diplomskog rada je bio izvesti laboratorijski model polusfernog loksodromskog antenskog niza sa sustavom pobude koji osigurava jednaku snagu svakome antenskom elementu niza bez unošenja promjena u amplitudi i faznom pomaku. Konformni antenski niz izrađen na metalnoj polusfernoj podlozi polumjera 0,3 m, sačinjen je od 32 mikrotrakaste kružne antene. Ove se antene odlikuju malim fizikalnim veličinama, jednostavnošću izrade i postavljanja, te niskom cijenom.

Primjena ove izvedbe antena kod kojih je pobuda izvedena pomoću koaksijalne linije, osigurava se na jednostavan način impedancijska prilagodba antene s pobudnom koaksijalnom linijom. Kružne mikrotrakaste antene niza su raspoređene po polusferi tvoreći geometrijski oblik loksodroma.

Antenski elementi niza su podešeni teorijskim izračunom za centralnu frekvenciju od 1.6 GHz, što je ustanovljeno premjeravanjem  $S_{11}$  za svaki antenski element. Centralna frekvencija izvedenih mikrotrakastih antena niza kreće se u opsegu od 1,60 do 1,624 GHz, što potvrđuje uspješnost u izvedbi antenskih elemenata. Vrijednosti koeficijenta refleksije  $S_{11}$  izvedenih antena kreće se u opsegu od -24,21 do -45,36 dB.

Ovakvim postavljenjem antenskih elemenata osigurava se znatno veća usmjerenost dijagrama zračenja niza u usporedbi s uniformnim (ikosaedarskim, koncentričnim i Leopardi) antenskim nizovima.

Na izrađenom antenskom nizu su izvršena mjerenja dijagrama zračenja za različiti broj pobuđenih antenskih elemenata. Ovu pobudu je omogućavao izrađeni djelitelj snage 1 na 32. Mjerenjem se ustanovilo da postoje pojedini izlazi koji daju ili nešto umanjenu ili uvećanu snagu. 24 izlaza su identična i oni su se koristili u mjerenjima. Pobuda antenskih elemenata loksodromskog niza je uvijek kretala od središnjih (polarnih). Dobiveni dijagrami zračenja su uspoređivani s izračunatim dijagramima. Ovi dijagrami (izračun - teorijski) dobiveni su računalnom rutinom, upravo za loksodromski niz, razvijenom na Zavodu za komunikacije Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku [2]. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja se u velikoj mjeri podudaraju, iako postoje izvjesna odstupanja, što je i za očekivati.

Iz provedenih mjerenja može se izvesti zaključak kako s povećanjem broja antenskih elemenata raste i usmjerenost antenskog niza. Pobuđivanja većeg broja mikrotrakastih antena koje su



udaljenije od središnjeg elementa bez primjene faznog upravljanja ne doprinosi u velikoj mjeri povećanju usmjerenosti. U izvedenom modelu loksodromskog niza postoje detalji koje bi se mogli dorađivati, kao što su: antene ujednačenih vrijednosti koeficijenta refleksije, antene koje bi pratile zakrivljenost podloge, pobudni sustav s manjim rasipanjem vrijednosti snage po izlazu i drugi, a na taj način bi se postigli još bolji rezultati.

Izrađeni model niza je pogodan za daljnja laboratorijska mjerenja, ali i za nadogradnju sa sklopom za fazno upravljanje nad svakim pobuđenim elementom niza.

## 6 LITERATURA

- [1] J. Prokop, J. Vokurka, "Šíření elektromagnetických vln a antény" SNTL/ALFA, Praha, 1980
- [2] S. Rupčić, V. Mandrić, K. Grgić " *Loxodromic Antenna Arrays Based On Archimedean Spiral*", J. J. Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, 2014.
- [3] WATERHOUSE, Rodney B. *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1-4020-7373-9. Fundamental Properties of Single Layer Microstrip Patch Antennas
- [4] M. Hase, "Návrh antény s kruhovou polarizací pro kmitočtové pásmo 2,4 Ghz" Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2008,  
< [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7990](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7990)>
- [5] Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2/E. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [6] E. Zentner, "Radiokomunikacije", Školska knjiga Zagreb, 1980.
- [7] J. Bartolić, "Mikrovalna elektronika", Graphis Zagreb, 2008.
- [8]<[http://www.qsl.net/va3iul/Homebrew\\_RF\\_Circuit\\_Design\\_Ideas/6dB\\_Resistive\\_Power\\_Splitter\\_DC4KU.gif](http://www.qsl.net/va3iul/Homebrew_RF_Circuit_Design_Ideas/6dB_Resistive_Power_Splitter_DC4KU.gif)>
- [9] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Fourth Edition, University of Massachusetts at Amherst,  
< [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7990](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7990)>
- [10] S. Rupčić, "Nizovi kružnih valovodnih antena na sfernim strukturama", Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [11] D. Pilski, "Zračenje sfernog antenskog niza – mjerenje dijagrama zračenja", Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2011.
- [12] PROCHÁZKA, M., "Antény – Encyklopedická příručka", Praha BEN – technická literatura, 2005.
- [13] <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/031/PD4W18-12.php>

## 7 SAŽETAK

### Loksodromski antenski niz za 1,6 GHz

Konformni antenski niz izrađen na metalnoj polu sfernoj podlozi sačinjen je od 40 jednakih antenskih elemenata mikrotrakaste izvedbe. Ove se antene odlikuju malim fizikalnim veličinama, jednostavnošću izrade i postavljanja, te niskom cijenom. Okrugle mikrotrakaste antene niza su raspoređene po polu sferi tvoreći geometrijski oblik loksodroma. Antenski elementi niza su građeni za centralnu frekvenciju od 1.6 GHz. Ovakvim postavljenjem antenskih elementi omogućuje se zakretanje glavne latice preko cijele hemisfere ( $360^\circ$ ), uz to da se dijagram zračenja ne mijenja, jednako kao i dobitak antene.

Kako bi se ovo postiglo potrebno je veliku pozornost usmjeriti na izradu identičnih mikrotrakastih antena, njihovu pravilnu raspodjelu po polu sferi kao i izvedbu pobude svih antenskih elemenata. Za pobudu većeg broja antenskih elemenata jednakom snagom u sklopu ovoga rada je izrađen djelitelj snage 1 na 32, Wilkinsonove izvedbe. Ovo djelilo snage osigurava svakom pobuđenom antenskom elementu jednaku snagu bez unošenja amplitudnih i faznih promjena.

Nad svakom mikrotrakastom antenom niza su izvršena mjerenja  $S_{11}$  parametra, ukoliko je došlo do odstupanja u parametrima vršio se prepravak u montaži antene ili je zamijenjena novom. Na napravljenome antenskom nizu za izvršena su mjerenja dijagrama zračenja za različiti broj pobuđenih antenskih elemenata. Dobiveni dijagrami zračenja su uspoređivani s izračunatim dijagramima zračenja u računalnom programu koji nije bio izrađen u sklopu ovoga rada. Izračunati i izmjereni dijagrami zračenja se u velikoj mjeri podudaraju, iako postoje izvjesna odstupanja. No ne treba zanemariti činjenicu da mjerenja nisu obavljena u komori bez prisutnosti elektromagnetskih smetnji.

#### **Ključne riječi:**

konformni antenski niz

loksodromski antenski niz

okrugle mikrotrakaste antene

djelilo snage

$S_{11}$  parametar

dijagram zračenja

## SUMMARY

### Loxodromic antenna array for 1,6 GHz

Conformal antenna array produced on a metal semi spherical surface is composed of 40 equal microstrip patch antenna elements of performance. These antennas are characterized by small physical sizes, simplicity of construction mounting and low cost. Round microstrip patch antenna array are distributed by semi sphere, forming a geometrical shape of loxodrom. The antenna array elements are built for the central frequency of 1,6 GHz. This way of pacing the antenna elements allows rotating of the main lobe throughout the hemisphere ( $360^\circ$ ), in addition to the radiation pattern does not change, as well as the antenna gain.

It is necessary to focus a lot of attention, in order to achieve that, on the creation of identical microstrip patch antennas, their proper placing by semi spherical as well as the performance of initiatives of all antenna elements. To excite a larger number of antenna elements with equal power, as part of this work was created power divider 1 to 32, Wilkinson performance. This power divider provides to each antenna elements the same power without entering amplitude and phase transition.

Over each microstrip patch antenna array have been determined  $S_{11}$  parametar, if there were deviations in the parameters, it was exercised the restatement in mounting the antenna or it was replaced by a new one. We have measured radiation pattern on this made antenna array for different number of excited antenna elements. The resulting radiation patterns are compared with the calculated radiation patterns in a computer program that was not developed as part of this study. Although there are some deviations, the calculated and measured radiation patterns are largely consistent. The fact that the measurements were not conducted in the chambre without electromagnetic interference it should not be ignored.

#### Key words:

Conformal antenna array

Loxodromic array

Round microstrip patch antennas

Power divider

$S_{11}$  parameter

Radiation patter

## 8 ŽIVOTOPIS

Tomislav Kral, rođen 30. rujna 1981. godine u Pakracu. Svoje školovanje započinje u Češkoj osnovnoj školi J.A. Komenskog u Daruvaru, po njenom završetku 1997. upisuje u Tehničkoj školi u Daruvaru srednjoškolsko obrazovanje smjera elektrotehničar.

2000. godine upisuje na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku stručni studij elektrotehnike, smjer elektronika. Nakon odslušanih predavanja, krajem 2003. godine upisuje na Pedagoškom fakultetu u Osijeku, Pedagoško-psihološku izobrazbu. Položivši sve ispite na oba dva fakulteta, točnije početkom školske godine 2004./2005. zapošljava se kao apsolvent i u Češkoj osnovnoj školi J.A. Komenskog u Daruvaru, na radno mjesto nastavnika matematike, kao nestručno zastupljen. Školske godine 2005./2006. prelazi raditi u Tehničku školu u Daruvaru, kao stručni nastavnik elektrotehničke skupine predmeta gdje radi i danas.

Stručni studij je završio 2006. godine, sljedeću godinu 2007. upisuje sveučilišni dodiplomski studij elektrotehnike, smjer Računarstvo i komunikacije.

Oženjen suprugom Anitom, imaju sina Nou starosti dvije godine.

Diplomski rad je radio pod vodstvom mentora doc.dr.sc. Slavka Rupčića.