

OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA NA SFERNOJ PODLOZI

Mandrić, Vanja

Doctoral thesis / Disertacija

2012

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:200:043747>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-21**

Repository / Repozitorij:

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



Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za komunikacije Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku.

Mentor: doc. dr. sc. Slavko Rupčić

Doktorska disertacija ima 237 stranica.

Disertacija br.: 18

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje, redovita profesorica
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet
2. doc. dr. sc. Slavko Rupčić, docent
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet
3. prof. dr. sc. Zvonimir Šipuš, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje, redovita profesorica
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet
2. doc. dr. sc. Slavko Rupčić, docent
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet
3. prof. dr. sc. Zvonimir Šipuš, redoviti profesor
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
4. prof. dr. sc. Tomislav Matić, docent
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet
5. prof. dr. sc. Radoslav Galić, redoviti profesor
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet

Datum obrane disertacije: 4. lipnja 2012. godine.

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Slavku Rupčiću za sav trud, vrijeme i pomoć koje je uložio kako bi se ova disertacija uspješno privela kraju; prof. dr. sc. Snježani Rimac-Drlje za svu podršku i pomoć tijekom poslijediplomskog studija i pisanja disertacije; prof. dr. sc. Zvonimiru Šipušu na razumijevanju kroz ovaj period, te hvala svima koji su bili uz mene kad je to trebalo.

Posebno se zahvaljujem mojoj majci Mirjani.

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

Vanja Mandrić

**OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA
NA SFERNOJ PODLOZI**

DOKTORSKA DISERTACIJA
OSIJEK, 2012.

SADRŽAJ:

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 5 |
| 2. ANTENE NA ZAKRIVLJENIM PODLOGAMA – KONFORMNE ANTENE | 6 |
| 2.1. POVIJESNI RAZVOJ KONFORMNIH ANTENA | 8 |
| 2.2. PODLOGE KONFORMNIH ANTENA | 13 |
| 2.3. BUDUĆNOST KONFORMNIH ANTENA | 16 |
| 3. KORIŠTENE METODE I ALGORITMI | 17 |
| 3.1. UVODNO RAZMATRANJE | 17 |
| 3.2. METODE KORIŠTENE PRI ANALIZI KONFORMNIH ANTENA | 17 |
| 3.2.1. Moment metoda | 17 |
| 3.2.1.1. Greenove funkcije | 20 |
| 3.2.1.2. Određivanje Greenove funkcije sferne strukture u spektralnoj domeni | 22 |
| 3.2.2. Spektralna metoda | 25 |
| 3.3. METODE I ALGORITMI KORIŠTENI PRI OPTIMIZACIJI I SINTEZI | 27 |
| 3.3.1. Metoda direktnog pretraživanja prostora | 28 |
| 3.3.2. Optimizacijski algoritam roja čestica – PSO | 29 |
| 4. ELEMENTARNE ANTENE SFERNIH KONFORMNIH NIZOVA | 32 |
| 4.1. VALOVODOM POBUĐENE OTVOR ANTENE | 32 |
| 4.1.1. Određivanje ekvivalentnih struja | 35 |
| 4.1.2. Zračenje valovodom pobuđenog otvora na sfernoj podlozi | 39 |
| 4.2. MIKROTRAKASTE ANTENE | 40 |
| 4.2.1. Zračenje mikrotrakaste antene na sfernoj podlozi | 43 |
| 4.3. ZRAČENJE ANTENSKOG NIZA NA SFERNOJ PODLOZI | 50 |
| 4.4. KONFIGURACIJE ELEMENTARNIH ANTENA | 52 |
| 4.4.1. Ikosaedarska konfiguracija | 52 |
| 4.4.2. Spiralna konfiguracija | 55 |
| 4.4.3. Leopardi konfiguracija | 56 |

| | |
|--|-----|
| 5. OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA NA SFERI, PO POJEDINAČNIM PARAMETRIMA, KORIŠTENJEM METODE <i>DIREKTOG PRETRAŽIVANJA SVEUKUPNOG PROSTORA</i> | 61 |
| 5.1. IKOSAEDARSKA KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA | 65 |
| 5.1.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 66 |
| 5.1.2. Utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 69 |
| 5.1.3. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 74 |
| 5.1.4. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 77 |
| 5.1.5. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja – ciljnu funkciju | 80 |
| 5.2. SPIRALNA KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA | 86 |
| 5.2.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 87 |
| 5.2.2. Utjecaj promjene pomaka elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 88 |
| 5.2.3. Utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 90 |
| 5.2.4. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 94 |
| 5.2.5. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 97 |
| 5.2.6. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja – ciljnu funkciju | 101 |
| 5.3. LEOPARDI KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA | 106 |
| 5.3.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja – ciljnu funkciju | 107 |
| 5.3.2. Utjecaj promjene rasporeda na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 112 |
| 5.3.3. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 116 |
| 5.3.4. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 120 |
| 5.3.5. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja - ciljnu funkciju | 123 |

| | |
|---|-----|
| 5.4. SKUPNA ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA GEOMETRIJE I POBUDE NA DIJAGRAM ZRAČENJA KORIŠTENJEM METODE DIREKTOG PRETRAŽIVANJA PROSTORA | 129 |
|---|-----|

6. OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA NA SFERI KORIŠTENJEM PSO ALGORITMA

132

6.1. IKOSAEDARSKA KONFIGURACIJA

132

6.1.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

132

6.1.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

135

6.2. LEOPARDI KONFIGURACIJA

139

6.2.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

139

6.2.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

145

6.3. SPIRALNA KONFIGURACIJA

151

6.3.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

151

6.3.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

154

7. SINTEZA DIJAGRAMA ZRAČENJA SLOBODNE KONFIGURACIJE ANTENSKIH ELEMENATA KORIŠTENJEM PSO ALGORITMA

162

7.1. SINTEZA NIZA UZ PROMJENU GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NIZA

163

7.2. SINTEZA NIZA UZ PROMJENU GEOMETRIJSKIH I POBUDNIH PARAMETARA NIZA

167

7.2.1. Promjena geometrijskih parametara, te amplitude kao parametra pobude

167

7.2.2. Promjena geometrijskih parametara, te amplitude i polarizacije kao parametara pobude

171

| | |
|--|-----|
| 8. VERIFIKACIJA TEORIJSKOG MODELA EKSPERIMENTALNIM MJERENJIMA | 177 |
| 9. ZAKLJUČAK | 206 |
| PRILOG I | 209 |
| PRILOG II | 213 |
| PRILOG III | 214 |
| POPIS SLIKA | 217 |
| POPIS TABLICA | 225 |
| LITERATURA | 228 |
| SAŽETAK | 233 |
| SUMMARY | 234 |
| ŽIVOTOPIS | 235 |
| BIOGRAPHY | 236 |
| KLJUČNE RIJEČI / KEY WORDS | 237 |

1. UVOD

U zadnja dva desetljeća interes za višeantenske sustave značajno raste. Kako se zahtjevi za povećanjem kapaciteta bežičnih komunikacija povećavaju uz ograničen frekvencijski spektar, pojavljuje se ključan problem proširenja kapaciteta bežičnih komunikacijskih sustava bez stvarnog povećanja spektra. Višeantenski sustavi pružaju tu mogućnost.

Razvoj tehnologije, posebice kad se radi o mobilnim i satelitskim komunikacijama, zahtijeva odgovarajući pristup antenskim sustavima koji se primjenjuju u ovakvim slučajevima. Jedan od najvažnijih višeantenskih sustava jesu konformni antenski nizovi. Međutim, ovi nizovi nisu dovoljno istraženi. Antenski nizovi koji su istraživani i analizirani, a time i dobro poznati jesu nizovi antenskih elemenata montirani na ravne ili planarne površine. Kako ovi nizovi ne mogu ispuniti nove zahtjeve koji se na antenske nizove postavljaju, potreba za antenskim nizovima na zakrivljenim površinama – konformnim antenama (mikrotrakaste antene, otvor antene..) postaje ultimativna.

Konformne antene su antene koje imaju mogućnost prilagodbe podlozi ili površini na kojoj se nalaze. Ako se na takvoj zakrivljenoj podlozi postavi više antena određenih karakteristika, formira se konformni antenski niz. Antenske elemente ovih antenskih sustava mogu činiti različite antene kao što su otvor antene napajane valovodom, mikrotrakaste, dipol, helikoidalne i mnoge druge.

Ovaj rad analizira otvor antenu napajanu valovodom kružnog presjeka, antenski niz istih, te kružnu mikrotrakastu antenu, kao i pripadajući niz.

Rad se sastoji iz devet poglavlja i tri priloga.

Drugo poglavlje uvodi i predstavlja konformne antene, kao i njihov značaj kroz povijest do danas, te kakva će im biti uloga u budućnosti.

Treće poglavlje objašnjava metode koje se koriste u analizi konformnih antena (odnosi se na moment i spektralnu metodu), te metode i algoritme korištene pri optimizaciji i sintezi dijagrama zračenja takvih antena (metoda direktnog pretraživanja prostora i PSO algoritam).

Četvrti dio govori o dvije vrste konformnih antena – otvor antene pobuđene kružnim valovodom i o mikrotrakastim antenama kružnog presjeka. Detaljnije se opisuju neke od osnovnih konfiguracija niza – ikosaedarska, spiralna i Leopardi konfiguracija.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Peto i šesto poglavlje obrađuju optimizaciju dijagrama zračenja antenskih nizova raspoređenih po pravilima gore navedenih konfiguracija uz upotrebu Fortrana i PSO algoritma kao alata unutar Matlab2009b programa.

Sedmo poglavlje bavi se sintezom dijagrama zračenja slobodne konfiguracije antenskih elemenata uz upotrebu PSO algoritma.

Osmo poglavlje verificira teorijski model eksperimentalnim mjerenjima.

Nakon zaključka, na redu su prilozi u kojima su dani rasporedi antena na sferi za svaku konfiguraciju posebno, a za sam kraj ostavljen je popis slika i tablica koje se nalaze u disertaciji.

2. ANTENE NA ZAKRIVLJENIM PODLOGAMA – KONFORMNE ANTENE

Konformne antene su antene koje se svojim oblikom prilagođavaju površini na koju se montirane. Ta površina može biti dio aviona, rakete, vlaka ili nekog drugog vozila. Bitno je konstruirati antenu koja će biti integrirana u strukturu i neće uzrokovati veliki otpor [1].

Prema IEEE Std 145-1993. standardu (*eng.* IEEE Standard Definition of Terms for Antennas), konformne antene (konformni niz) su antene ili antenski niz koji se prilagođuje podlozi, a razlog često ne mora biti elektromagnetske prirode; npr., razlog može biti aerodinamičnost ili hidrodinamičnost podloge [1].

U konformne antene u širem smislu spadaju antenski nizovi s antenskim elementima na zakrivljenim podlogama. Ipak, u užem smislu u konformne antene ubrajaju se antene na stožastim, cilindričnim i sfernim podlogama (pod ovaj pojam spadaju i antene montirane na/u zakrivljene podloge i nekanonskog oblika). Kod ovih antena zračeci elementi su montirani na ili integrirani u zakrivljenu površinu.

Tablica 2.1. Parametri i karakteristike planarnih i konformnih nizova [1]

| Parametri | Planarni niz | Konformni niz |
|---------------------------------|--|---|
| Tehnologija | Razvijena | Nepotpuno razvijena |
| Alat za analiziranje | Dostupan | U postupku razvijanja |
| Upravljanje dijagramom zračenja | Obično je dovoljno fazom, fiksne amplitude | Amplitudno i fazno, kompliciranije |
| Polarizacija | Može se koristiti jednostruka, poželjna dualna | Zahtijeva se upravljanje polarizacijom |
| Dobitak | Opada s povećanjem kuta skeniranja | Upravljan, ovisi o obliku podloge |
| Širina frekvencijskog područja | Uobičajeno 20% | Šira nego kod planarnih nizova |
| Kutna pokrivenost | Ograničena na $\pm 60^\circ$ | Vrlo široka, cijela sfera |
| RCS | Veliki | Manji od planarnog |
| Instalacija na platformi | Ograničena | Strukturalna integracija elemenata |
| Antenski plašt | Javlja se efekt aberacije | Nema uobičajenog plašta |
| Kompaktnost sklopova | Konvencionalna rješenja | Male dimenzije, ugrađeni u antenski niz – pristup „inteligentne kože“ |

Osnovna razlika između konformnih i planarnih antena leži u njihovoj geometriji i rasporedu elemenata. Ako je planarni niz u pitanju, antenski elementi mogu se rasporediti u mrežu i to često u pravokutni ili trokutasti oblik. Takav se niz može analizirati i kao beskonačni niz, za što postoje poznate metode analize. No, takve antene imaju više mana, primjerice širina frekvencijskog pojasa i maksimalni kut zakretanja su ograničeni. Nadalje, ako su antenski elementi razmaknuti za manje od polovice valne duljine, sprega raste i narušava se dijagram zračenja, a ako je ta udaljenost veća, maksimalni kut skeniranja ograničava se pojavom više glavnih latica. Nadalje, dobitak opada s povećanjem kuta skeniranja [2]. Usporedna tablica 2.1. daje pregled osnovnih razlika planarnih i konformnih nizova po najvažnijim parametrima.

Zbog niza prednosti koje konformne antene imaju nad planarnim antenama one sve više pronalaze primjenu u mobilnim i satelitskim komunikacijama, te vojnoj industriji, odnosno u svim područjima u kojima je potrebno jednostavno zakretanje glavne latice niza uz vrlo visoku kutnu pokrivenost.

Planarni antenski niz ima nedostatak ograničenog elektroničkog pomaka glavne latice (do oko 60° stupnjeva od normale – Tablica 1.), a također i dobitak opada sa zakretnim kutom glavne

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

latice. Kod konformnog niza kutna pokrivenost je cijela sfera, a dobitak ne opada sa zakretanjem glavne latice. Sferni nizovi mogu usmjeriti jednu ili više zraka preko cijele hemisfere, te su kao takvi pogodni za praćenje satelita, u telemetriji, upravljačkim procesima i raznim drugim sustavima [2], [3].

2.1. POVIJESNI RAZVOJ KONFORMNIH ANTENA

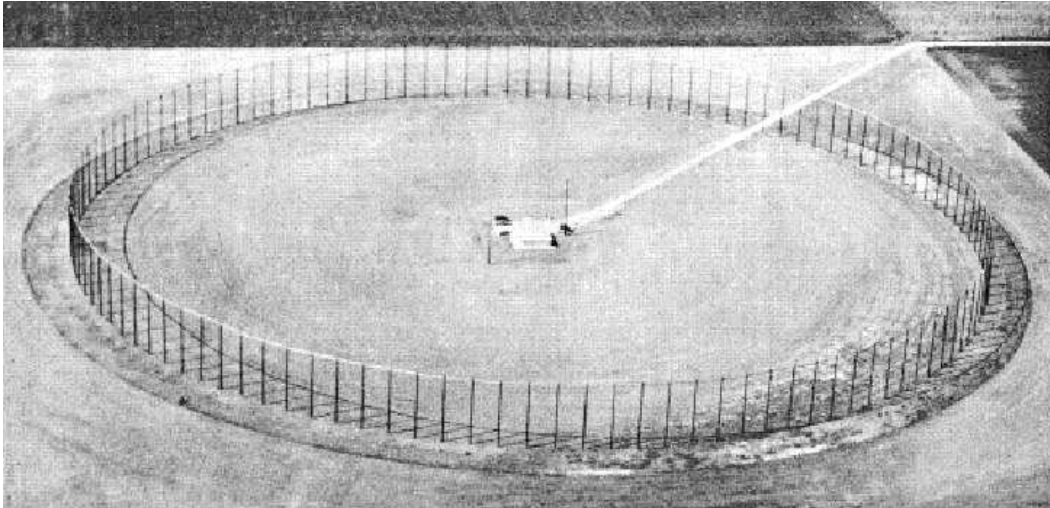
Područje fazno upravljanih nizova bilo je vrlo zanimljivo područje za istraživanje u periodu od Drugog svjetskog rata do otprilike 70tih godina prošlog stoljeća. U tom periodu, osnovna istraživanja rađena su i u kontekstu konformnih antena. No, elektronički skenirani, fazno upravljani nizovi nisu našli široku primjenu sve dok nisu postali dostupni alati za napajanje i upravljanje dijagramom zračenja antenskih nizova. Tehnologija integriranih krugova (*eng.* integrated circuits - IC) uključujući monolitske mikrovalne integrirane krugove (*eng.* monolithic microwave integrated circuits - MMIC) popunila je ovu prazninu, pružajući tehnička rješenja relativno niskih troškova čak i za dosta kompleksne antenske nizove. Bitan faktor također je bio razvoj digitalnih procesora koji mogu velikom brzinom obrađivati informacije koje šalju takvi antenski sustavi. Uz sve to, tehnike digitalnog procesiranja učinile su fazno upravljane antenske nizove cjenovno pristupačnijim.

Zadnjih dvadesetak godina numeričke tehnike, elektromagnetske metode za analiziranje, a također i razumijevanje antena na zakrivljenim površinama uvelike su poboljšane. Značajan napredak dogodio se kad su u pitanju visokofrekvencijske tehnike uključujući analizu difrakcije površinskih valova i modeliranje zračećih izvora na zakrivljenim površinama.

Počeci konformnih antena sežu u tridesete godine prošlog stoljeća kada su antenski elementi – dipoli kružno poredani tvoreći kružni niz, a analizu je dao Chireix 1936. godine. Kasnije, pedesetih godina objavljena su neka istraživanja na istu temu, npr., Knudsen 1953. Kružni niz postao je zanimljiv zbog svoje rotacijske simetrije. Odgovarajuće fazno upravljanje može dati usmjereno zračenje koje može skenirati područje od 360° u azimutalnoj ravnini. Primjenu je nalazilo u radiodifuziji, komunikacijama, a kasnije u navigaciji i otkrivanju smjera (*eng.* direction finding) dolazećeg signala (za vrijeme Drugog svjetskog rata u Njemačkoj).

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Takve antene, promjera oko 100 m, nazvane su Wullenweber antene. Nakon rata eksperimentalni Wullenweber niz razvijen je na Sveučilištu Illinois (Slika 2.1.). Ovaj je niz imao 120 zračćih elemenata postavljenih ispred reflektirajućeg zaslona. Promjer niza bio je oko 300 m [1], [4].



Slika 2.1. Eksperimentalna 300 m Wullenweber antena na Sveučilištu Illinois [1].

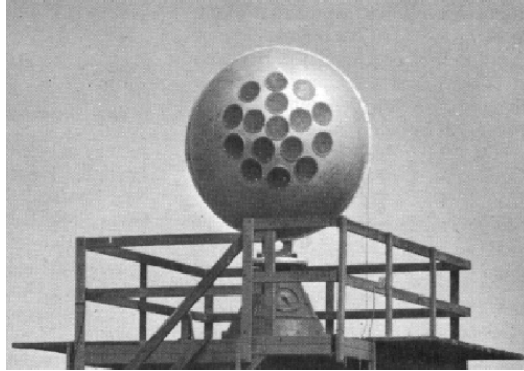
S ciljem povećanja usmjerenosti i sužavanja dijagrama zračenja, nekoliko kružnih nizova može biti smješteno jedan na drugi. Primjer takvoj anteni jest elektronički skeniran TACAN (*eng.* tactical navigation) antena, čiju analizu daju Christopher 1974 i Shestak 1974., a primjenu nalazi u zrakoplovstvu.

Jim Wait obrađivao je zračenja iz otvora na kružnim cilindrima 1959. godine, a rezultati su dani u knjizi 'Elektromagnetsko zračenje cilindričnih struktura' [1], [5], čime je započelo proučavanje kružnih cilindričnih i konusnih struktura, koje predstavljaju antene na glatkim površinama tj., konformne antene. Mnogi drugi istraživači (Hessel 1970., Pathak 1980.) nadovezuju se na njegov rad.

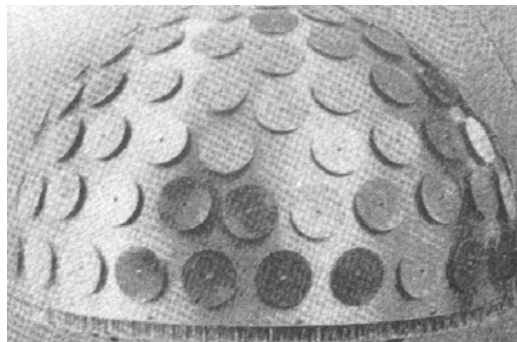
Slika 2.2. prikazuje sferu s kružno polariziranim helikoidalnim antenskim elementima napravljenu šezdesetih godina prošlog stoljeća koja je detaljno analizirana i laboratorijski izmjerena od strane D.L.Sengupte i dr., [6], [7] i [8].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

1977. i 1979. godine analiziran je niz sa 120 kružnih mikrotrakastih antena montiranih na polusfernoj metalnoj podlozi uz istodobno aktiviranje 12 elemenata radi pomaka skenirajućeg snopa [9], [10] – Slika 2.3.



Slika 2.2. Niz od 16 helikoidalnih antena smještenih na sferi (0.6 – 3 GHz) [7].



Slika 2.3. Niz kružnih mikrotrakastih antena na polusferi [9], [10].

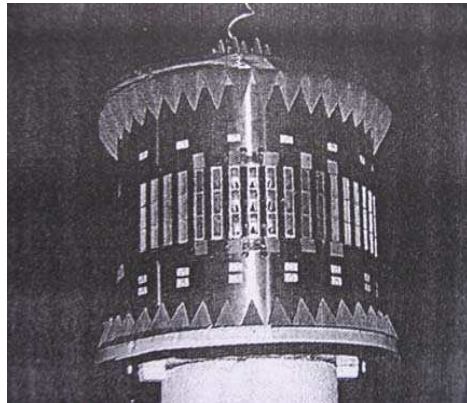
Nakon intenzivnog razvoja konformnih antena iz razdoblja šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog stoljeća, interes se polako počinje smanjivati, a broj antena koje su bile u upotrebi je vrlo mali. Razlozi leže u kompleksnosti i visokim zahtjevima za izvedbu, slabim karakteristikama tadašnjih računala, prilično zahtjevnoj analizi konformnih antena, a karakteristike izvedenih antena tog perioda nisu bile zadovoljavajuće.

Devedesetih godina počinje se ponovo buditi interes za ovu vrstu antena. Značajan je napredak tehnologije, ali se sad javljaju problemi nedostatka alata za dizajniranje, dizajnersko iskustvo za analizu takvih problema, problemi napajanja konformnih nizova, polarizacije, sprege i drugi [2].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

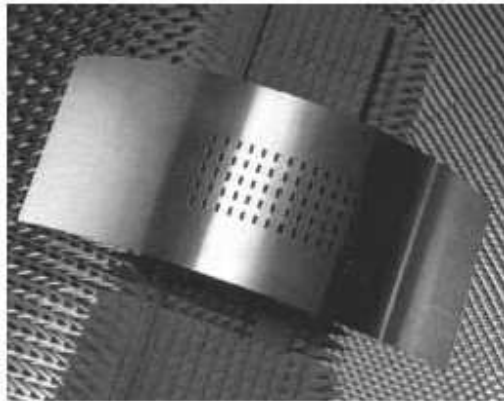
Krajem devedesetih i početkom dvijetisućitih pojavljuju se pojedinačni slučajevi izvedbe i analize konformnih (cilindričnih, konusnih i sfernih) antena.

P. Persson i drugi 1998. i 1999. rade na kružnoj cilindričnoj anteni s 54 valovodna otvora (Slika 2.4.) - a-b. – Ericsson Microwave System AB in Mölndal, Sweden [11].



Slika 2.4. Valovodni antenski niz na kružnoj cilindričnoj podlozi [11].

H. J. Visser i dr. 1999. izrađuju antenu cilindričnog oblika kao demonstrator za analizu konformnih antena (Slika 2.5.) [12] – TNO Physics and Electronics Laboratory, Netherland.

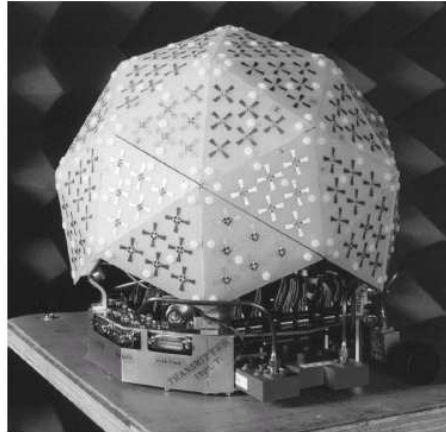


Slika 2.5. Cilindrični demonstrator [12].

Još jedan niz čiji doseg pokrivanja prelazi i granice hemisfere koristi se u području satelitskih komunikacija – mobilna jedinica, prikazana je na Slici 2.6. – Roke Manor Research 2002. Antena je koncipirana kao antenski niz na dodekaedru koji se sastoji od 40 identičnih

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

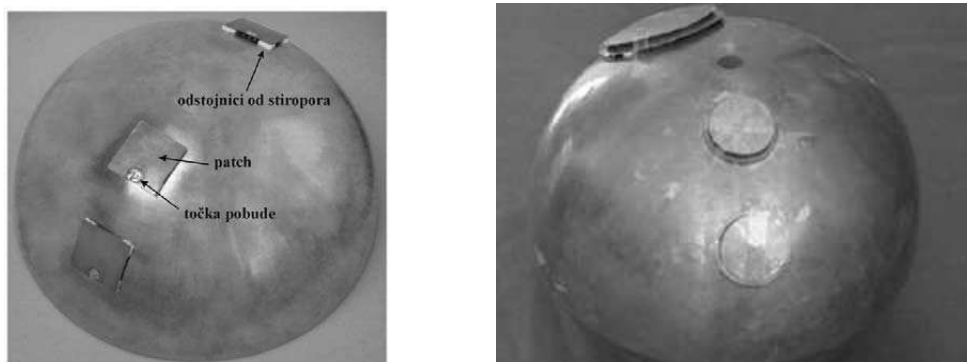
trokuta, od kojih svaki sadrži 6 križnih dualno polariziranih dipolnih elemenata za pokrivanje 360° po azimutu i od -10° do 90° po elevaciji [1].



Slika 2.6. Aktivna antena sa 6 dualnopolariziranih dipolnih elemenata po stranici [1].

Kako je i prije spomenuto, oskudni su rezultati analize konformnih antena, kako valovodnih, tako i mikrotrakastih antenskih elemenata smještenih na sfernu podlogu. Z. Šipuš i drugi 2001. – analiziraju valovodni antenski niz na cilindričnoj površini - Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za VF elektroniku, Hrvatska.

N. Burum i drugi 2002. i 2004., Z. Šipuš i drugi 2003., 2006. i 2007. – Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za VF elektroniku, Hrvatska – izgrađen je i analiziran antenski niz na sfernoj površini čiji su antenski elementi mikrotrakaste antene s parazitnim rezonatorom (Slika 2.7.) [13], [14].



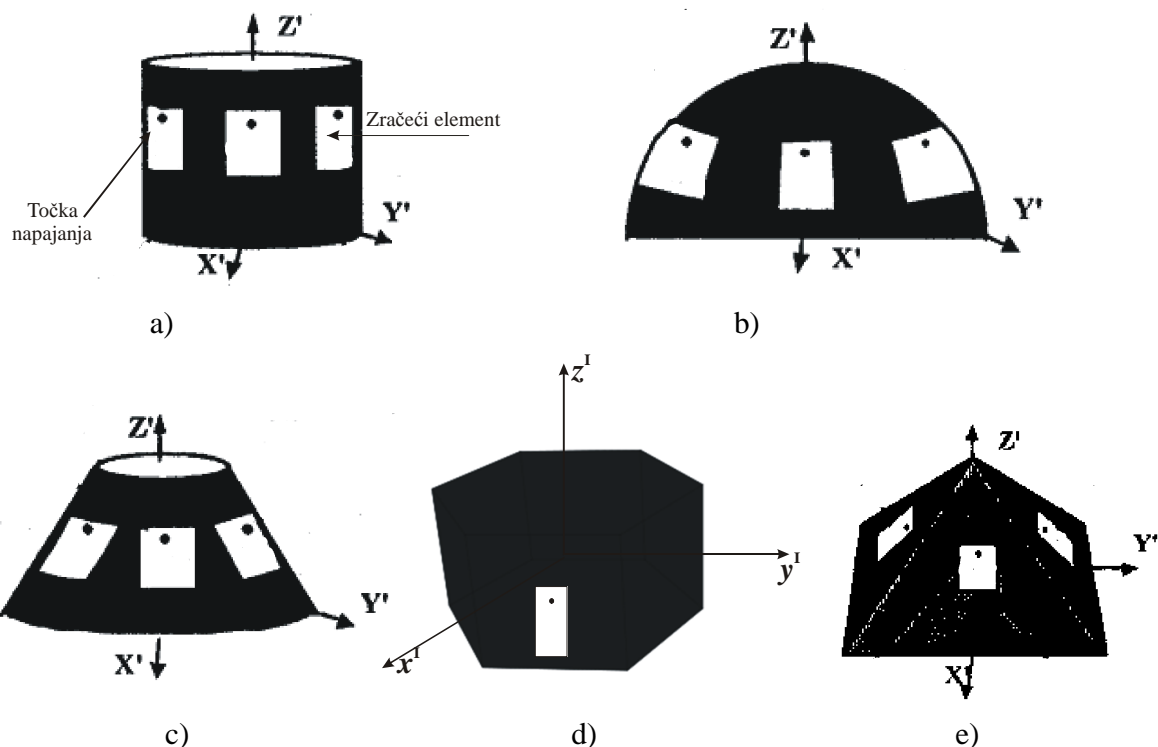
Slika 2.7. Eksperimentalne mikrotrakaste antene na polusferi [13], [14], [15], [16].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Konformne antene najviše se počinju razvijati početkom 21. stoljeća, a primjena im se širi iz satelitskih i vojnih komunikacija u automobilsku i zrakoplovnu industriju [2].

Problemi koji se i dalje javljaju pri izvedbi konformnih antena su komplicirana matematička analiza zbog različitih oblika površina konformnih antena i u slučajevima gdje ne postoji simetrija u distribuciji antenskih elemenata. Zatim, polarizacija treba biti kontrolirana zbog pojedinačne usmjerenosti svakog elementa niza. Izvedba ovakvih elemenata nije jeftina, jer je potrebno osigurati upravljačku elektroniku koja se treba nalaziti u pozadini takve antene. U svakom slučaju, analiza i izvedba konformnih antena nije razvijena u potpunosti i ovaj bi rad trebao doprinijeti pri rješavanju nekih od problema koji su nezaobilazni kod ovakvih vrsta antena.

2.2. PODLOGE KONFORMNIH ANTENA



Slika 2.8. Moguće podloge konformnih antenskih nizova: I. S glatkim zakrivljenim ploham: a) cilindar; b) sfera (polusfera); c) stožac; II. S planarnim ploham: d) prizma; e) piramida [55].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

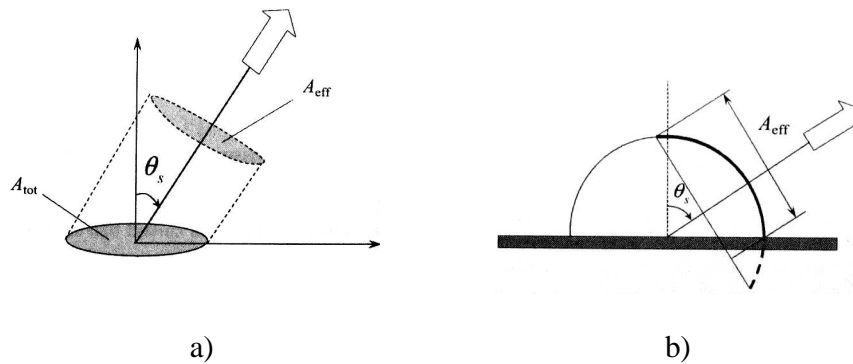
Uobičajena konformna antena sastoji se od zračćih elemenata ravnomjerno raspoređenih na zakrivljenoj površini. Ovo je slučaj kada oblik zračćeg elementa prati zakrivljenost površine. Drugi slučaj je kada su antenski elementi ugrađeni i raspodijeljeni na zakrivljenoj površini, ali ne prate zakrivljenost podloge (planarne mikrotrakaste antene, dipoli, spiralne antene i sl.). Treći slučaj je slučaj kad su antenski elementi ugrađeni na veće planarne podloge koje aproksimiraju konformni oblik, na jednoj planarnoj površini smješteno je više zračćih elemenata.

Ako je u pitanju prvi ili drugi slučaj, ovisno o broju i rasporedu trenutno aktivnih elementarnih izvora, dio aktivne površine aktiviran je onoliko vremena koliko je potrebno da snop skenira dio prostora koji ta površina pokriva. U tom slučaju nema ni potrebe za usklađenim aktiviranjem radi prijelaza na susjedne podloge, već usklađeno fazno upravljanje snopom koji skenira. U posljednjem slučaju, svaka od površina aktivna je onoliko koliko je potrebno da snop skenira dio prostora koji ta površina pokriva. Oblik aproksimirane podloge, te usklađeno aktiviranje i prijelaz sa susjednih planarnih podloga, osiguravaju široki kut pokrivanja ovakvog niza [1], [2].

Cilindar na Slici 2.8. a) i šesterostrana prizma e) pogodni su za dvodimenzionalnu pokrivenost u jednoj ravnini (360°). Polusfera b) i piramida e) mogu poslužiti za pokrivanje cijele hemisfere [1].

Slika 2.8. prikazuje neke od mogućih slučajeva konformnih nizova s tim da je zračći element prikazan kao mikrotrakasta antena.

Maksimalni kut skeniranja planarnih nizova kreće se između 60° i 70° prema normali, Slika 2.8. a). Razlog tomu je proširenje snopa glavne latice, te varijacije impedancije antenskih elemenata zbog sprege. Pri većim kutovima skeniranja planarnog niza od navedenih, dolazi do gubitka uslijed neusklađenosti, što se, naravno, odražava na dobitak antene. Opadanje dobitka varira sa smanjenjem projekcije površine antene A_{tot} na ravninu okomitu na smjer skeniranja, što predstavlja efektivno smanjenje površine niza na vrijednost A_{ef} [1], [2].



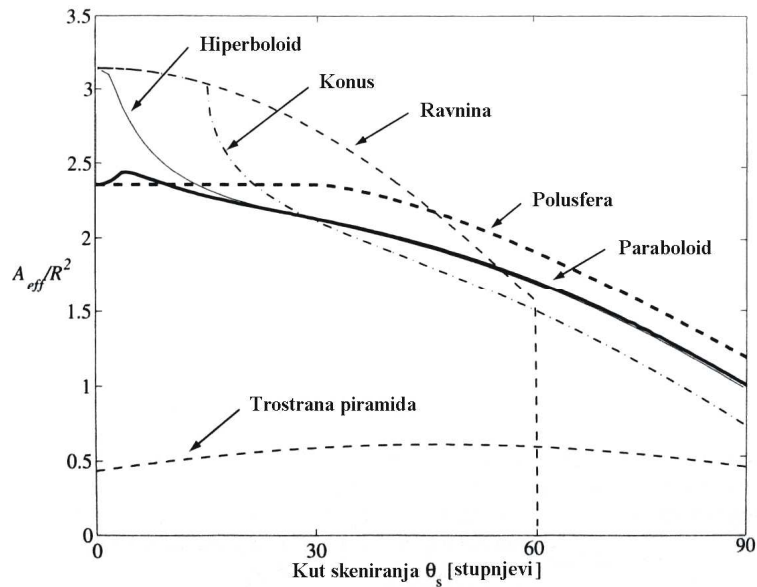
Slika 2.9. Efektivna površina i kut skeniranja: a) planarni niz i b) sferni niz (polusfera ili polucilindar) [1].

Efektivna površina zakrivljenog, konformnog niza jest projekcija aktivnog dijela niza na ravninu okomitu na smjer skeniranja (Slika 2.9. b)). Kod konformnog niza moguće je i fazno skeniranje prostora na način zadržavanja fiksnog aktivnog sektora i fazno skeniranje sve dok susjedni sektor ne postane aktivan.

Ipak, češći je slučaj upravljanja snopom, pri čemu je zakrivljeni prostor skeniran pomicanjem aktivnog područja niza u malim koracima od najmanje jednog elementa. Pri tom se mora voditi računa o faznom usklađenju pobude aktivnih elemenata po cijelom aktivnom području radi postizanja identičnog snopa u svim smjerovima koje niz pokriva [1].

Kada je riječ o obliku konformnih antena, razlikuju se po zakrivljenosti i po nagibu strana, a promatra se minimum efektivne površine unutar područja skeniranja. No, stvarni su zatjevi često detaljniji i različitih težina za različita područja pokrivanja [1].

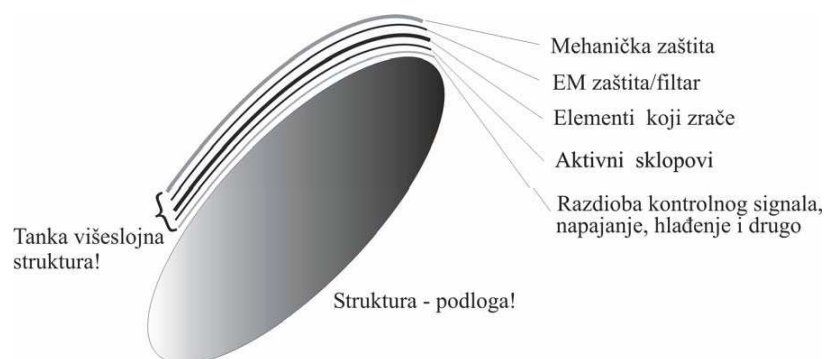
Sažeti prikaz različitih oblika konformne strukture (podloge) i njihova mogućnost iskorištenja raspoložive veličine ($2R$ je promjer baze promatranog slučaja) dan je Slikom 2.10. gdje je za usporedbu uključen hiperbolni oblik i planarni slučaj. U svim situacijama, osim za piramidu i planarni oblik, odnos visine i polumjera baze jest $h/R = 1$. Hiperboloid ima ekscentricitet $e = 1.1$ i može se lako vidjeti da performanse ovise o obliku konformne strukture. Kod piramide je slaba iskoristivost područja baze. Jedna planarna površina (ravnina) vrlo je dobra do granice skeniranja 60° , ali pokriva samo 50% volumena.



Slika 2.10. Efektivna površina za nekoliko vrsta ravnina; $h/R = 1$ [1].

2.3. BUDUĆNOST KONFORMNIH ANTENA

Slika 2.11. predstavlja pristup 'pametne kože' (*eng.* smart skin). Ovo je naziv za vrlo tanku strukturu koja može biti montirana na bilo koju podlogu, bez obzira na oblik. Struktura sadrži različite slojeve. Najveći problem je analiza i konstrukcija ovih antena i slojeva. Ova antena tvori čitav RF sustav uključujući zračeće elemente, napojne mreže, pojačala, upravljačku elektroniku, raspodjelu snage, hlađenje, filtre itd., sve u višeslojnom dizajnu. Primjena ovih antena će biti u svim područjima u kojima se danas primjenjuju konformne i nekonformne antene [1].



Slika 2.11. Vizija konformne antene izvedene pristupom „pametne kože“ [1].

3. KORIŠTENE METODE I ALGORITMI

3.1. UVODNO RAZMATRANJE

Matematički alat kojim se analiziraju ovakvi antenski sustavi – antenski nizovi načinjeni valovodom napajanim otvor antenama i kružnim mikrotrakastim antenama, jest metoda momenata uz upotrebu spektralne metode. MoM metoda jest metoda svođenja linearne integralne jednadžbe na sustav linearnih algebarskih jednadžbi koje se rješavaju nekim od poznatih postupaka za rješavanje matrica. Spektralna metoda je način prebacivanja varijable iz vremenske u simboličku domenu.

Nakon matematičke analize sfernog niza, sustav se optimira primjenom metode direktnog pretraživanja prostora i *Particle Swarm Optimisation* – PSO algoritma.

3.2. METODE KORIŠTENE PRI ANALIZI KONFORMNIH ANTENA

3.2.1. Moment metoda

Metodu momenata uvodi Roger F. Harrington 1967. u svom radu *Matrix Methods for Field Problems* [17]. Metodu dalje razvijaju Poggio i Burke u Nacionalnom Laboratoriju Lawrence Livermore 1970ih i ova se metoda postavlja kao osnova u rješavanju problema zračenja antenskih nizova [18].

MoM predstavlja niz tehnika za numeričko rješavanje elektromagnetskih problema u kojima se fizikalni problem formulira integralnim (tj., diferencijalnim ili integrodiferencijalnim) jednadžbama s malim konačnim domenama na kojima su odabrane nepoznanice diskretizirane. Problem se rješava računalom direktnim ili iterativnim postupcima [19].

Koraci opće MoM metode:

- formuliranje odgovarajuće integralne jednadžbe za problem koji se rješava
- diskretizacija (aproksimacija) integralnih jednadžbi (odabir baznih i test funkcija)

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

- rješavanje diskretiziranih jednadžbi direktnim ili iterativnim metodama.

MoM metoda predstavlja metodu svodenja linearne integralne jednadžbe na sustav linearnih algebarskih jednadžbi. Ove jednadžbe se tada rješavaju nekim od postupaka za rješavanje matrica. Dalje, u postupku diskretizacije integralnih jednadžbi se koristi metoda usklađenih modova, a prema odabiru test i baznih funkcija, Galerkinova metoda [2], [20].

EM problemi mogu se opisati linearnom integralnom jednadžbom:

$$L(f) = g \quad (3-1)$$

gdje L predstavlja linearni operator, g je poznata funkcija – pobuda ili funkcija izvora, dok f predstavlja odziv ili polje, a nepoznata je i treba ju odrediti [2], [21].

Formuliranjem odgovarajuće integralne jednadžbe zadanog problema završen je prvi korak numeričke procedure MoM. Nakon ovoga slijedi diskretizacija (aproksimacija) integralnih jednadžbi, te odabir baznih i test funkcija.

Diskretizacija nehomogene jednadžbe $L(f) = g$ izvodi se razvojem nepoznate funkcije po baznim funkcijama f_1, f_2, f_3, \dots definiranih u domeni operatora L :

$$f = \sum_n \alpha_n f_n \quad (3-2)$$

gdje su α_n koeficijenti (amplitude) koje treba odrediti [2], [21].

Za točno rješenje prethodna jednadžba predstavlja beskonačnu sumu, a f_n formira potpuni skup baznih funkcija. Za aproksimativno rješenje (aproksimacija integralnih jednadžbi), ta je jednadžba konačna sumacija. Povezivanjem zadnje dvije jednadžbe jednadžbe, dobije se:

$$\sum_n \alpha_n L(f_n) = g. \quad (3-3)$$

Na ovom se mjestu najčešće koristi unutarnji produkt (*eng.* innen product):

$$\langle f, g \rangle = \iint_S f \cdot g dS, \quad (3-4)$$

te se definira skup težinskih ili test funkcija w_1, w_2, w_3, \dots u području djelovanja operatora L , a onda se primijeni unutarnji produkt sa svim test funkcijama. Rezultat je naravno, sustav s N jednadžbi s isto toliko nepoznanica:

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, L(f_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3-5)$$

Ovaj sustav jednadžbi zapisan u matričnom obliku tada glasi:

$$[l_{mn}][\alpha_n] = [g_m], \quad (3-6)$$

gdje je:

$$[l_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, L(f_1) \rangle & \langle w_1, L(f_2) \rangle & \dots \\ \langle w_2, L(f_1) \rangle & \langle w_2, L(f_2) \rangle & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (3-7)$$

$$[\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_1 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}, \quad [g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}. \quad (3-8)$$

Rješenje jednadžbe (3-2) je tada jednako:

$$f = [\hat{f}_n][\alpha_n] = [\hat{f}_n][l_{mn}^{-1}][g_m], \quad (3-9)$$

gdje je:

$$[\hat{f}_n][f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots], \text{ te } [\alpha_n] = [l_{mn}^{-1}][g_m]. \quad (3-10)$$

Ako je matrica $[l_{mn}]$ nesingularna, tada postoji njena inverzna matrica, a to je $[l_{mn}^{-1}]$, [20].

Ovisno o izboru baznih i test funkcija f_n i w_n rješenje može biti egzaktno ili aproksimativno.

Pri rješavanju pojedinog problema, bitno je znati odabrati ove funkcije. Ekspanzijske bazne funkcije f_n trebaju biti linearno nezavisne i odabrane tako da njihova suma predstavlja dobru aproksimaciju bazne funkcije odziva f prema relaciji (3-2). Ekspanzijske test funkcije w_n trebaju biti linearno nezavisne i odabrane tako da produkti $\langle w_n, g \rangle$ ovise o relativno nezavisnim karakteristikama pobude [2].

Faktori koji također utječu na izbor baznih i test ekspanzijskih funkcija:

- točnost željenog rješenja;
- jednostavnost određivanja elemenata matrica;
- veličina matrice koja treba biti invertirana;
- realizacija dobro uvjetovane matrice $[l_{mn}]$.

Za slučaj kada su test funkcije jednake baznim funkcijama, $w_n = f_n$, u pitanju je Galerkinova metoda. Ova metoda je korištena u radu korištena u nastavku rada [21].

Sve varijante MoM metode zahtijevaju rješavanje temeljne jednadžbe (3-1) koja općenito predstavlja sustav linearnih integralnih jednadžbi. Linearne integralne jednadžbe se pojavljuju u

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

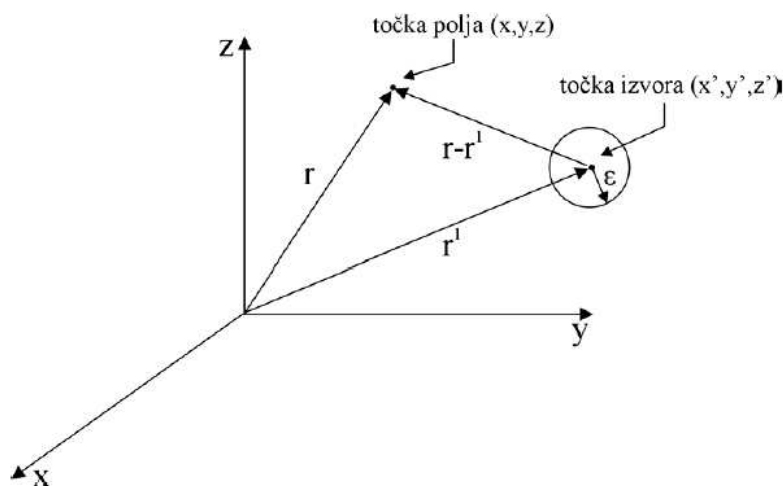
rješavanju problema zračenja otvor i mikrotrakastih antena pri čemu se određuje vrijednost nepoznate struje na površini antene ili se radi o ekvivalentnim strujama kao što je to slučaj kod otvor antena. Funkcija f je nepoznanica, nalazi se pod integralom i predstavlja rješenje ove jednačbe. Ova se integralna jednačba tada rješava upotrebom neke od numeričkih tehnika. [2].

3.2.1.1. Greenove funkcije

Greenova funkcija, poznata i kao funkcija izvora, jest funkcija dobivena iz linearnih rubnih vrijednosti i ona uspostavlja osnovnu vezu između integralne i diferencijalne formulacije. Greenovom se funkcijom transformira diferencijalna jednačba u ekvivalentnu integralnu jednačbu, te se na taj način reduciraju nehomogeni problemi u homogene.

Greenovom se metodom rješenja traže u obliku integrala s jezgrom. Ova rješenja su općenita, a integral je invarijantan na transformacije koordinata ako ih provodimo poštujući pravila koja osiguravaju tu invarijantnost. Kad se jednom odredi Greenova funkcija rubnog problema, može se odrediti rješenje homogene ili nehomogene jednačbe [2], [23], [24].

Upotrebom Greenove funkcije određuje se polje uzrokovano raspodijeljenim izvorom na način superponiranja doprinosa utjecaja svakog pojedinog elementa raspodijeljenog izvora.



Slika 3.1. Točka polja i točka izvora [2], [23], [24].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Neka je $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ polje u točki promatranja \mathbf{r} rezultat jediničnog izvora u točki izvora \mathbf{r}' . Polje u točki \mathbf{r} uzrokovano raspodijeljenim izvorom $g(\mathbf{r}')$ jednako je $\int g(\mathbf{r}')G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')dv'$. Područje integriranja je u području \mathbf{r}' koje pokriva izvor.

Linearna parcijalna diferencijalna jednačba drugog reda opisana je jednačbom (3-1) pri čemu L predstavlja diferencijalni operator. U skladu s tim Greenovu funkcija definirana je kao rješenje nehomogene jednačbe točkastog izvora:

$$LG(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (3-11)$$

gdje su \mathbf{r} i \mathbf{r}' vektori pozicija točaka polja (x, y, z) i izvora (x', y', z') dok je $\delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ Diracova poopćena funkcija koja iščezava za $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}'$ i zadovoljava sljedeći uvjet:

$$\int \delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')g(\mathbf{r}')dv' = g(\mathbf{r}). \quad (3-12)$$

Iz prethodne jednačbe očit je da se Greenova funkcija $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ može interpretirati kao rješenje problema rubnih uvjeta s izvorom g u kojim je taj izvor zamijenjen jediničnom impulsnom funkcijom. Tako $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ fizikalno predstavlja odziv linearnog sustava na jedinični prostorni impuls u točki $\mathbf{r} = \mathbf{r}'$.

Prema [23], Greenova funkcija ima sljedeća svojstva:

1. G zadovoljava izraz $LG = 0$ osim u točki izvora \mathbf{r}' gdje je $LG(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$;
2. G je simetrična u smislu da je $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = G(\mathbf{r}', \mathbf{r})$;
3. G zadovoljava zadane rubne vrijednosti za f ;
4. Usmjereni derivacija $\frac{\partial G}{\partial n}$ ima diskontinuitet u \mathbf{r}' koji je određen izrazom:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \oint_S \frac{\partial G}{\partial n} dS = 1 \quad (3-13)$$

gdje je n vanjska normala na sferu radijusa ε kao što je prikazano na prethodnoj slici (za točke \mathbf{r} na sferi vrijedi: $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = \varepsilon^2$). Svojstvo 2. iskazuje princip reciprociteta koji implicira da promjena izvora i promatrača ne utječe na G . Svojstvo 4. se dokazuje primjenom teorema divergencije na jednačbu:

$$LG(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad [2], [25]. \quad (3-14)$$

3.2.1.2. Određivanje Greenove funkcije sferne strukture u spektralnoj domeni

Greenove funkcije razlikuju se od strukture do strukture, a moguće ih je odrediti u spektralnoj domeni. Postoje dva načina određivanja Greenovih funkcija – analitički i numerički. Analitički pristup uzima manje računalnog vremena, ali ima dosta mana. Postupak nije općenit i ovako određena Greenova funkcija vrijedi za točno određenu strukturu, a svaka promjena strukture zahtijeva analizu novog problema i određivanje nove Greenove funkcije. Ovo dolazi do izražaja posebno kod višeslojnih struktura.

Pogodnije je stoga koristiti numeričke algoritme u određivanju Greenove funkcije. Oni su općeniti algoritmi i mogu se primijeniti na različite višeslojne strukture.

Numerički algoritam koji je korišten u ovom radu, tj. u proračunu sfernih antenskih nizova, zasnovan je na spektralnoj metodi, a naziva se G1DMULT algoritam. Razvili su ga Šipuš, Kildal i Leyon [26], [27], [28], a sposoban je izračunati Greenovu funkciju i za planarne, cilindrične i sferne višeslojne strukture.

Za svaku unesenu vrijednost spektralne varijable procedura računa vrijednost električnog i magnetskog polja na određenom mjestu unutar ili izvan višeslojne strukture. Parametri strukture definirani su kao ulazni parametri procedure. Permitivnost i permeabilnost slojeva mogu imati kompleksnu vrijednost. Pobudni izvor pri računanju Greenove funkcije je točkasti izvor (Hertzov dipol) [2], [24].

Slika 3.2. pomoći će u razumijevanju rada algoritma G1DMULT. 3D pobuda je vektor – Legendreovom transformacijom transformirana u strujne harmonijske ljuske - struje. Ako je izvor beskonačno tanak u r smjeru se tada dobije jedna diskretna ljuska po svakom izvoru (inače je razdioba strujnih ljuski u r smjeru kontinuirana). Za svaku vrijednost spektralnog moda (n,m) pobuđeno elektromagnetsko polje ima istu varijaciju u θ i φ smjeru kao i pripadajuća komponenta struje tj., nepoznata je samo promjena EM polja u r smjeru. Iz ovoga se može zaključiti da postoji jednodimenzionalni problem koji se sastoji od jednodimenzionalne višeslojne strukture i jednodimenzionalnog harmonijskog izvora (Slika 3.2. a) i b)). Algoritam 'dijeli' višeslojnu strukturu u niz ekvivalentnih potproblema - jedan za svaki dielektrični sloj (Slika 3.2. c)). Pri tome se koristi princip ekvivalencije za slobodni prostor [2], [29], [30]. Ako je u pitanju otvor antena – otvoreni valovod, za razliku od mikrotrakastih antena, strujna se ljuska pojavljuje kao

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

ekvivalentna, a ne stvarna struja i to ovom algoritmu ne predstavlja problem. Strujne ljuske, stvarne ili ekvivalentne predstavljaju ulazne parametre u G1DMULT algoritmu.

Električno polje unutar svakog sloja ima oblik (primjerice E_φ komponenta):

$$\tilde{E}_\varphi(r, n, m) = a_{nm}^i \hat{H}_n^{(2)}(k_i r) + b_{nm}^i \hat{J}_n(k_i r) \quad (3-15)$$

gdje su: $\hat{H}_n^{(2)}(k_i r)$ i $J_n(k_i r)$ - Hankelova i Besselova funkcija Schenkunoffovg tipa;

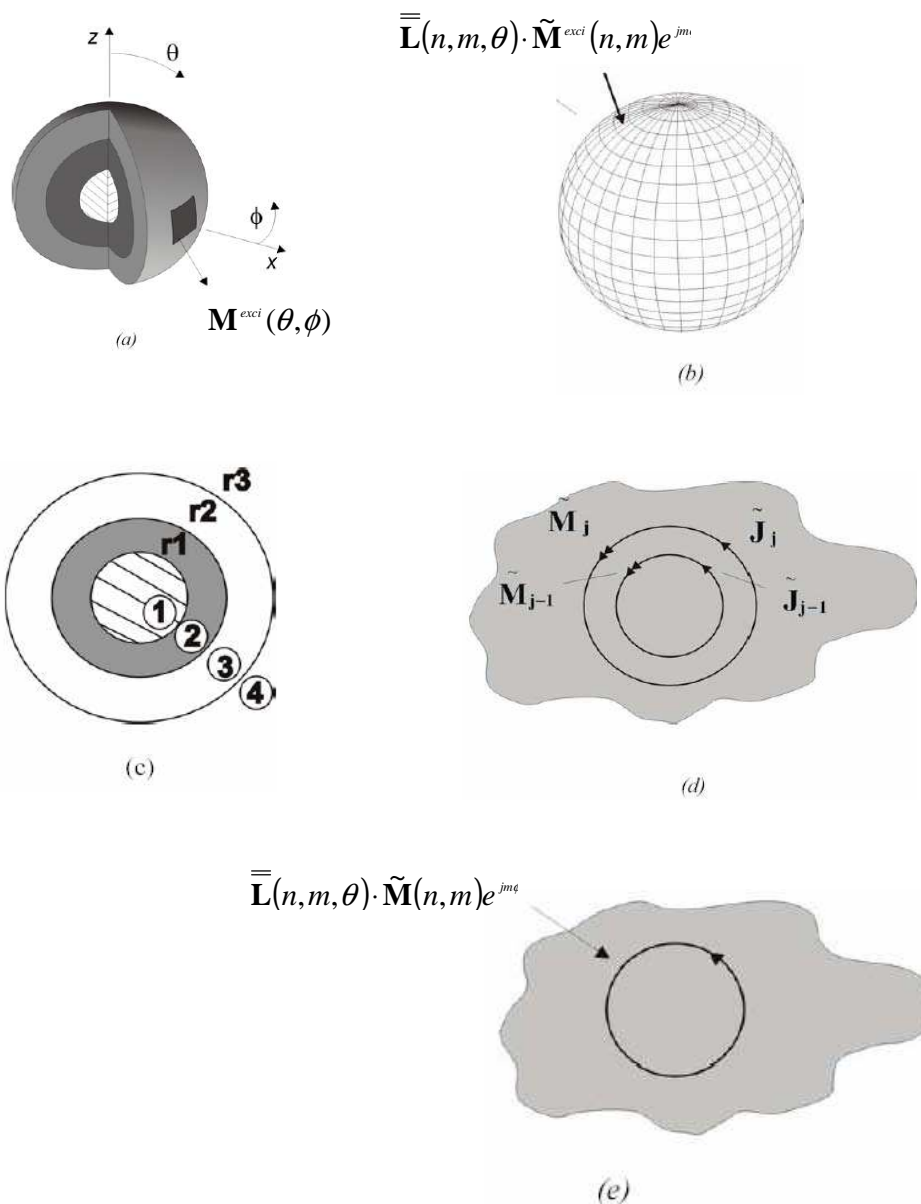
k_i – valni broj u i - tom sloju;

a_{nm}^i i b_{nm}^i - nepoznati koeficijenti.

Nepoznate koeficijente možemo odrediti ako se zadovolje rubni uvjeti kontinuiteta tangencijalne komponente električnog i magnetskog polja na granici dvaju slojeva, te se povežu ekvivalentni potproblemi. Slijedi da postoje četiri nepoznanice po svakoj granici i to su amplitude tangencijalnih komponenti električnog i magnetskog polja u spektralnoj domeni na promatranoj granici.

G1DMULT algoritam povezuje sve ekvivalentne potprobleme u sustav od $4 \cdot (N_{\text{layer}} - 1)$ linearnih jednadžbi s jednakim brojem nepoznanica (N_{layer} označava broj dielektričnih slojeva).

Nakon što se odrede amplitude tangencijalnih komponenti elektromagnetskog polja na granici između slojeva jednostavno je odrediti amplitude EM polja bilo gdje u višeslojnoj strukturi primjenjujući isti princip ekvivalencije za sloj unutar kojeg se žele odrediti vrijednosti elektromagnetskog polja. To znači da se prvo određuju amplitude tangencijalnih komponenti EM polja na granicama između slojeva, a nakon toga se određuje raspodjela polja unutar pojedinog sloja.



Slika 3.2. Struktura analize 3D sferne višeslojne strukture kao niz ekvivalentnih potproblema [2], [27].

Osnovni potproblem u formuliranju je izračunati E i H polje uslijed struje u homogenom području (Slika 3.2 e)). Potprocedure nazvane G1DJs i G1DMs (indeks s označava sfernu strukturu) unutar G1DMULT procedure rješavaju ovaj potproblem (jedan za električni, drugi za magnetski izvor). Ove potprocedure su jedini dijelovi G1DMULT algoritma koji ovise o geometriji strukture koja se analizira (planarna, cilindrična ili sferna) [2], [27].

3.2.2. Spektralna metoda

Spektralna metoda je postupak kojim se vrši transformacija iz vremensko/prostorne domene u simboličku domenu, a cilj je pojednostavljenje nekog problema s kojim se susrećemo u elektromagnetizmu. Ako se problem analizira pomoću integralne jednadžbe električnog polja (*eng.* Electric Field Integral Equation - EFIE) i metodom momenata, osnova podintegralne funkcije integralne jednadžbe jest Greenova funkcija. Kako se Greenova funkcija za višeslojnu strukturu može odrediti u spektralnoj domeni postaje očigledno da ćemo se koristiti spektralna domena. Kada su u pitanju sferne strukture transformacija iz vremensko/prostorne domene u simboličku vrši se vektor – Legendreovom transformacijom.

Spektralna se metoda, kada je u pitanju analiza problema u elektromagnetizmu, odvija u četiri koraka:

1. Problem se iz prostorno/vremenske domene odgovarajućom transformacijom prebacuje u spektralnu domenu;
2. Računaju se Greenove funkcije – riješi se problem izvora strujne ljuske jedinične amplitude, a EM polje se izrazi preko vala koji se širi;
3. Izračunaju se odgovarajuće vrijednosti potrebne za rješavanje glavnog problema.
4. Izvrši se inverzna transformacija u originalnu domenu i time se rješenje dobije u prostorno/vremenskoj domeni.

Treba samo napomenuti, da spektralna domena u ovom slučaju ne podrazumijeva varijablu frekvenciju, već su varijable simbolički koeficijenti rasprostiranja, a ovaj postupak nije transformacija u frekvencijsku domenu, već u simboličko/prostornu domenu.

Tablica 3.1. prikazuje transformacijske parove za sve vrste kanonskih oblika struktura.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Tablica 3.1. Transformacijski parovi planarnih, cilindričnih i sfernih struktura [2].

| PLANARNI | Prostorna domena | Spektralna domena |
|-----------------|--|--|
| FOURIER | $f(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(k_x, k_y, z) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$ | $\tilde{f}(k_x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy$ |
| Varijable | x, y, z | k_x, k_y, z |
| CILINDRI. | Prostorna domena | Spektralna domena |
| FOURIER | $f(\rho, \phi, z) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\rho, m, k_z) e^{-jk_z z} e^{-jm\phi} dk_z$ | $\tilde{f}(\rho, m, k_z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} f(\rho, \phi, z) e^{jm\phi} e^{jk_z z} \rho d\phi dz$ |
| Varijable | ρ, ϕ, z | ρ, m, k_z |
| SFERNI | Prostorna domena | Spektralna domena |
| VEKTOR-LEGENDRE | $f(r, \theta, \phi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n= m }^{\infty} \bar{\bar{L}}(n, m, \theta) \cdot \tilde{f}(r, n, m) e^{jm\phi}$ | $\tilde{f}(r, n, m) = \frac{1}{2\pi S(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} \bar{\bar{L}}(n, m, \theta) \cdot f(r, \theta, \phi) \sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi$ |
| Varijable | r, θ, ϕ | r, n, m |

Jezgra vektor-Legendreove transformacije $\bar{\bar{L}}(n, m, \theta)$ za sfernu strukturu dana je izrazom:

$$\bar{\bar{L}}(n, m, \theta) = \begin{bmatrix} P_n^{|m|}(\cos\theta) \sqrt{n(n+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} & -jm P_n^{|m|}(\cos\theta) \\ 0 & \frac{jm P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$$S(n, m) = \frac{2n(n+1)(n+|m|)!}{(2n+1)(n-|m|)!} \quad (3-17)$$

gdje je $P_n^{|m|}$ pridružena Legendreova funkcija prve vrste, reda n , stupnja n .

3.3. METODE I ALGORITMI KORIŠTENI PRI OPTIMIZACIJI I SINTEZI

Ciljevi optimizacije su već ranije postavljeni, a kako je kroz godine računalna kompetencija rasla, optimizacija antenskih nizova sve je više bila od interesa i svakako izvedivija. U ovom je slučaju antenski niz namijenjen skeniranju prostora, a optimizacija dijagrama zračenja takvog niza podrazumijeva pronaći najbolji dijagram – uska glavna latica i što niža razina bočnih latica. Unaprijed nije definirana vrijednost ovih pojmova, a optimalna situacija postiže se promjenom relevantnih parametara u okviru svojih granica. Još je jedan pojam vezan za ovu temu je sinteza dijagrama zračenja. Sinteza predstavlja unaprijed točno definirane granice vrijednosti karakterističnih veličina dijagrama (širina glavne laticice na -3dB i -10dB, te razina bočnih latica), te se uz promjenu parametara nastoji postići takav dijagram zračenja kome će biti zadovoljeni prethodno spomenuti uvjeti. U skladu sa svim tim, antenski niz o kome je trenutno riječ ima za cilj postići što širi kut pokrivanja (*eng.* scan angle) u svim smjerovima, što predstavlja veliko područje rada u azimutalnom i elevacijskom smjeru. U svrhu preciznog skeniranja, glavna bi latica dijagrama zračenja (*eng.* main lobe) trebala biti što uža, a bočne laticice (*eng.* side lobe) što niže radi smanjenja rasipanja energije koju nosi elektromagnetski val u području koje nije od interesa, te prepoznavanja i izdvajanja signala male snage kao korisne informacije.

Često nije moguće u potpunosti zadovoljiti sve zahtjeve, pa se određenim postupcima (algoritmima) nastoji naći rješenje koje je optimalno za konkretnu situaciju, a može podrazumijevati rezultate koji se nalaze između gore zadanih uvjeta (*eng.* trade off).

U daljnjem istraživanju optimizacija antenskih nizova na sfernoj podlozi odvijala se u tri koraka. Prvi se odnosi na optimizaciju dijagrama zračenja sferne strukture za tri različite konfiguracije antenskih elemenata – ikosaedar, Leopardi i spiralna uz upotrebu metode direktnog pretraživanja. Drugi dio predstavlja optimizaciju dijagrama zračenja antenskih nizova istih konfiguracija, ali uz upotrebu algoritma koji se temelji na roju čestica - *Particle Swarm Optimization* - PSO algoritma. Posljednji korak predstavlja sintezu dijagrama zračenja sfernog niza slobodne konfiguracije elemenata upotrebom PSO algoritma.

Parametri po kojima se optimira dijagram zračenja mogu se podijeliti na parametre pobude, te geometrijske parametre. U parametre pobude ubrajaju se amplituda, polarizacija, kut maksimalnog zračenja, s tim da je frekvencija konstantna u svakoj situaciji (1,7 GHz – osnovni mod TM_{11}), a pobuda je pobuda s faznim kutom zbog kompenzacije faze uslijed različitog

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

položaja antenskih elemenata na sferi i taj je dio u programu uvijek uključen. U geometrijske parametre optimizacije spadaju radijus sfere, broj elemenata u nizu, te njihov raspored na podlozi. Podloga je sfera – idealna vodljiva ravnina (aluminij), na koju su montirane mikrostrip antene polumjera 2,65 cm ili otvoreni valovodi polumjera 6 cm. Problem sprege riješen je tako da je minimalni razmak između elemenata između $0,4\lambda$ i $0,5\lambda$.

Algoritmi koji se bave rješavanjem takvih i sličnih problema mogu biti genetički, Particle Swarm Optimization algoritmi, Tabu Search algoritmi, empirijski algoritmi, te mnogi drugi. U svakom slučaju, to su biološki algoritmi koji se temelje na evoluciji ili na perfektnom ponašanju određenih životinja u masi, a njihove pozitivne karakteristike primjenjuju se na rješavanje problema u znanosti.

3.3.1. Metoda direktnog pretraživanja prostora

Metodu direktnog pretraživanja prostora (*eng.* Direct search method) uvode R. Hooke and T. A. Jeeves 1961. člankom u Journal of Association of Computing Machinery [60], a podrazumijeva sekvencijalno ispitivanje trenutnih rješenja i usporedbu s prethodno najbolje postignutim rješenjem.

Ova metoda optimizacije poprilično je stara, ali se održala do danas iz praktičnih razloga, te se dobro ponaša u području nelinearne optimizacije [61].

U sklopu ove disertacije, metoda direktnog pretraživanja primjenjuje se tako da je svaki od relevantnih parametara promjenjiv u okviru svojih granica unutar kojih se zadržavaju sva početno zadana svojstva sustava. To znači da se rješenje svake promjene parametra usporedi s prethodnim, te se na kraju zadrži najbolje rješenje i predstavlja optimalnu vrijednost kao mjeru optimizacije sustava po određenom parametru.

3.3.2. Optimizacijski algoritam roja čestica - PSO

Algoritam često korišten u znanosti, a koji se primjenjuje u ovoj disertaciji, jest optimizacijski algoritam roja čestica - PSO algoritam (*eng.* Particle Swarm Optimisation) i spada u stohastičke optimizacijske tehnike. Razvili su ga Eberhart i Kennedy 1995. [31] inspirirani socijalnim ponašanjem i gibanjem insekata, ptica i riba [32].

Prednosti PSO algoritma leže u jednostavnosti implementacije, a sam algoritam vrlo je učinkovit za globalno pretraživanje, te je pogodan za primjenu u većini programskih jezika. PSO optimizacija primjenjuje se u neuronskim mrežama, fuzzy sustavima, optimizaciji distribucije električne energije, strukturalnoj optimizaciji, procesnoj biokemiji, identifikaciji sustava u biomehanici, te drugim područjima.

PSO algoritmi temelje se na biološkoj evoluciji i nastoje pronaći najbolje ili bar skoro najbolje rješenje za zadani problem.

PSO algoritmi posebno su korisni u optimizaciji koja se odnosi na više parametara, te u višedimenzionalnim prostorima pretraživanja. Postupak se odnosi na optimizaciju ciljne funkcije (*eng.* fitness function) koja ovisi o M varijabli, a definira se skup čestica (*eng.* particle) proizvoljnog položaja u M -dimenzionalnom prostoru problema, gdje svaki položaj pojedine čestice odgovara potencijalnom rješenju optimizacijskog problema. Ove se čestice tada kreću kroz M -dimenzionalni prostor problema, a položaji se konstantno obnavljaju (nadograđuju), što deterministički, što stohastički po određenim pravilima.

Kako se čestice gibaju kroz prostor, svaka čestica pamti svoj najbolji položaj ikad postignut, te se taj položaj naziva najbolji lokalni položaj (*eng.* local best). Također, sve čestice imaju informaciju o najboljem položaju pronađenom od strane bilo koje čestice, a to se rješenje naziva globalni najbolji položaj (*eng.* global best). Nakon određenog broja iteracija, čestice se približavaju globalnom najboljem položaju, a ovaj se postupak naziva pretraživanje prostora problema, dok se na kraju ne pronađe najbolje rješenje [33].

Ovaj se proces može predočiti rojem pčela čiji je cilj pronaći najveću količinu cvjetova u polju o kojem prethodno nemaju nikakvu informaciju. Pčele kreću u svoju potragu s neodređenog mjesta nasumičnim brzinama. Svaka pčela pamti mjesto gdje je pronašla najviše cvijeća, a također zna i za lokacije gdje su ostale pčele pronašle najveću količinu. Sad, s tom informacijom o svom pronalasku i pronalasku ostalih pčela, svaka se kreće u smjeru koji se nalazi negdje

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

između te dvije točke. Sve dok traje pretraga, pčela može pronaći mjesto s većom količinom cvjetova u odnosu na prethodni slučaj, a ako je to najveća količina u odnosu na sve pčele, svaka se počinje kretati prema tom smjeru, i na taj način pčele pretražuju polje. Nakon nekog vremena, ako nisu u mogućnosti više naći mjesto veće koncentracija cvjetova, grupiraju se upravo oko te točke [33].

Sljedeći koraci primjenjuju se na svaku česticu pojedinačno:

1. Inicijalizirati populaciju čestica slučajnih položaja i brzina u M -dimenzionalnom prostoru problema.
2. Odrediti ciljnu funkciju s M varijabli za svaku česticu.
3. Obnoviti brzinu čestice. Brzina čestice mijenja se u skladu s relativnim položajima p_{best} i q_{best} (lokalnog i globalnog najboljeg), u smjeru gdje je fitness funkcija najbolja po sljedećoj jednadžbi:

$$v_{n+1} = w \cdot v_n + c_1 \text{rand}() \cdot (q_{best,n} - x_n) + c_2 \text{rand}() \cdot (p_{best,n} - x_n) \quad (3-18)$$

4. Pomaknuti česticu. Ako se jednom odredi brzina čestice, onda je jednostavno pomjeriti ju na sljedeći položaj. Nove se koordinate računaju za svaku dimenziju prema jednadžbi

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}. \quad (3-19)$$

5. Vraćati se na korak 2 skroz dok se ne zadovolji uvjet najbolje ciljne funkcije ili se ne izvrši određen broj iteracija.

Gdje je:

v_n – brzina čestice u n -toj dimenziji;

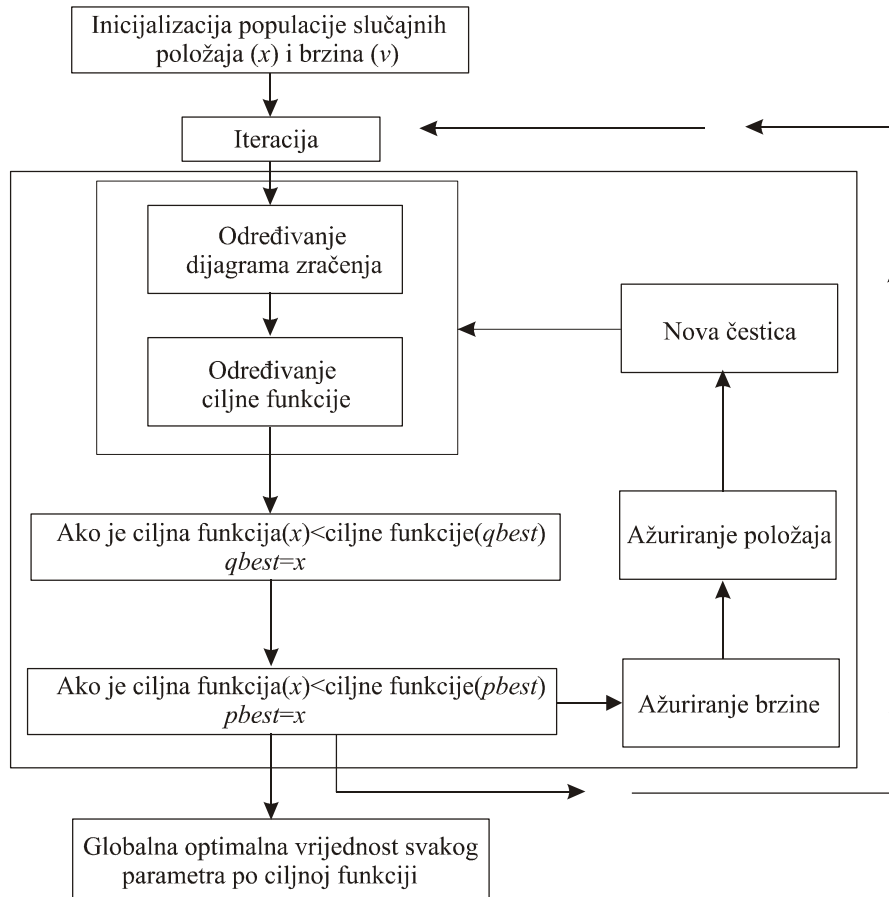
x_n – koordinata čestice u n -toj dimenziji;

c_1 i c_2 – faktori koji određuju relativni pomak p_{best} i q_{best} (istraživanja su pokazala da je dosta dobar izbor $p_{best}=2$ i $q_{best}=2$);

$\text{rand}()$ – slučajni broj između 0 i 1;

w – težinska vrijednost inercije (*eng.* inertial weight) između 0 i 1 – određuje inerciju po kojoj trenutna brzina čestice ovisi o njevoj prethodnoj brzini i o tome koliko je čestica udaljena od njenog lokalnog i globalnog najboljeg položaja. Također su istraživanja potvrdila da PSO algoritam brže konvergira, ako optimizacija započne s vrijednošću $w=0.9$, te se linearno smanjuje do 0.4 u posljednjoj iteraciji.

U skladu s ovim tvrdnjama, načinjen je dijagram toka PSO algoritma predstavljen Slikom 3.3.



Slika 3.3. Dijagram toka PSO algoritma.

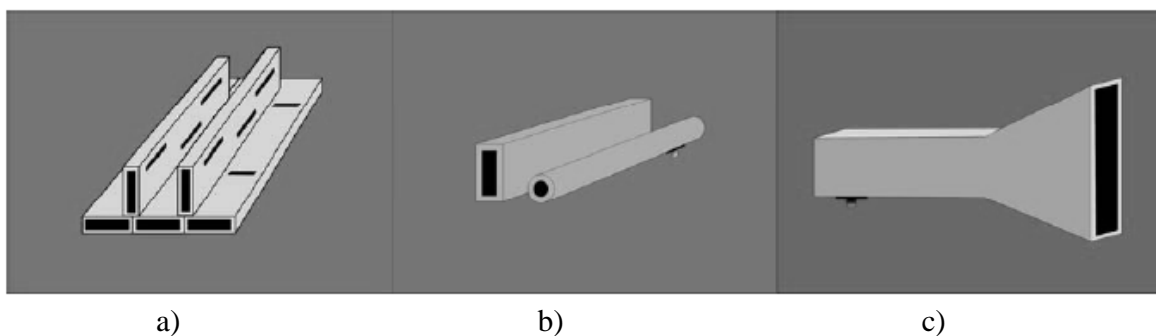
4. ELEMENTARNE ANTENE SFERNIH KONFORMNIH NIZOVA

Antene koje čine sferni konformni niz mogu biti različitih oblika, no, u ovom će se radu analizirati dvije vrste elementarnih antena – otvor antene pobuđene valovodom kružnog presjeka i kružne mikrotrakaste antene. I jedne i druge antene u svrhu postizanja što većeg dobitka, moraju imati dimenzije reda veličine valne duljine. Obje vrste upravo zbog svog oblika, praktične su u primjeni u različitim vrstama komunikacija. Detaljnija analiza antena dana je sljedećim poglavljima.

4.1. VALOVODOM POBUĐENE OTVOR ANTENE

Otvor antene (*eng.* aperture antennas) predstavljaju antene koje zrače iz otvora određenog oblika (najčešće kružnog i pravokutnog). Rade u mikrovalnom području, a dimenzije ovakvih antena su reda valne duljine λ (nekoliko cm).

U otvor antene spadaju prorez antene (*eng.* slots) – Slika 4.1. a), valovodne antene (*eng.* waveguides) – Slika 4.1. b), lijevak antene (*eng.* horn) Slika 4.1. c), leće (*eng.* lenses), te reflektor antene (*eng.* reflectors) [2].



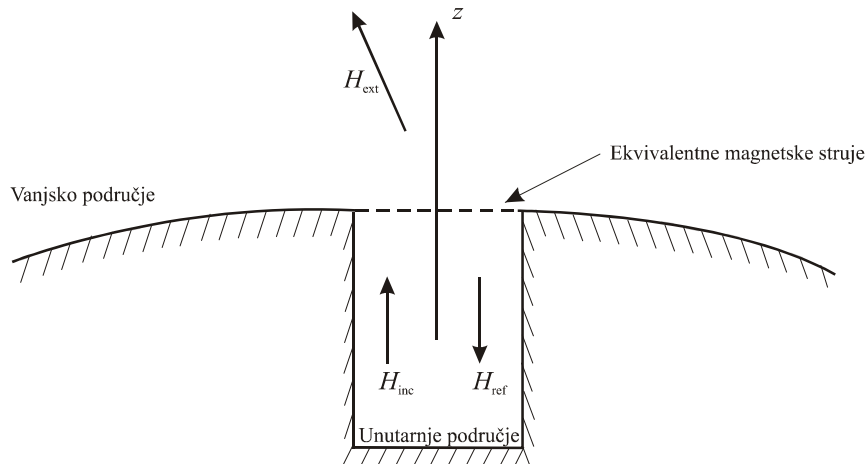
Slika 4.1. Najčešće vrste otvor antena: a) prorez antene, b) valovodne antene i c) lijevak antene [2].

Ovakva vrsta antena koristi se u zrakoplovnoj industriji, satelitskim i mobilnim komunikacijama, moguće ih je montirati na površinu letjelica tako da ne narušavaju njenu

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

aerodinamičnost, a sam otvor antene često je prekriven materijalom određene dielektričnosti – plaštom radi zaštite antene te zadržavanja aerodinamičnosti [1].

Otvor antene mogu biti montirane na (ili u) zakrivljenu površinu, te su stoga pogodne za primjene kod konformnih antenskih nizova. Slika 4.2. prikazuje valovodom napajanu otvor antenu kod koje je područje analize i izračuna podijeljeno u dva dijela – vanjski i unutarnji problem.

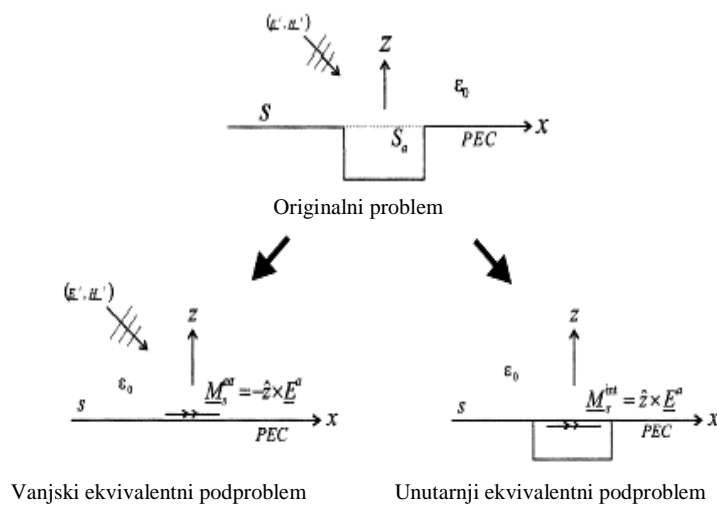


Slika 4.2. Vanjsko i unutarnje područje otvorenog valovoda na sfernoj površini.

U ovom primjeru je dan slučaj PEC površine i valovodom napajanog otvora bez plašta, ali se formulacija može primijeniti i za druge varijante (npr. višeslojni plašt, podloga koja nije idealno vodljiva i druge). Glavna ideja je formulirati integralnu jednadžbu za granicu između vanjskog i unutarnjeg područja. Korištenjem teorema ekvivalencije, vanjski se problem zračenja otvora prevodi u problem zračenja površine po kojoj teku nepoznate ekvivalentne magnetske struje.

Sljedeća slika prikazuje sam princip podjele originalnog problema na dva potproblema.

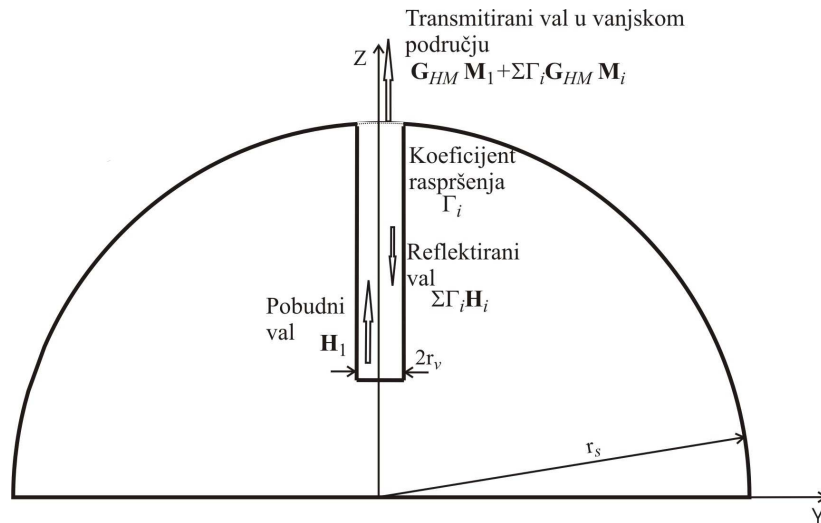
Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi



Slika 4.3. Podjela izvornog problema na dva potproblema teoremom ekvivalencije [36].

Ekvivalentni potproblemi, kako je i rečeno, povezuju se preko kontinuiteta tangencijalnih komponenti elektromagnetskog polja na otvoru valovoda. Pojedini konkretni problemi (ulazna admitancija, koeficijent sprege, dijagram zračenja) rješavaju se moment metodom uz spektralnu transformaciju.

Da bi se neki EM problem ispravno analizirao potrebno je poznavati geometriju samog problema. Slika 4.4. prikazuje promatranu antenu. r_s predstavlja radijus idealno vodljive (uzemljene) sfere, a r_v radijus valovoda. Ako je frekvencija signala pobude iznad frekvencije reza dominantnog moda (TE_{11}), a ispod frekvencije prvog slijedećeg moda (TM_{01}) tada se u valovodu širi samo dominantni mod.



Slika 4.4. Otvoreni valovod na sfernoj vodljivoj podlozi [2].

Ono što se treba nadalje rješavati je problem zračenja otvorenog valovoda na sferi. Primjenom teorema ekvivalencije izvorni se problem prevodi u tzv. ekvivalentni problem tako da valovodni otvor na sferi koji zrači nadomjestimo idealno vodljivim kružnim sfernim odsječkom kojim teku ekvivalentne struje. Te struje u prostoru oko sfere uzrokuju isto polje kao i originalni problem – zračeci otvor.

4.1.1. Određivanje ekvivalentnih struja

Prvi korak u analizi valovodnih antena jest određivanje ekvivalentnih struja na samom otvoru. Ekvivalentne struje na otvoru mogu se iskazati preko tangencijalnih komponenti električnog polja. Polje unutar valovoda može se izraziti zbrojem valovodnih modova [37]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r})e^{-jk_{1z}z} + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{E}_i(\mathbf{r})e^{+jk_{iz}z} \quad (4-1)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_1(\mathbf{r})e^{-jk_{1z}z} - \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{H}_i(\mathbf{r})e^{+jk_{iz}z} . \quad (4-2)$$

$\mathbf{E}_1(\mathbf{r})$, $\mathbf{H}_1(\mathbf{r})$ predstavljaju električno i magnetsko polje pobudnog dominantnog moda, $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$, $\mathbf{H}_i(\mathbf{r})$ električno i magnetsko polje i -tog moda, Γ_i je koeficijent refleksije i -tog moda, k_{1z} konstanta propagacije dominantnog valovodnog moda u z smjeru, k_{iz} konstanta propagacije i -tog moda u z smjeru i N predstavlja ukupni broj valovodnih modova s kojima se računa.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Ekvivalentna magnetska struja dobije se sljedećim izrazima:

$$\mathbf{M}_{eq} = -\hat{n} \times \mathbf{E} = -\hat{n} \times \left(\mathbf{E}_1 + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{E}_i \right) \quad (4-3)$$

tako da vrijedi:

$$\mathbf{M}_{eq} = \mathbf{M}_1 + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{M}_i. \quad (4-4)$$

Ovaj način zapisa magnetske struje predstavlja njen razvoj u sumu baznih funkcija [2], [38].

\hat{n} predstavlja jedinični vektor normale na otvoru valovoda u smjer mu je prema van (na Slici 4.4. u smjeru osi z).

Sada slijedi povezivanje vanjskog i unutarnjeg ekvivalentnog potproblema preko rubnih ili graničnih uvjeta za magnetsko polje na granici dvije sredine:

$$(\mathbf{H}_{val} - \mathbf{H}_{ext})_{tan} = 0 \quad (4-5)$$

koji kaže da kada je u pitanju propagacija \mathbf{E} ili \mathbf{H} kroz sredstvo do granice sa drugim, tangencijalne komponente prolaze granicu kontinuirano, dok to nije slučaj sa normalnim komponentama polja. U jednadžbi (4-5) $(\mathbf{H}_{val})_{tan}$ predstavlja tangencijalne komponente magnetskog polja unutar valovoda, a $(\mathbf{H}_{ext})_{tan}$ predstavlja tangencijalne komponente magnetskog polja izvan valovoda. Magnetsko polje izvan valovoda \mathbf{H}_{ext} se korištenjem ekvivalentne struje na otvoru valovoda može prema [37] može izraziti relacijom:

$$\mathbf{H}_{ext} = \mathbf{H}_{Meq}(\mathbf{r}) = \int_{\substack{ovor \\ valovoda}} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM}(\mathbf{r} | \mathbf{r}') \cdot \mathbf{M}_{eq}(\mathbf{r}') dS', \quad (4-6)$$

te, ako se prethodno znanje upotrebi, za tangencijalne komponente može se pisati:

$$(\mathbf{H}_{ext})_{tan} = (\mathbf{H}_{Meq}(\mathbf{r}))_{tan} = \int_{\substack{ovor \\ valovoda}} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM}(\mathbf{r} | \mathbf{r}') \cdot \left\{ \mathbf{M}_1(\mathbf{r}') + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{M}_i(\mathbf{r}') \right\} dS'. \quad (4-7)$$

\mathbf{G}_{HM} predstavlja Greenovu funkciju za analiziranu sfernu strukturu, a \mathbf{r} i \mathbf{r}' su radijus vektori točke posmatranja i točke izvora. Ako se povežu relacije (4-2) i (4-7), može se dobiti relacija:

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{r}) - \sum_{i=1}^N \Gamma_i \mathbf{H}_i(\mathbf{r}) = \int_{\substack{ovor \\ valovoda}} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM}(\mathbf{r} | \mathbf{r}') \cdot \mathbf{M}_1(\mathbf{r}') dS' + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \cdot \int_{\substack{ovor \\ valovoda}} \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM}(\mathbf{r} | \mathbf{r}') \cdot \mathbf{M}_i(\mathbf{r}') dS' \quad (4-8)$$

Ova integralna jednadžba rješava se moment metodom i to Galerkinovim pristupom, uz primjenu spektralne transformacije. Test funkcije su ustvari ekvivalentne struje pripadajućih valovodnih modova ($\mathbf{M}_{eq} = \mathbf{M}_j = -\hat{n} \times \mathbf{E}_j$). Na taj se način postiže sustav s N jednadžbi s isto toliko nepoznanica:

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

$$\langle \mathbf{M}_j, \mathbf{H}_1 \rangle - \sum_{i=1}^N \Gamma_i \langle \mathbf{M}_j, \mathbf{H}_i \rangle = \langle \mathbf{M}_j, \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM} \cdot \mathbf{M}_1 \rangle + \sum_{i=1}^N \Gamma_i \langle \mathbf{M}_j, \overline{\overline{\mathbf{G}}}_{HM} \cdot \mathbf{M}_i \rangle. \quad (4-9)$$

\mathbf{M}_j je j -ta test funkcija ($j = 1, \dots, N$), \mathbf{M}_i je i -ta bazna funkcija, dok oznaka $\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle$ označava unutarnji produkt funkcija \mathbf{A} i \mathbf{B} , te vrijedi:

$$\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \int_{\Omega} \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} dS'. \quad (4-10)$$

Nepoznate ekvivalentne struje valovodnih modova mogu se odrediti metodom momenata u spektralnoj domeni. Problem se prebacuje u spektralnu domenu, jer se na taj način originalni 3-D problem pretvara u spektar 1-D problema. Pri tom se pretpostavlja da je struktura svakog sloja dielektrika homogena i izotropna u dva smjera – θ i Φ smjeru. Spektralne varijebale su n i m , i za svaku njihovu vrijednost EM polje ima istu promjenu u θ i Φ smjeru kao i izvor (el. ili mag. strujna ljuska). Vector-Legendreova transformacija primjenjuje se u ovom slučaju na ekvivalentne struje na otvoru valovoda [39], a predstavljena je izrazima:

$$\tilde{\mathbf{M}}(r, n, m) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_r \\ \tilde{\mathbf{M}}_n \\ \tilde{\mathbf{M}}_m \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi S(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \cdot \mathbf{M}(r, \theta, \phi) \cdot \sin \theta \cdot e^{-jm\phi} d\theta d\phi \quad (4-11a)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}(r, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_r \\ \tilde{\mathbf{M}}_{\theta} \\ \tilde{\mathbf{M}}_{\phi} \end{bmatrix} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \cdot \mathbf{M}(r, n, m) e^{jm\phi} \quad (4-11b)$$

$$\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) = \begin{bmatrix} P_n^{|m|}(\cos \theta) \sqrt{n(n+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} & \frac{-jm P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \\ 0 & \frac{jm P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (4-11c)$$

$$S(n, m) = \frac{2n(n+1)(n+|m|)!}{(2n+1)(n-|m|)!} \quad (4-11d)$$

$\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta)$ predstavlja jezgu vektor-Legendreove transformacije, $P_n^{|m|}$ je pridružena Legendreova funkcija prve vrste, reda m , stupnja n , a $S(n, m)$ koeficijent unutar vektor-Legendreove transformacije.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Korištenjem prethodno opisane metodologije za dominantni mod valovoda kružnog poprečnog presjeka - TE₁₁ dobiju se slijedeći izrazi za ekvivalentne struje na otvoru valovoda u prostornoj (r, θ, ϕ) domeni:

$$\mathbf{M}_\theta = -\hat{\rho} \times \mathbf{E}_\phi \Rightarrow \mathbf{M}_\theta = \mathbf{E}_\phi = E_0 J_1' \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) \cos \phi \quad (4-12a)$$

$$\mathbf{M}_\phi = -\hat{\rho} \times \mathbf{E}_\theta \Rightarrow \mathbf{M}_\phi = -\mathbf{E}_\theta = -\frac{E_0}{\theta} J_1 \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) \sin \phi \quad (4-12b)$$

Vektor - Legendreovom transformacijom određuju se ekvivalentne struje na otvoru valovoda u spektralnoj (r, n, m) domeni:

a) Theta komponenta ekvivalentne struje:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_\theta(r, n, m) &= -\frac{E_0}{2S(n, m)} \int_0^{r_s/r_v} J_1' \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial x} \sin^2 \theta \, d\theta \\ &\quad + \frac{E_0}{2S(n, m)} \int_0^{r_s/r_v} \frac{1}{\theta} J_1 \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) P_n^{|m|}(\cos \theta) \, d\theta \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{za } |m| = 1; \\ \text{za } |m| \neq 1 \end{array} \right\} \quad (4-13)$$

$$\tilde{M}_\theta(r, n, m) = 0 \quad \text{za } |m| \neq 1$$

b) Phi komponenta ekvivalentne struje:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_\phi(r, n, m) &= j \frac{E_0}{2S(n, m)} \int_0^{r_s/r_v} J_1' \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) P_n^{|m|}(\cos \theta) \, d\theta \\ &\quad - j \frac{E_0}{2S(n, m)} \int_0^{r_s/r_v} \frac{1}{\theta} J_1 \left(\chi_{11} \frac{r_s}{r_v} \theta \right) \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial x} \sin^2 \theta \, d\theta \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{za } m = 1; \\ \text{za } m = -1; \\ \text{za } |m| \neq 1 \end{array} \right\} \quad (4-14)$$

$$\tilde{M}_\phi(r, n, m) = 0 \quad \text{za } |m| \neq 1$$

4.1.2. Zračenje valovodom pobuđenog otvora na sfernoj podlozi

Svako elektromagnetsko zračenje koje proizvede antena bilo kakvog geometrijskog oblika propagira se kao sferni val. Ukoliko je udaljenost od antene velika (daleko polje) antena predstavlja točkasti izvor, a zračenje iz takvog izvora je radijalno zračenje. Protok energije u jedinici vremena kroz jediničnu površinu predstavlja gustoću snage koja se prikazuje kao Poyntingov vektor u smjeru širenja. Raspodjelu gustoće snage na površini sfere dovoljno velikog polumjera nazivamo prostornim dijagramom zračenja. Taj se dijagram često daje u relativnim vrijednostima, tj. u odnosu prema maksimalnoj gustoći snage kao jedinici (decibeli).

Najčešće se dijagram zračenja daje za dvije komponente električnog polja E_θ i E_ϕ . Pošto je snaga proporcionalna kvadratu jakosti polja, iz dijagrama polja lako se može izvesti dijagram snage. Dijagram zračenja izvodi se mjerenjem jakosti polja, te se u većini slučajeva i upotrebljava dijagram polja. Kako se cijeli prostorni dijagram zračenja rijetko mjeri, redovito se mjere njegovi presjeci u dvije okomite ravnine koje prolaze smjerom maksimalnog zračenja. To su ravnine gdje u jednoj leži vektor električnog, a u drugoj vektor magnetskog polja, iz čega slijedi da su to dijagrami u E i H ravnini [40].

U izračunu dijagrama zračenja kreće se prvo od polja unutar valovoda pomoću kojeg se određuju ekvivalentne struje na otvoru valovoda.

Iz prethodno navedenih vrijednosti i izraza za jezgru vektor-Legendreove transformacije, Greenove funkcije, te ekvivalentne struje na otvoru valovoda u spektralnoj domeni, može se doći do relacije za električno polje pobuđeno ekvivalentnom strujom \mathbf{M} :

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \overline{\mathbf{L}}(n, m, \theta) \cdot \overline{\mathbf{G}}_{\text{EM}}(n, m, r|r_s) \tilde{\mathbf{M}}(r, n, m) e^{jm\phi} \quad (4-15)$$

Ako se obrati pažnja na Φ -komponentu vanjskog dijela zračenja, postoje samo odlazni putjući valovi opisani s $a_{nm}^i \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1)/r$. Analogno, θ -komponenta električnog polja opisuje se s $a_{nm}^i \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r)/r$. Tako je moguće u području izvan sferne strukture s valovodnom antenom, uspostaviti odnos između komponenti polja s različitim koordinatama r_1 i r_2 . Dakle, ako je poznata vrijednost električnog polja na sferi radijusa r_2 moguće je naći vrijednost električnog polja u bilo kojoj točki prostora (bilo kojoj sferi radijusa r_1) koristeći relacije:

$$\tilde{E}_\phi(r_1, n, m) = \tilde{E}_\phi(r_2, n, m) \frac{r_2 \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1)}{r_1 \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2)} \approx \tilde{E}_\phi(r_2, n, m) = \frac{r_2}{r_1} \frac{j^{n+1} e^{-jk_0 r_1}}{\hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2)} \quad (4-16)$$

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

$$\tilde{E}_\theta(r_1, n, m) = \tilde{E}_\theta(r_2, n, m) \frac{r_2 \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_1)}{r_1 \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_2)} \approx \tilde{E}_\theta(r_2, n, m) = \frac{r_2}{r_1} \frac{j^n e^{-jk_0 r_1}}{\hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_2)}. \quad (4-17)$$

k_0 predstavlja valni broj, tj., $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\hat{H}_n^{(2)}$ Hankelova funkcija (Schelkunoff-ovog tipa), te njena prva derivacija $\hat{H}_n^{(2)'}$ [37].

$$\hat{H}_n^{(2)}(x) \cong j^{n+1} e^{-jx}, \text{ za } x \gg, \quad (4-18)$$

$$\hat{H}_n^{(2)'}(x) \cong j^n e^{-jx}, \text{ za } x \gg. \quad (4-19)$$

Daleko polje proizvedeno zračenjem jedne antene dobije se superpozicijom polja svih spektralnih modova:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{1}{\sqrt{2\pi\mathcal{S}(n, m)}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \bar{\mathbf{L}}(n, m, \theta) \cdot \bar{\mathbf{H}}(n) \cdot \bar{\mathbf{G}}_{EM}(n, m, r_2 | r_s) \tilde{\mathbf{M}}(n, m) e^{jm\phi}, \quad (4-20)$$

pri čemu je:

$$\bar{\mathbf{H}}(n) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{j^n r_2}{H_n^{(2)'}(k_0 r_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{j^{n+1} r_2}{H_n^{(2)}(k_0 r_2)} \end{bmatrix}. \quad (4-21)$$

4.2. MIKROTRAKASTE ANTENE

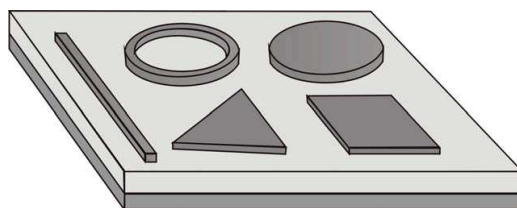
Člankom Munsona 1974. [43], [44] počinje eksplozija objavljivanja članaka koji se vežu na temu mikrotrakastih antena. Članak prikazuje model prijenosne linije za dizajn prvog reda pravokutne antene i sadrži primjere širokih antena koje su napajane na nekoliko točaka kako bi se osigurala pobuda željenog moda. Ova tehnika uspješno je korištena umjesto niza mikrotrakastih antena, kako bi se postigla omnidirekcionalna pokrivenost. Jednostavni model prijenosne linije proučava Hammerstad [45], [44] za postizanje radne frekvencije pravokutne mikrotrakaste antene. Članak Changa, Longa i Richardsa [46], [44] govori o ponašanju antena na tanjim supstratima i uspoređuje rezultate bazirane na Hammerstadovom radu i eksperimentalnim rezultatima Jamesa, Halla i Wooda [47]. Oni predstavljaju izmjerene rezultate impedancije koji

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

su potrebni za procjenu izvedbe jedne mikrotrakaste antene. Kishk i Shafai [48] opisuju razinu pobude dominantnog moda TM_{11} i nekih viših modova kružne strukture. Lee, Luk i Tam naglasak stavljaju na efekte križne polarizacije koji se pojavljuju kod kružnih antena [49], [44]. Splitt i Davidovitz [50], [44] opisuju spregu mikrotrakaste antene na jednoj razini na zračuću mikrotrakastu antenu s druge razine. Schaubert, Pozar i Adrian prikazuju izmjerene podatke za pravokutnu mikrotrakastu antenu postavljenu na supstrat niske i visoke permitivnosti različite debljine, te te podatke uspoređuju s nekim od poznatih modela [51].

Mikrotrakaste antene zbog svojih dimenzija nalaze primjenu u zrakoplovnoj industriji, svemirskim i vojnim komunikacijama, gdje su ograničenja vezana za cijenu, masu ili aerodinamiku i jednostavnost instalacije itd. No, ako postoje slični zahtjevi u komunikacijskom svijetu na antene, mogu se primjenjivati i u mobilnim i bežičnim komunikacijama.

Mikrotrakasta antena sastoji se od metalne pločice (*eng.* patch, microstrip) i postavljena je na veću uzemljenu ravninu. Obično je 'otisnut' na materijal s relativnom permitivnošću ϵ_r u granicama između 2 i 10, no i taj materijal se može mijenjati, ovisno o primjeni. Zrak ili pjena male gustoće obično nude najmanje gubitke i najvišu efikasnost zračenja, a supstrati viših permitivnosti zahtijevaju manje antenske elemente sa širim dijagramom zračenja. Mikrotrakaste antene uspješno rade ako su postavljene na GaAs ($\epsilon_r=12.8$), na $LaAlO_3$ i ostale supstrate često korištenim za supervodiče ($\epsilon_r=20-25$). Iako su pravokutne ili okrugle mikrotrakaste antene najčešće, bilo koji oblik koji ima dobro definiran rezonantni mod, može se koristiti – elipsa, kružni prsten, trokuti. Oblik antene može igrati ulogu u postizanju posebnih efekata, kao što je kružna polarizacija [44], [51]. Slika 4.5. prikazuje osnovne oblike mikrotrakastih antena.

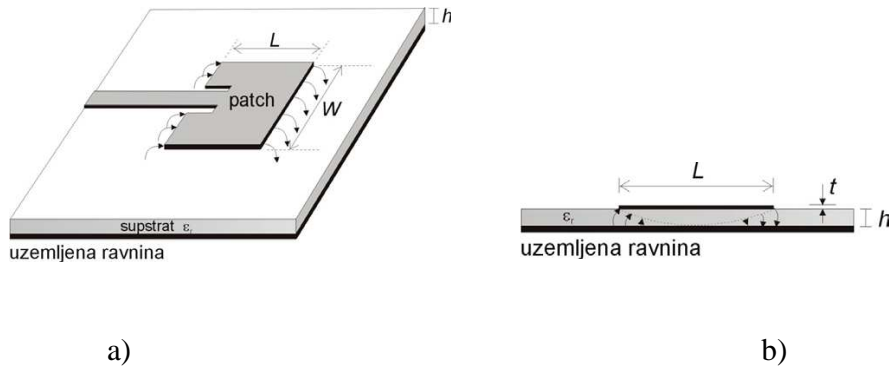


Slika 4.5. Osnovni oblici mikrotrakastih antena [24].

Kao i druge antene, mikrotrakaste antene također imaju svojih nedostataka, a glavni nedostatak je mala širina frekvencijskog pojasa (nekih par posto), te slaba iskoristivost. Te se mane mogu smanjiti, recimo povećanjem visine supstrata (porast iskoristivosti i preko 90% i

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

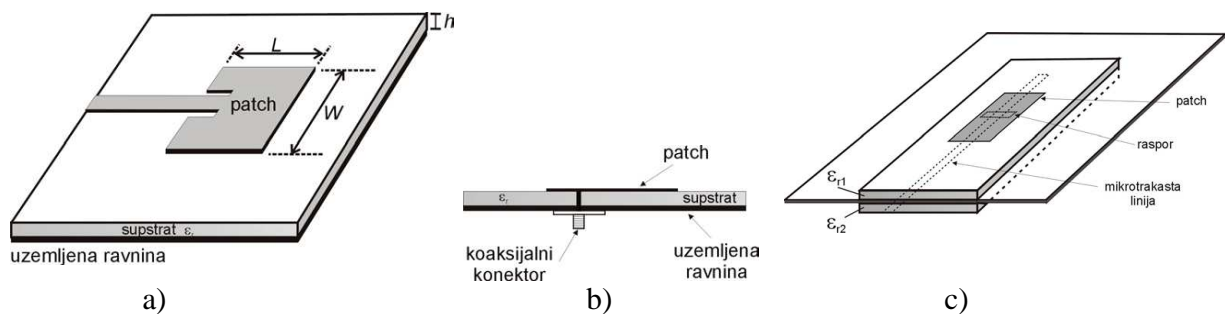
širina pojasa i do 35%) [24], [44]. No, nekontroliranim povećanjem visine supstrata pogoršava se dijagram zračenja.



Slika 4.6. Mikrotrakasta antena: a) 3D prikaz; b) presjek mikrotrakaste antene [24].

Slika 4.6. prikazuje mikrotrakastu antenu i njezine osnovne parametre.

Postoje različiti načini kojima se može pobuđivati mikrotrakasta antena. Najčešći načini su pobuda preko mikrotrakaste linije, pobuda preko koaksijalne linije, te pobuda preko raspora - Slika 4.7. [24].



Slika 4.7. Vrste pobuda mikrotrakaste antene: a) pobuda pomoću mikrotrakaste linije; b) pobuda pomoću koaksijalne linije; c) pobuda pomoću raspora [24].

Mikrotrakasta linija predstavlja usku vodljivu liniju obično manje širine od širine mikrotrakaste antene. Izrada nije komplicirana, a samim tim pojednostavljuje se izrada antenskih nizova jer se i mikrotrakaste antene i pobudna mreža izrađuju na istom supstratu.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Koaksijalna linija je način napajanja gdje je unutarnji priključak spojen na mikrotrakastu antenu, a vanjski na uzemljenu površinu. Proizvodnja i montaža koaksijalne prijenosne linije je vrlo jednostavna.

Ako je u pitanju pobuda preko raspora, onda sama pobuda nema direktni kontakt s mikrotrakastom antenom. Realizacija ovakve pobude najteža je od prethodno spomenutih, ali je primjenjiva za masovnu proizvodnju. Širina frekvencijskog pojasa mikrotrakaste antene pobuđene preko raspora veća je nego kod mikrotrakaste ili koaksijalne pobude. Kod ovakve vrste pobude postoje dva sloja supstrata odvojena vodljivom površinom. Ispod donjeg supstrata nalazi se mikrotrakasta linija čija je energija spregnuta s mikrotrakastom antenom preko raspora na vodljivoj plohi koja odvaja dva supstrata. Ovakva konfiguracija omogućuje neovisno optimiranje pobudne mreže i mikrotrakaste antene. Obično se za donji dielektrik koristi tanki materijal sa velikom dielektričnom konstantom, dok za gornji dielektrik služe deblji materijali sa malom dielektričnom konstantom. Vodljiva površina između supstrata izolira pobudu od zračenja radijacijskog elementa i smanjuje utjecaj parazitne radijacije na dijagram zračenja i čistoću polarizacije. Električki parametri supstrata, duljina pobudne linije, veličina i pozicija raspora su parametri s kojima se modeliraju željene karakteristike antene [24].

Mikrotrakaste antene često se koriste za antenske sustave upravo zbog svog tankog profila, male mase, niskih troškova, a također se mogu prilagoditi i podlozi na kojoj trebaju biti montirane. Ako je radijus zakrivljene podloge velik, antena se može analizirati kao planarni sustav. No, ako podloga nije takvih osobina, primjenjuju se drukčije metode koje odgovaraju zakrivljenoj površini [52].

4.2.1. Zračenje mikrotrakaste antene na sfernoj podlozi

Slične relacije kao za otvor antene vrijede i za mikrotrakaste antene smještene na sfernoj podlozi napajane koaksijalnom linijom. U ovom slučaju imamo stvarne struje na površini antene, pa je tako i tu prvi korak u analizi određivanje upravo te površinske struje. Problem se rješava preko graničnih uvjeta koji kažu da je tangencijalna komponenta električnog polja na mikrotrakastoj anteni jednaka 0 [20].

$$(\mathbf{E}_{inc}(\mathbf{J}_{feed}) + \mathbf{E}_{scat}(\mathbf{J}_{patch}))_{tan}=0 \quad (4-22)$$

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

\mathbf{J}_{patch} i \mathbf{J}_{feed} označavaju struje na mikrotrakastoj anteni, odnosno pobudnoj strukturi. Nepoznata struja na mikrotrakastoj anteni razvija se u sumu poznatih baznih funkcija:

$$\mathbf{J}_{patch} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{J}_i. \quad (4-23)$$

Koeficijenti α_i određuju se primjenom moment metode – također Galerkinova metoda. Povezivanjem (4-22) i (4-22), slijedi zapis:

$$-\sum_{i=1}^N \alpha_i (\mathbf{J}_j, \mathbf{E}_{scat}(\mathbf{J}_i)) = (\mathbf{J}_j, \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{J}_{feed})), \quad j=1, \dots, N \quad (4-24)$$

I u ovom slučaju se radi o sfernom koordinatnom sustavu, te se također na struje na mikrotrakastoj anteni primjenjuje vektor-Legendreova transformacija kako bi se 3D problem pretvorio u spektar 1D problema. Za mikrotrakaste antene vrijedi sljedeća relacija vektor-Legendreove transformacije:

$$\tilde{\mathbf{J}}(r, n, m) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_r \\ \tilde{\mathbf{J}}_\theta \\ \tilde{\mathbf{J}}_\phi \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi S(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} \bar{\bar{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \cdot \mathbf{J}(r, \theta, \phi) \cdot \sin \theta \cdot e^{-jm\phi} d\theta d\phi \quad (4-25a)$$

$$\mathbf{J}(r, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_r \\ \mathbf{J}_\theta \\ \mathbf{J}_\phi \end{bmatrix} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \bar{\bar{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \cdot \tilde{\mathbf{J}}(r, n, m) e^{jm\phi} \quad (4-25b)$$

$$\bar{\bar{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) = \begin{bmatrix} P_n^{|m|}(\cos \theta) \sqrt{n(n+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} & -jm P_n^{|m|}(\cos \theta) \\ 0 & \frac{jm P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (4-25c)$$

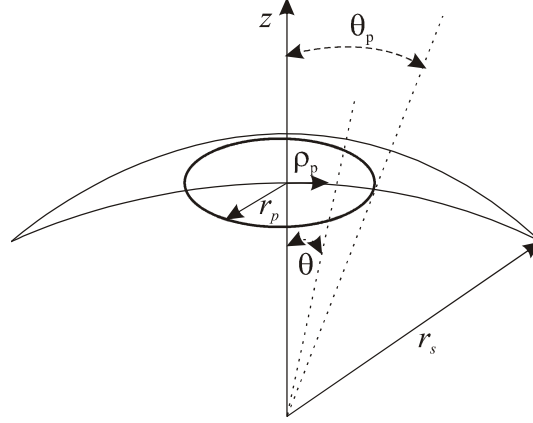
$$S(n, m) = \frac{2n(n+1)(n+|m|)!}{(2n+1)(n-|m|)!} \quad (4-25d)$$

Određivanje struje na mikrotrakastoj anteni primjenom metode momenata i transformacijom u spektralnu domenu detaljnije će biti obrađeno u sljedećem primjeru.

I u ovom slučaju će se promatrati idealno vodljiva sfera s jednom mikrotrakastom antenom, a propagira se dominantni mod – TM_{11} . Slika 4.8. prikazuje slučaj jedne mikrotrakaste antene,

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

radijus sfere jest r_s , a radijus mikrotrakaste antene r_p . Supstrat između sfere i antene je silikon dielektričnosti u rasponu 2 - 8.



Slika 4.8. Kružna mikrotrakasta antena smještena na uzemljenoj sferi.

Struja na mikrotrakastoj anteni u prostornoj domeni ima sljedeći zapis:

$$\mathbf{J}(r, \theta, \phi) = k_{nm} J'_n(k_{nm} \rho) \cos n\phi \cdot \hat{\theta} + \frac{n}{A_s \theta} J_n(k_{nm} \rho) \sin n\phi \cdot (-\hat{\phi}), \quad (4-26)$$

gdje je $\rho_p = r_s \theta$, a za $\rho_p = r_p$, na rubu mikrostrip antene ne postoji promjena struje $\rightarrow J'_n(k_{nm} r_p) = 0$.

$k_{nm} = \frac{1.841}{r_p}$, za TM_{11} mod [53], pa struja na mikrotrakastoj anteni izgleda za TM_{11} mod kao:

$$\mathbf{J}(r, \theta, \phi) = \frac{1.84}{r_p} J'_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \cos \phi \cdot \hat{\theta} + \frac{1}{r_s \theta} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin \phi \cdot (-\hat{\phi}). \quad (4-27)$$

Transformacijski par:

$$\tilde{f}(r, n, m) = \frac{1}{2\pi \mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \mathbf{f}(r, \theta, \phi) \sin \theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi \quad (\text{iz prostorne u frekvencijsku}), \quad (4-28)$$

$$\mathbf{f}(r, \theta, \phi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \tilde{f}(r, n, m) e^{jm\phi} \quad (\text{iz frekvencijske u prostornu domenu}) \quad (4-29)$$

pomaže nam da struju prebacimo iz prostorne u frekvencijsku domenu i obrnuto. Idući je korak u proračunu struju prebaciti u spektralnu domenu uz pomoć vektor-Legendreove transformacije.

$$\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \mathbf{f}(r, \theta, \phi) = \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n, m, \theta) \mathbf{J}(r, \theta, \phi) =$$

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

$$= \begin{bmatrix} P_n^{|m|}(\cos \theta) \sqrt{n(n+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} & -jmP_n^{|m|}(\cos \theta) \\ 0 & \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} & \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_r \\ J_\theta \\ J_\phi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0+0+0 \\ 0 + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\theta - \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\phi \\ 0 + \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\theta + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\theta - \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\phi \\ \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\theta + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\phi \end{bmatrix}, \text{ pa je struja}$$

po komponentama:

$$\mathbf{J}(r, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} 0 \\ J_\theta \\ J_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\theta - \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\phi \\ \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\theta + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\phi \end{bmatrix}. \quad (4-30)$$

Za prvi mod, mod TM_{11} , u spektralnoj domeni struje izgledaju, theta i phi komponenta:

$$\tilde{J}_\theta(r, n, m) = \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\theta - \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\phi \right) \sin \theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi, \text{ te} \quad (4-31)$$

$$\tilde{J}_\phi(r, n, m) = \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \cdot J_\theta + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \cdot J_\phi \right) \sin \theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi. \quad (4-32)$$

Slijedi detaljni izvod relacija theta i phi komponenti struja na mikrotrakastoj anteni za TM_{11} mod korištenjem spektralne metode.

a) Theta komponenta struje:

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\theta(r, n, m) = & \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \frac{1.84}{r_p} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \cos \phi \right] \sin \theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi \\ & - \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \left[-\frac{1}{r_s \theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \phi \right] \sin \theta \right\} e^{-jm\phi} d\theta d\phi. \end{aligned} \quad (4-33)$$

Nadalje, integrali se mogu rješavati posebno:

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\theta(r, n, m) = & \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \phi e^{-jm\phi} d\phi \int_0^{\pi} \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} \frac{1.84}{r_p} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta \\ & + \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \phi e^{-jm\phi} d\phi \int_0^{\pi} \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \frac{1}{r_s \theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta. \end{aligned}$$

Integriranjem po phi, dobiju se rješenja integrala:

$$\text{za } m = \pm 1, \int_{-\pi}^{\pi} \cos \phi e^{-jm\phi} d\phi = \pi,$$

$$\text{za } m = 1, \int_{-\pi}^{\pi} \sin \phi e^{-jm\phi} d\phi = \frac{\pi}{2},$$

$$\text{za } m = -1, \int_{-\pi}^{\pi} \sin \phi e^{-jm\phi} d\phi = -\frac{\pi}{2}, \text{ jer su integrali različiti od nule samo za } m = \pm 1.$$

Konačno se theta komponenta struje može zapisati:

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\theta(r, n, m) = & \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1.84}{r_p} \pi \int_0^{\pi} \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta \\ & + \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} (-2j) \frac{\pi}{2} \frac{1}{r_s} \int_0^{\pi} \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \frac{1}{\theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta; \text{ za } m = 1, \end{aligned} \quad (4-34)$$

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\theta(r, n, m) = & \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1.84}{r_p} \pi \int_0^{\pi} \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\partial \theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta \\ & + \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} (-2j) \left(-\frac{\pi}{2} \right) \frac{1}{r_s} \int_0^{\pi} \frac{jmP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \frac{1}{\theta} J_1 \left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta \right) \sin \theta d\theta; \text{ za } m = -1, \end{aligned} \quad (4-35)$$

0, inače.

b) Phi komponenta struje:

Analogno rješavanju theta komponente struje, phi komponenta se rješava na isti način.

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\phi(r, n, m) &= \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\frac{jmP_n^{m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \frac{1.84}{r_p} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \cos\phi \right] \sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi \\ &+ \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\frac{\partial P_n^{m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} \left(-\frac{1}{r_s \theta}\right) J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin\phi \right] \sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi. \end{aligned} \quad (4-36)$$

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\phi(r, n, m) &= \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1.84}{r_p} \pi \int_0^\pi \frac{jmP_n^{m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin\theta d\theta \\ &- \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1}{r_s} (-2j) \frac{\pi}{2} \int_0^\pi \frac{\partial P_n^{m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} \frac{1}{\theta} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin\theta d\theta; \text{ za } m = 1, \end{aligned} \quad (4-37)$$

$$\begin{aligned} \tilde{J}_\phi(r, n, m) &= \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1.84}{r_p} \pi \int_0^\pi \frac{jmP_n^{m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin\theta d\theta \\ &- \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \frac{1}{r_s} (-2j) \left(-\frac{\pi}{2}\right) \int_0^\pi \frac{\partial P_n^{m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} \frac{1}{\theta} J_1\left(\frac{1.84}{r_p} r_s \theta\right) \sin\theta d\theta; \text{ za } m = -1, \end{aligned} \quad (4-38)$$

O, inače.

Slične se relacije i na sličan način dobiju za više modove. [53] računa korjene jednadžbe $J_n'(x) = 0$ - derivacije Besselove funkcije n - te vrste, te po tome i slaže propagacijske modove.

Sljedeća tablica prikazuje prvih pet rješenja jednadžbe:

Tablica 4.1. Prvih pet korjena jednadžbe $J_n'(x) = 0$.

| (n, m) | X |
|----------|-------|
| (1,1) | 1,841 |
| (2,1) | 3,054 |
| (0,1) | 3,832 |
| (3,1) | 4,201 |
| (1,2) | 5,331 |

\mathbf{E}_{scat} – raspršno električno polje na patch anteni definira se kao inverzna vektor-Legendreova transformacija:

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

$$\bar{\mathbf{E}}_{scat}(\mathbf{J}_i) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \bar{\mathbf{L}}(n, m, \theta) \cdot \tilde{\tilde{\mathbf{G}}}(n, m, r_{patch} | r_{patch}) \tilde{\mathbf{J}}_i(n, m) e^{jm\phi}, \quad (4-39)$$

$\tilde{\tilde{\mathbf{G}}}(n, m, r_{patch} | r_{patch})$ predstavlja Greenovu funkciju za sferu i to u spektralnoj domeni. Dalje, električno polje pobuđeno strujom \mathbf{J} na sferi radijusa r iznosi:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \bar{\mathbf{L}}(n, m, \theta) \cdot \tilde{\tilde{\mathbf{G}}}(n, m, r | r_{patch}) \tilde{\mathbf{J}}(n, m) e^{jm\phi}. \quad (4-40)$$

$\tilde{\tilde{\mathbf{G}}}(n, m, r | r_{patch})$ je Greenova funkcija u spektralnoj domeni, a izračunava se G1DMULT algoritmom. Ako promatramo npr. Φ -komponentu električnog polja u nekoj točki prostora čiji je radijus r veći od radijusa mikrotrakaste antene, tada u promatranoj točki postoje samo odlazni putujući valovi opisani sa $a_{nm}^i \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r) / r$. Također se θ -komponenta električnog polja opisuje s $a_{nm}^i \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r) / r$.

Poznavanjem vrijednosti električnog polja na nekoj sferi radijusa r_2 možemo naći vrijednost električnog polja u bilo kojoj točki pomoću:

$$\tilde{E}_\phi(r_1, n, m) = \tilde{E}_\phi(r_2, n, m) \frac{r_2 \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1)}{r_1 \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2)} \approx \tilde{E}_\phi(r_2, n, m) = \frac{r_2}{r_1} \frac{j^{n+1} e^{-jk_0 r_1}}{\hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2)} \quad (4-41)$$

$$\tilde{E}_\theta(r_1, n, m) = \tilde{E}_\theta(r_2, n, m) \frac{r_2 \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_1)}{r_1 \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_2)} \approx \tilde{E}_\theta(r_2, n, m) = \frac{r_2}{r_1} \frac{j^n e^{-jk_0 r_1}}{\hat{H}_n^{(2)'}(k_0 r_2)}. \quad (4-42)$$

Konačno rješenje dobiva se superpozicijom svih spektralnih modova. Stoga, daleko polje pobuđeno promatranom antenom možemo zapisati:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{1}{2\pi\mathcal{S}(n, m)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \bar{\mathbf{L}}(n, m, \theta) \cdot \bar{\mathbf{H}}(n) \cdot \tilde{\tilde{\mathbf{G}}}(n, m, r_2 | r_{patch}) \tilde{\mathbf{J}}(n, m) e^{jm\phi}, \quad (4-43)$$

a matrica $\bar{\mathbf{H}}(n)$ može se zapisati kao:

$$\bar{\mathbf{H}}(n) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{j^n r_2}{H_n^{(2)'}(k_0 r_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{j^{n+1} r_2}{H_n^{(2)}(k_0 r_2)} \end{bmatrix}.$$

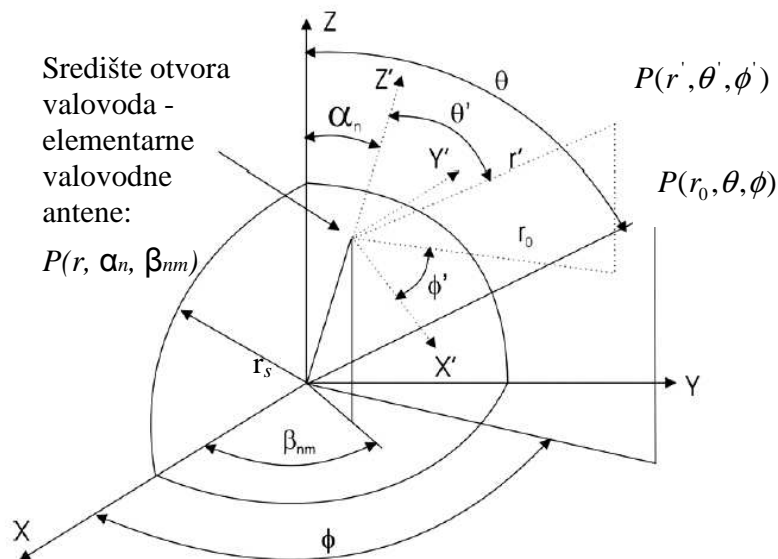
4.3. ZRAČENJE ANTENSKOG NIZA NA SFERNOJ PODLOZI

Oblikovanje i upravljanje dijagramom zračenja moguće je ostvariti ako se više antena postavi na neku podlogu (npr. sfernu) oblikujući (konformni) antenski niz.

Dijagram zračenja jednog antenskog elementa (valovod ili mikrotrakasta antena) pokazao se dosta širokim, a usmjerenost relativno mala. Kako bi se ostvario prijenos signala i na veće udaljenosti, jedan element zamjenjujemo antenskim nizom čime se u stvari povećava električna veličina antene. Često su elementi niza identični, ali to ne mora biti nužno (u daljim razmatranjima, antene će biti iste).

Ukupno se električno polje može izračunati vektorskom sumom električnog polja svakog pojedinog elementa niza.

Ishodište globalnog koordinatnog sustava je u središtu sfere, no, ishodište lokalnog koordinatnog sustava smješteno je u centru svakog pojedinog elementa na sferi. Os z' (z os lokalnog koordinatnog sustava) orijentirana je u smjeru maksimalnog zračenja pojedinog elementa, odnosno u smjeru z osi svakog valovoda, dok je x' koordinatna os zarotirana oko osi z' za β_{nm} u odnosu na $z-z'$ ravninu i to stoga da bi svaka valovodna antena niza imala polarizaciju ravninu paralelnu sa polarizacijskom ravninom centralnog valovoda. Sljedeća slika prikazuje globalni i lokalni koordinatni sustav.



Slika 4.9. Globalni i lokalni koordinatni sustav [2], [6].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Ako je središte svakog pojedinog elementa točka $P(r, \alpha_n, \beta_{nm})$, koordinate u lokalnom koordinatnom sustavu θ' i ϕ' , kao i jedinični vektori $\hat{e}_{\theta'}$ i $\hat{e}_{\phi'}$ određeni su sljedećim jednadžbama [6]:

$$\cos \theta' = \sin \alpha_n \sin \theta \cos(\phi - \beta_{nm}) + \cos \alpha_n \cos \theta \quad (4-44)$$

$$\operatorname{ctg} \phi' = \frac{\cos \alpha_n \sin \theta \cos(\phi - \beta_{nm}) - \sin \alpha_n \cos \theta}{\sin \theta \sin(\phi - \beta_{nm})} \quad (4-45)$$

$$\hat{e}_{\theta'} = -\frac{\cos \theta \sin \alpha_n \cos(\phi - \beta_{nm}) - \sin \theta \cos \alpha_n}{\sin \theta'} \hat{e}_{\theta} + \frac{\sin \alpha_n \sin(\phi - \beta_{nm})}{\sin \theta'} \hat{e}_{\phi} \quad (4-46)$$

$$\hat{e}_{\phi'} = -\frac{\sin \alpha_n \sin(\phi - \beta_{nm})}{\sin \theta'} \hat{e}_{\theta} - \frac{\cos \theta \sin \alpha_n \cos(\phi - \beta_{nm}) - \sin \theta \cos \alpha_n}{\sin \theta'} \hat{e}_{\phi} \quad (4-47)$$

Tangencijalne (θ i ϕ) komponente električnog polja (u globalnom koordinatnom sustavu) svakog elementa antenskog niza smještenog u točki $P(r, \alpha_n, \beta_{nm})$ određuju se relacijama:

$$E_{\theta, \alpha_n, \beta_{nm}}(\theta, \phi) = \left[\frac{\cos \theta \sin \alpha_n \cos(\phi - \beta_{nm}) - \sin \theta \cos \alpha_n}{\sin \theta'} f_{\theta}(\theta', \phi') + \frac{\sin \alpha_n \sin(\phi - \beta_{nm})}{\sin \theta'} f_{\phi}(\theta', \phi') \right] \quad (4-48)$$

$$E_{\phi, \alpha_n, \beta_{nm}}(\theta, \phi) = \left[\frac{\sin \alpha_n \sin(\phi - \beta_{nm})}{\sin \theta'} f_{\theta}(\theta', \phi') - \frac{\cos \theta \sin \alpha_n \cos(\phi - \beta_{nm}) - \sin \theta \cos \alpha_n}{\sin \theta'} f_{\phi}(\theta', \phi') \right] \quad (4-49)$$

gdje su $f_{\theta}(\theta', \phi')$ i $f_{\phi}(\theta', \phi')$ θ odnosno ϕ komponente dijagrama zračenja centralne valovodne antene. Kutevi pozicije centralne antene su: $\alpha_n = 0^0$, $\beta_{nm} = 0^0$, dok su kutevi točke promatranja lokalnog i globalnog koordinatnoga sustava za centralnu antenu: $\theta' = \theta$, $\phi' = \phi$.

Ukupno električno polje sfernog antenskog niza se dobije kao vektorska suma polja (doprinosa) svakog pobuđenog antenskog elementa niza tako da vrijedi:

$$\mathbf{E}(\theta, \phi) = \sum_{n,m} \mathbf{E}_{\alpha_n \beta_{nm}}(\theta, \phi). \quad (4-50)$$

4.4. KONFIGURACIJE ELEMENTARNIH ANTENA

Kad su antenski nizovi u pitanju, više je parametara koji utječu na dijagram zračenja, a u sklopu ove disertacije obradit će se sljedeći parametri, kao i njihov utjecaj na dijagram zračenja:

1. Geometrijska konfiguracija antenskog niza;
2. Razmak među elementima;
3. Amplituda pobude elemenata;
4. Faza pobude elemenata;
5. Kut maksimalnog zračenja niza.

S ciljem postizanja željenog dijagrama zračenja, elementi se na određeni način raspoređuju po sferi, nakon čega se pobuđuju tako da se ostvari konstruktivna inteferencija u željenom smjeru, dok u drugom smjeru imamo destruktivnu interferenciju. Često se ovakva situacija u praksi ne može u potpunosti realizirati.

Elementi se raspoređuju s ciljem mogućnosti zakretanja glavne latice preko cijele hemisfere, a dijagram zračenja se ne smije promijeniti.

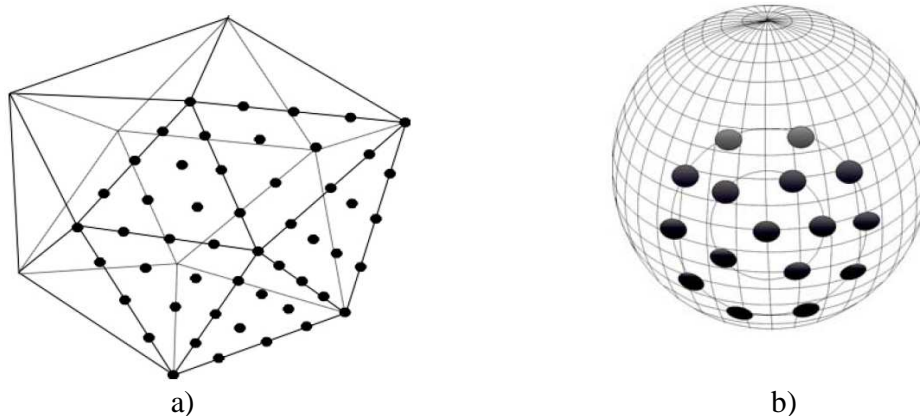
U okviru ovog istraživanja, obradit će se tri osnovne konfiguracije antenskih elemenata, uz dodatnu, slobodnu konfiguraciju na samom kraju istraživanja.

4.4.1. Ikosaedarska konfiguracija

Ikoasaedar predstavlja geometrijsko tijelo koje se sastoji od dvadeset jednakostraničnih trokuta, trideset bridova i dvanaest vrhova.

Najveći broj elemenata koje je moguće postaviti na sferu, a da se zasniva na ikosaedarskoj strukturi jest dvadeset, što je svakako malo u kontekstu usmjerenosti glavne latice. Uvjet za jednolikim rasporedom dvadeset antenskih elemenata na sferu predstavlja po jednu antenu u središte svakog jednakostraničnog trokuta koji čine ikosaedar.

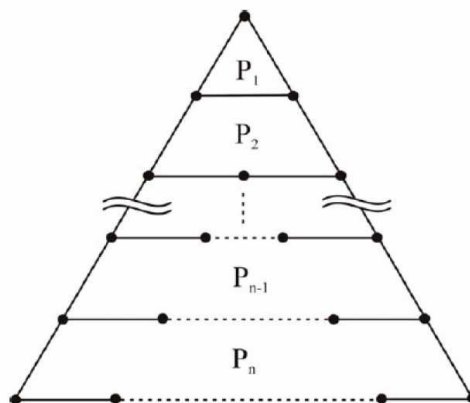
Situacija se može uvelike poboljšati, ako se svaki trokut podijeli u više jednakostraničnih trokuta i antenski elementi se postave u vrhove novodobivenih trokuta, a skoro je u potpunosti zadržana ideja raspodjele elemenata [6], [7]. Na Slici 4.10. prikazan je primjer takve raspodjele antenskih elemenata niza.



Slika 4.10. Geometrijski raspored elemenata koji čine antenski niz na sfernoj podlozi:

- a) jedan od rasporeda antenskih elemenata na ikosaedru,
- b) antenski niz sastavljen od 16 elemenata smješten na sferi [24].

Udaljenost elemenata jednaka je stranici novonastalog jednakostraničnog trokuta. Tako zamišljen raspored elemenata u stvarnosti se realizira njihovom projekcijom na sferu uz zanemarivo narušenu originalno postavljenu simetriju. Slika 4.11. prikazuje trokut izdvojen iz ikosaedarske strukture podijeljen na proizvoljan broj manjih jednakostraničnih trokuta [6], [7].



Slika 4.11. Podjela jednog od dvadeset trokuta koji čine ikosaedar u proizvoljan broj manjih jednakostraničnih trokuta [24].

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Raspored antenskih elemenata po ikosaedarskoj strukturi dan je sljedećim relacijama [6]:

- **elevacijski kut:**

$$\alpha_n = 90^\circ - \frac{30^\circ}{P_n} (2n - \text{sgn}(n) \cdot S) \quad (4-51)$$

gdje je: P_n - broj podioka po visini jednakostraničnog trokuta;

n - cijeli broj u rasponu $-N_{\max} \leq n \leq N_{\max}$;

$\text{sgn}(n)$ - predznak od n .

Pri tome je:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{za paran } P_n \\ 1, & \text{za neparan } P_n \end{cases} \quad (4-52)$$

$$N_{\max} = \frac{3P_n + S}{2} \quad (4-53)$$

- **za azimutalni kut:**

$$\beta_{nm} = \frac{72^\circ m}{N_{\max} - |n|}, \text{ za } n = N_{\max-1}, \dots, B \quad (4-54)$$

$$\beta_{nm} = 180^\circ + \frac{72^\circ m}{N_{\max} - |n|}, \text{ za } n = -N_{\max-1}, \dots, B \quad (4-55)$$

$$\beta_{nm} = \beta_{\pm nm} + \frac{180^\circ}{M(B) + 1} K, \text{ za } n = \pm 1, \dots, \pm(B-1) \text{ za } S=1$$

$$\text{za } n = 0, \pm 1, \dots, \pm(B-1) \text{ za } S=0 \quad (4-56)$$

gdje je:

$$K = \begin{cases} 0, & \text{za paran } (B - n) \\ 1, & \text{za neparan } (B - n) \end{cases} \quad (4-57)$$

$$B = \frac{P_n + S}{2}, \quad (4-58)$$

m je pozitivan cijeli broj u rasponu $0 - M(n)$, a $M(n)$ dan je s:

$$M(n) = \begin{cases} M(0) & - \text{ne postoji za } S = 1 \\ M(0) = M(\pm 1) = \dots = M(B) & - \text{za } S = 0 \\ M(\pm 1) = \dots = M(B) & - \text{za } S = 1 \\ M(N_{\max}) = 0 \\ M(n) = 5(N_{\max} - |n|) - 1 & - \text{za } \pm(N_{\max} - 1), \dots, \pm B \end{cases} \quad (4-59)$$

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Ako je raspodjela elemenata dana prethodnim relacijama, broj antenskih elemenata korištenih za različite vrijednosti α dan je Tablicom 4.2. kada je $\theta_0=0$.

Tablica 4.2. Broj antenskih elemenata smještenih na jednoj polusferi.

| n | α_n | Broj antenna na n -tom prstenu | Ukupni broj antena |
|-----|------------|----------------------------------|--------------------|
| 0 | 90° | 20 | 91 |
| 1 | 75° | 20 | 71 |
| 2 | 60° | 20 | 51 |
| 3 | 45° | 15 | 31 |
| 4 | 30° | 10 | 16 |
| 5 | 15° | 5 | 6 |
| 6 | 0° | 1 | 1 |

Udaljenost antenskih elemenata postavljenih u vrhove jednakostraničnih trokuta dana je izrazom:

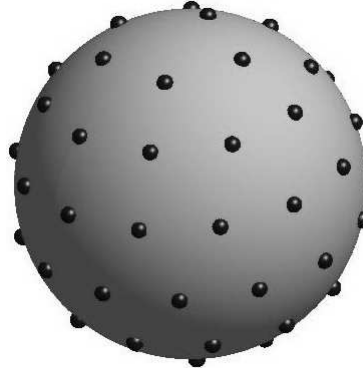
$$d = \frac{2\pi}{3P_n \sqrt{3}} r_s, \quad (4-60)$$

gdje je r_s radijus sfere opisane oko ikosaedarske strukture.

U PRILOGU I se nalazi detaljan raspored antenskih elemenata baziran na ikosaedarskoj strukturi.

4.4.2. Spiralna konfiguracija

Druga predstavljena konfiguracija je ona koja se temelji na spiralnom rasporedu antenskih elemenata. Relativno je jednostavna za izvedbu, a uvode ju Rakhmanov, Saff i Zhou [40], [41], te se koristi za veliki broj antena N . $\omega_N = (\theta_k, \varphi_k)$, za $1 \leq k \leq N$, naziva se spiralni skup na S^2 . Za $N = 60$, a ove su točke prikazane Slikom 4.12.



Slika 4.12. Spiralna distribucija $N = 60$ antenskih elemenata na sferi [41].

Položaj pojedinog elementa dobiven spiralnom distribucijom može se izračunati koristeći sljedeće formule.

Koristeći sferne koordinate (θ, φ) , za $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, za spiralnu konfiguraciju vrijedi:

$$\theta_k = \arccos(h_k), \quad h_k = -1 + \frac{2(k-1)}{(N-1)}, \quad 1 \leq k \leq N \quad (4-61)$$

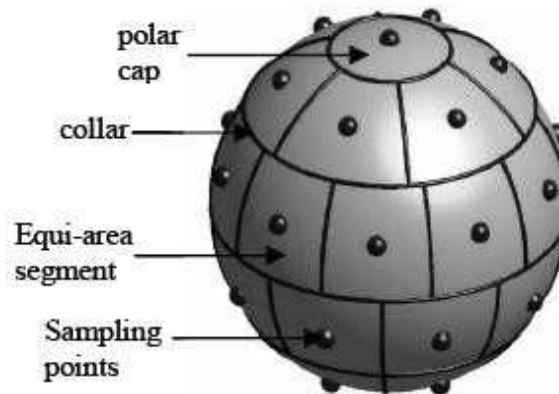
$$\phi_k = \left(\phi_{k-1} + \frac{3.6}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{1-h_k}} \right) (\text{mod } 2\pi), \quad 2 \leq k \leq N-1, \quad (4-62)$$

$$\phi_k = \phi_N = 0.$$

Sfera se dijeli na N horizontalnih ravnina razmaknutih za $2/(N-1)$, tvoreći tako N latituda na sferi. Prva i zadnja su degenerirani krugovi koji se sastoje od sjevernog i južnog pola. Svaka latituda sadrži jednu točku spirale. Kako bi se postigla k -ta točka spirale, polazi se od $(k-1)$ -te točke $(\theta_{k-1}, \varphi_{k-1})$ preko meridijana do sljedeće latituda i kreće se u smjeru suprotno od kazaljke na satu kako bi se došlo do k -te točke (θ_k, φ_k) (vidjeti PRILOG II).

4.4.3. Leopardi konfiguracija

Još jedna konfiguracija po kojoj se antenski elementi mogu rasporediti jest Leopardi konfiguracija [40]. S ciljem da se 3D jedinična sfera podijeli u N regija jednakih površina, Paul Leopardi [42] uvodi princip raspodjele sfere viših dimenzija i malih polumjera.



Slika 4.13. Podjela sfere u $N=33$ dijela jednakih površina, gdje točke predstavljaju središte svake regije [41].

Svaka je regija definirana kao produkt intervala u sfernim polarnim koordinatama. Središnja točka svake regije definirana je preko središnje točke svakog intervala, s tim da su izuzete polarne kapice gdje je središnja točka definirana kao središte upravo te kapice [41].

Leopardi algoritam podjele sfere EQ (d, N) (d = dimenzija, N = broj elemenata) izvodi se u nekoliko koraka [42]:

if $N = 1$ **then**

Postoji samo jedna regija – cijela sfera;

else if $d = 1$ **then**

Podijeliti krug u N jednakih segmenata;

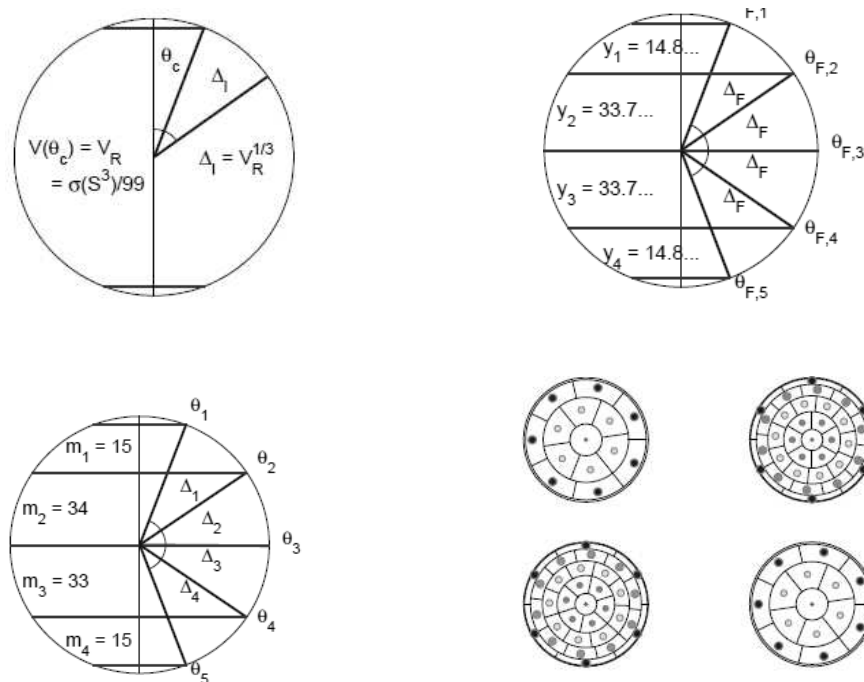
else

Podijeliti sferu u zone, svaka zona jednake površine kao cijeli broj regija:

1. Odrediti kolatitute polarnih kapica θ_c , (kut od osi z do završetka polarne kapice),
2. Odrediti idealni kut pojasa δ_I ,
3. Odrediti idealni broj pojasa n_I ,
4. Odrediti stvarni broj pojasa n ,
5. Odrediti idealni broj površina (jednakih regija po pojasu) y_I ,
6. Odrediti stvarni broj površina po pojasu m_I ,
7. Odrediti kolatitute svake zone (kut od osi z do odgovarajućeg pojasa).

Podijeliti svaki pojas sfere u dijelove

endif [42].



Slika 4.14. Podjela sfere na prstenove po Leopardi algoritmu [42].

Radi jasnoće, pretpostavit će se $d > 1$ i $N > 1$.

1. Određivanje kolatituda polarnih kapica.

Svaka polarna kapica jest sferna kapica jednake površine. Za podjelu sfere S^d u N regija, površina regija R je:

$$v_R := \Omega/N, \tag{4-63}$$

gdje je Ω površina S^d . (4-64)

Kolatituda donjeg dijela Sjeverne polarne kapice, θ_c je sferni radijus sferne kapice površine v_R . Iz toga slijedi:

$$\theta_c := \Theta(v_R). \tag{4-65}$$

Kolatituda gornjeg dijela Južne polarne kapice je tada $\pi - \theta_c$.

2. Određivanje idealnog kuta pojasa δ_I .

Kut pojasa – sferna udaljenost između gornjeg i donjeg dijela pojasa može se odrediti preko izraza:

$$\delta_I := v_R^{1/2}. \tag{4-66}$$

3. Određivanje idealnog broja pojasa.

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

Sfera se dijeli na Sjevernu i Južnu polarnu kapicu, te određen broj pojasa čiji kut iznosi δ_I . Idealni broj pojasa izračunava se kao:

$$n_I := \frac{\pi - 2\theta_c}{\delta_I}. \quad (4-67)$$

4. Određivanje stvarnog broja pojasa.

U ovom se koraku koristi procedura zaokruživanja na cijeli broj n najbliži idealnom broju pojasa.

if $N = 2$, then $n := 0$. **else**

$n := \max(1, \text{round}(n_I))$,

gdje je, za $x \geq 0$,

$\text{round}(x) := \lfloor x + 0.5 \rfloor$,

gdje je $\lfloor \cdot \rfloor$ funkcija zaokruživanja na prvi veći cijeli broj. Slijedi tada da je broj pojasa n .

5. Određivanje idealnog broja regija po pojasu.

Zone se broje južno, prva od Sjeverne polarne kapice do $n + 2$ za Južnu polarnu kapicu, tako da pojasevi imaju redni broj $i + 1$. Pretpostavlja se da je $N > 2$. 'Podešeni' kut pojasa je:

$$\delta_F := \frac{n_I}{n} \delta_I = \frac{\pi - 2\theta_c}{n}. \quad (4-68)$$

δ_F služi za određivanje 'podešenih' kuteva pojasa definiranih kao:

$$\theta_{F,i} := \theta_c + (i - 1) \delta_F, \quad (4-69)$$

za $i \in \{1, \dots, n+1\}$.

Idealni broj regija, y_i , u svakom pojasu za $i \in \{1, \dots, n+1\}$, je tada:

$$y_i := \frac{v(\theta_{F,i+1}) - v(\theta_{F,i})}{v_R}. \quad (4-70)$$

6. Stvaranje niza (liste) stvarnog regija u svakom pojasu.

Ovaj korak koristi proceduru zaokruživanja, n predstavlja broj pojasa, m_i predstavlja broj regija u pojasu $i \in \{1, \dots, n+1\}$. Definira se niz a i m polazeći od $a_0 := 0$, a za $i \in \{1, \dots, n+1\}$,

$$m_i := \text{round}(y_i + a_{i-1}), \quad a_i := \sum_{j=1}^i (y_j - m_j). \quad (4-71)$$

7. Odrediti kolatitute svake zone.

Definira se $\theta_0 := 0$, $\theta_{m+2} := \pi$ i za $i \in \{1, \dots, n+1\}$, vrijedi:

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

$$\theta_i := \Theta \left[\left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} m_j \right) v_R \right]. \quad (4-72)$$

Za $i \in \{1, \dots, n+1\}$, koristi se Z za definiranje zone $i+1$ kako bi bilo $Z(\theta_i, \theta_{i+1})$. Na kraju, za $i \in \{1, \dots, n\}$, definira se pojas i da bude zona $i+1$.

U PRILOGU III dan je raspored antena po Leopardievoj konfiguraciji.

To su bila razmatranja o tri osnovne konfiguracije elemenata antenskih nizova, a ono što dalje slijedi jest optimiranje dijagrama zračenja takvih nizova, te sinteza dijagrama zračenja slobodne konfiguracije elemenata na sferi (poglavlja 5., 6. i 7.).

5. OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA NA SFERI PO POJEDINAČNIM PARAMETRIMA KORIŠTENJEM METODE DIREKTOG PRETRAŽIVANJA SVEUKUPNOG PROSTORA

Antenski nizovi, za razliku od pojedinačnih antena, imaju mogućnost oblikovanja dijagrama zračenja niza promjenom različitih geometrijskih i/ili pobudnih parametara. Na taj način moguće je ostvariti željeni oblik dijagrama zračenja za različite namjene te usmjeravati zračenu snagu u određen prostor. Namjena antenskog niza, u sklopu ovog istraživanja jest skeniranje prostora. Stoga se oblikovanjem antenskog niza mora postići što širi kut pokrivanja prostora u svim smjerovima, što predstavlja veliko područje rada u azimutalnom i elevacijskom smjeru. U svrhu preciznog skeniranja prostora, dijagram zračenja mora biti tako oblikovan da glavna latica dijagrama zračenja bude što uža, a bočne latice što niže radi smanjenja rasipanja energije koju nosi EM val u smjeru koje nije od interesa.

Optimizacija antenskih nizova na sfernoj podlozi odvija se u tri koraka. Prvi se odnosi na optimizaciju dijagrama zračenja sferne strukture u dalekom polju uz upotrebu *metode direktnog pretraživanja* prostora parametara za tri različite konfiguracije antenskih elemenata: ikosaedarsku, Leopardi i spiralnu. Pri ovoj optimizaciji nastoji se utvrditi kako i koliko utjecaja ima svaki od parametara antenskog niza na dijagram zračenja da bi ti rezultati bili informacije koje se mogu koristiti u sljedećim koracima optimizacije i sinteze. Drugi dio predstavlja optimizaciju dijagrama zračenja antenskih nizova istih konfiguracija, ali uz upotrebu PSO (eng. *Particle Swarm Optimization*) algoritma. Posljednji korak predstavlja sintezu dijagrama zračenja sfernog niza slobodne konfiguracije elemenata upotrebom PSO algoritma.

Parametri po kojima se optimira dijagram zračenja mogu se podijeliti na parametre pobude, te geometrijske parametre. U parametre pobude ubrajaju se amplituda, frekvencija, faza, polarizacija, te kut maksimalnog zračenja. Pri tome je važno je napomenuti da se, a radi osiguranja jednodnog režima rada, frekvencija ne mijenja kao parametar već je zadržana konstantnom (1,7 GHz – dominantni mod kružnih mikrotrakasatih antena - TM_{11} , te dominantni mod valovodom napajanih kružnih otvor antena - TE_{11}). Nadalje, uobičajeni i najrašireniji postupak oblikovanja dijagrama zračenja korištenjem pobude s promjenjivim faznim kutom (uslijed različitog položaja antenskih elemenata na sferi) zbog osiguranja istofaznosti odlaska (i dolaska) EM valova koje generira svaki antenski element jest primijenjen. U geometrijske parametre optimizacije spada niz parametara koji se odnose na

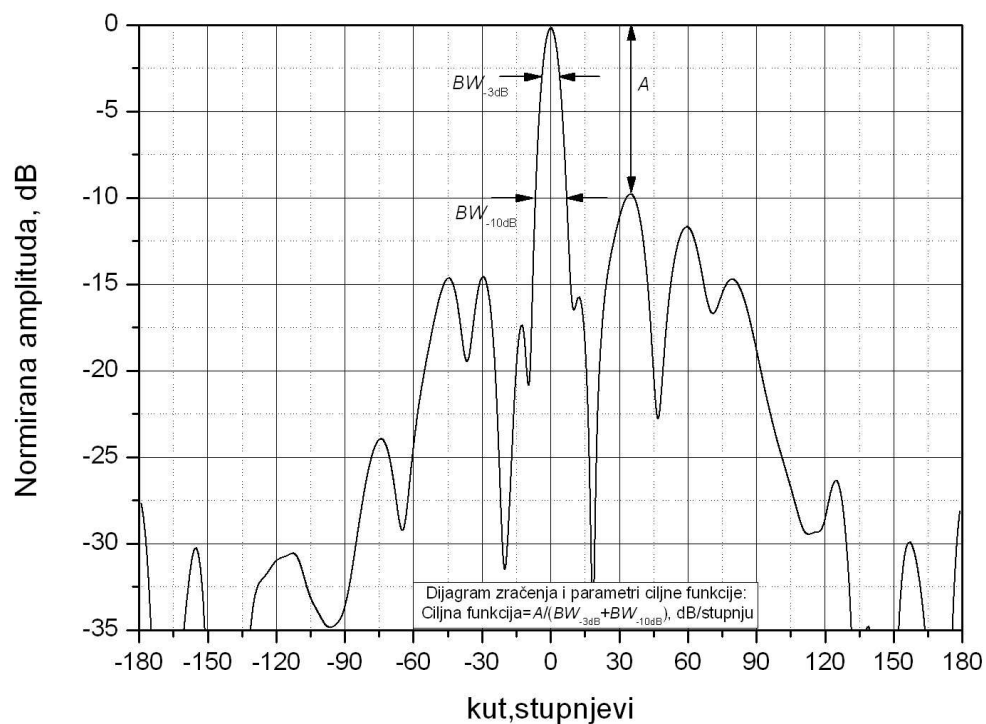
geometriju izvedbe antenskog niza od kojih su za analizu odabrani: radijus sfere, broj elemenata, te njihov raspored na podlozi. Podloga niza je idealna vodljiva sfera na koju su postavljene mikrotrakaste antene polumjera 2,65 cm ili otvoreni valovodi polumjera 6 cm. Problem sprege riješen je tako da je minimalni razmak između elemenata između $0,4\lambda$ i $0,5\lambda$.

Metoda direktnog pretraživanja sveukupnog prostora je metoda sustavne uniformne promjene parametra optimizacije unutar opsega njegovih vrijednosti koji značajno utječe na promjenu ciljne funkcije.

Algoritam izračuna koji se koristi pri tome, može se prikazati sljedećim koracima:

- Izračun dijagrama zračenja dominantnog moda (TM_{11} kod mikrotrakastih nizova ili TE_{11} kod valovodnih nizova) primjenom MoM metode u okviru koje se, za određivanje Greenove funkcije u spektralnoj domeni, koristi G1DMULT rutina za sferni slučaj. Pri tome su svi parametri nepromjenjivi osim parametra čiji se utjecaj na ciljnu funkciju (dijagram zračenja) ispituje.

- Izračun ciljne funkcije. Za izračun ciljne funkcije potrebno je odrediti širinu glavne latice (*eng.* beam width) kada maksimalna vrijednost polja opadne za 3 dB (BW_{-3dB}), širinu glavne latice kada maksimalna vrijednost polja opadne za 10 dB (BW_{-10dB}), te vrijednost najveće bočne latice A u odnosu na vrijednost maksimuma glavne latice (*eng.* side lobe level - *SLL*) kao što je prikazano na Slici 5.1.



Slika 5.1. Dijagram zračenja antenskog niza i karakteristične veličine kojima su definirane ciljne funkcije.

Ciljne funkcije (još i kriterijske, te fitness funkcije u literaturi) (*eng.* fitness function) kao funkcije po kojima se ravna optimizacijski proces izuzetno su važne stoga što se preko njih definira ono što je u tom procesu relevantno. U ovom radu definirane su dvije ciljne funkcije, a u programu se određuje njihov maksimum. Prva je definirana relacijom:

$$CF_1 = \frac{A}{BW_{-3dB} + BW_{-10dB}}, \quad (5-1)$$

a koristi se u prvom dijelu istraživanja pri određivanju utjecaja pojedinih parametara antenskog niza na dijagrama zračenja u svakoj od dvije ortogonalne ravnine (E ravnina i H ravnina). Druga ciljna funkcija definirana je kao aritmetička sredina dvije ciljne funkcije u dvije osnovne ravnine, prema relaciji:

$$CF_2 = \frac{\left(\frac{A}{BW_{-3dB} + BW_{-10dB}} \right)_E + \left(\frac{A}{BW_{-3dB} + BW_{-10dB}} \right)_H}{2} \quad (5-2)$$

i koristi se u nastavku rada, dakle pri optimizaciji i sintezi. Razlog uvođenja druge relacije ciljne funkcije jest optimizacijsko ujednačavanje oblika dijagrama zračenja u dvije ortogonalne ravnine. Naime, optimirani dijagrami zračenja po pojedinim ravninama, dobiveni u prvom dijelu istraživanja, pokazuju velika odstupanja oblika dijagrama zračenja, a time i velike razlike iznosa ciljnih funkcija u dvije ortogonalne ravnine. Potreba jednoznačnog određenja ciljne funkcije za obje ravnine uvjetovala je definiranje i uvođenje nove ciljne funkcije.

Iz prethodnih relacija može se vidjeti definicija ciljnih funkcija kao kriterija optimizacije za određeni parametar.

Osim ciljnih funkcija za sve konfiguracije antenskih nizova na sfernoj podlozi definiran je uvjet minimalne udaljenosti antenskih elemenata kojim se minimizira utjecaj sprege. Tako je u svaku od računalnih rutina koje se koriste unesen izračun i provjera minimalne udaljenosti dva zračeca elementa. Minimalna vrijednost udaljenosti ne smije pasti ispod $0,4\lambda$. Ovaj se uvjet koristi u cjelokupnom istraživanju u ovom i idućim poglavljima, a izračun udaljenosti je izveden korištenjem Haversineove relacije [62], [63]:

$$\text{haver sin}(d / R) = \text{haver sin}(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_2) \cdot \text{haver sin}(\Delta\beta) \quad (5-3)$$

gdje je:

- $\text{haversin}(\theta) = \sin^2(\theta/2) = (1 - \cos(\theta))/2$
- d je udaljenost između dvije točke (T_1 i T_2) na sferi radijusa R ;

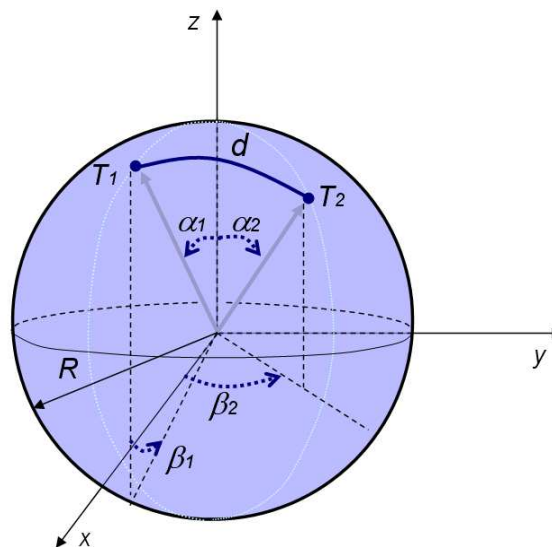
- $\alpha_1 = 90 - \varphi_1$ je elevacijski kut pozicije točke T_1 na sferi;
- $\alpha_2 = 90 - \varphi_2$ je elevacijski kut pozicije točke T_2 na sferi;
- $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ je razlika azimutalnih kuteva pozicije druge i prve točke na sferi.

Udaljenost dvije točke na sferi prikazana ja na slici 5.2. i može se odrediti prema relaciji:

$$d = R \cdot \text{haver} \sin^{-1}(h) = 2 \cdot R \cdot \arcsin(\sqrt{h}) \quad (5-4)$$

gdje je:

$$- h = \text{haversin}(d/R)$$



Slika 5.2. Udaljenost dvije točke na sferi radijusa R .

Ovo istraživanje služi kao preliminarno istraživanje promjene dijagrama zračenja (ciljnih funkcija) pri promjeni pojedinog parametara, kao i određivanje vrijednosti pojedinih parametara, te graničnih vrijednosti pojedinih parametara u svakoj od ravnina u kojima se određuje ciljna funkcija. Tako promjena određenog parametra koja povećava vrijednost ciljne funkcije, a time i poboljšava oblik dijagrama zračenja prema definiranoj ciljnoj funkciji, ukazuje na opseg, smjer i način na koji je potrebno mijenjati taj parametar u idućim razinama optimizacije.

5.1. IKOSAEDARSKA KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA

Konfiguracija antenskih elemenata niza na sfernoj podlozi temeljena na geometrijskom tijelu ikosaedru uz dodatnu podjelu ploha ikosaedra na podplohe je konfiguracija uvedena 1968. od strane D.Sengupte. Ovo jest prva konfiguracija kod koje je izvedena optimizacija dijagrama zračenja po osnovnim geometrijskim i pobudnim parametrima korištenjem metode direktnog pretraživanja cjelokupnog prostora. U ovom se dijelu istražuje utjecaj sljedećih parametra na dijagram zračenja niza:

- gustoća antenskih elemenata osnovne konfiguracije koja je definirana brojem elementarnih antena niza pri uniformnom rasporedu elementarnih antena po ikosaedru uz različit broj podjela osnovnog trokuta ikosaedra. Pri tome je gustoća antenskih elemenata, za svaku podjelu osnovnog trokuta, približno jednolika.
- gustoće antenskih elemenata pri neuniformnom rasporedu elementarnih antena na sfernoj podlozi, uz zadržavanje ikosaedarske strukture za jedan (u prethodnom koraku utvrđen) optimalan broj podjela osnovnog trokuta ikosaedra. Broj elementarnih antena jednak je broju u prethodnom slučaju, ali je gustoća antenskih elemenata po elevacijskom kutu promjenjiva. Ta je promjena definirana s tri funkcije: eksponencijalnom (konveksna), linearnom i obrnuto eksponencijalnom (konkavna).
- amplituda pobude svakog antenskog elementa pri čemu je promjena amplitude također definirana funkcijama kojima je bitan parametar (varijabla) elevacijski kut antenskog niza. Ove funkcije su istog tipa kao i kod promjene gustoće antenskih elemenata: eksponencijalna (konveksna), linearna i obrnuto eksponencijalna (konkavna).
- polarizacija pobude svakog antenskog elementa. Promjena polarizacije je također definirana funkcijama kojima je bitan parametar (varijabla) elevacijski kut antenskog niza, funkcije su istog tipa kao i kod promjene gustoće antenskih elemenata i amplitude pobude: eksponencijalna (konveksna), linearna i obrnuto eksponencijalna (konkavna).
- kutevi maksimalnog zračenja. Promjena kuteva maksimuma zračenja, dakle preferiranog smjera zračenja niza, značajno mijenja oblik dijagrama zračenja te time i iznos ciljne funkcije. Utjecaj kuteva maksimalnog zračenja je istražen na

način uniformne promjene vrijednosti elevacijskog kuta sa konstantnim koracima promjene, uz zadržavanje azimutalnog kuta konstantnim i obrnuto.

Postavke izračuna za sve slučajeve pri ikosaedarskoj konfiguraciji su sljedeće:

- promjena faze pobude s promjenom elevacijskih kuteva antenskih elemenata na sferi;
- izračun je načinjen za dva radijusa sfere: $r_s = 30$ cm ($1,7\lambda$) i $r_s = 52,9$ cm (3λ);
- selekcijski kut konusa $\alpha_{sel} = 45^\circ$ (broj antena unutar konusa: 31);
- frekvencija pobude je 1,7 GHz i osigurava jednodni režim rada.

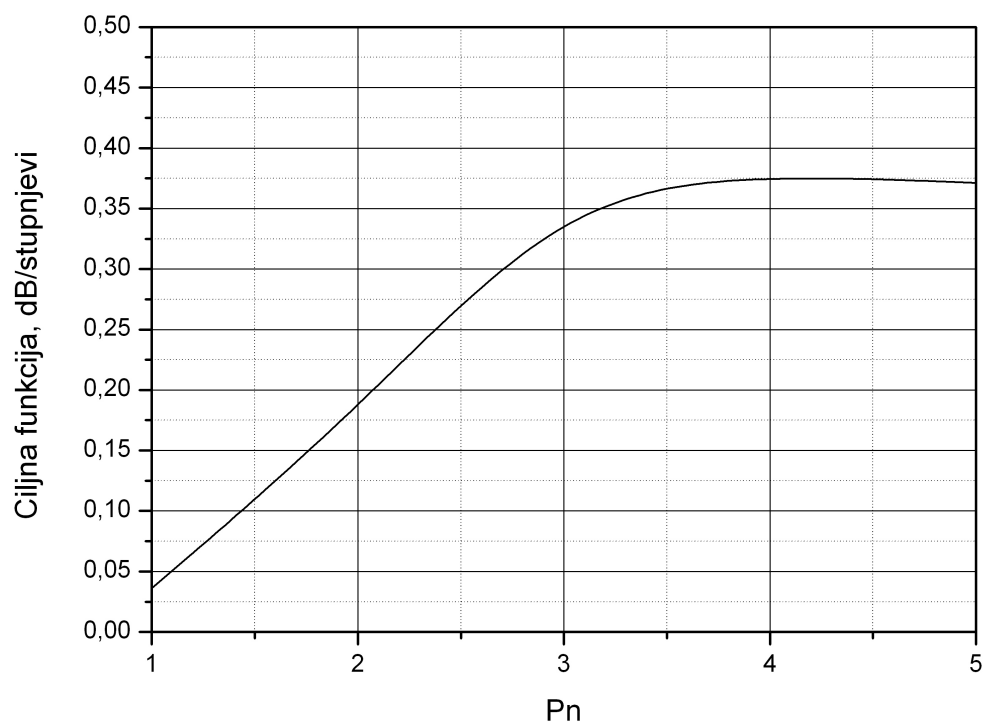
Selekcijski kut konusa je elevacijski kut kojim su selektirani antenski elementi koji su aktivni (pobuđeni) i koji tako formira aktivni konus niza. Tako su pobuđeni svi antenski elementi čiji je elevacijski kut manji ili jednak ovom selekcijskom kutu konusa.

Izračuni za sve slučajeve izvedeni su dvije ortogonalne ravnine (E i H ravnina), korištenjem prve ciljne funkcije, odnosno ciljne funkcije označene indeksom jedan.

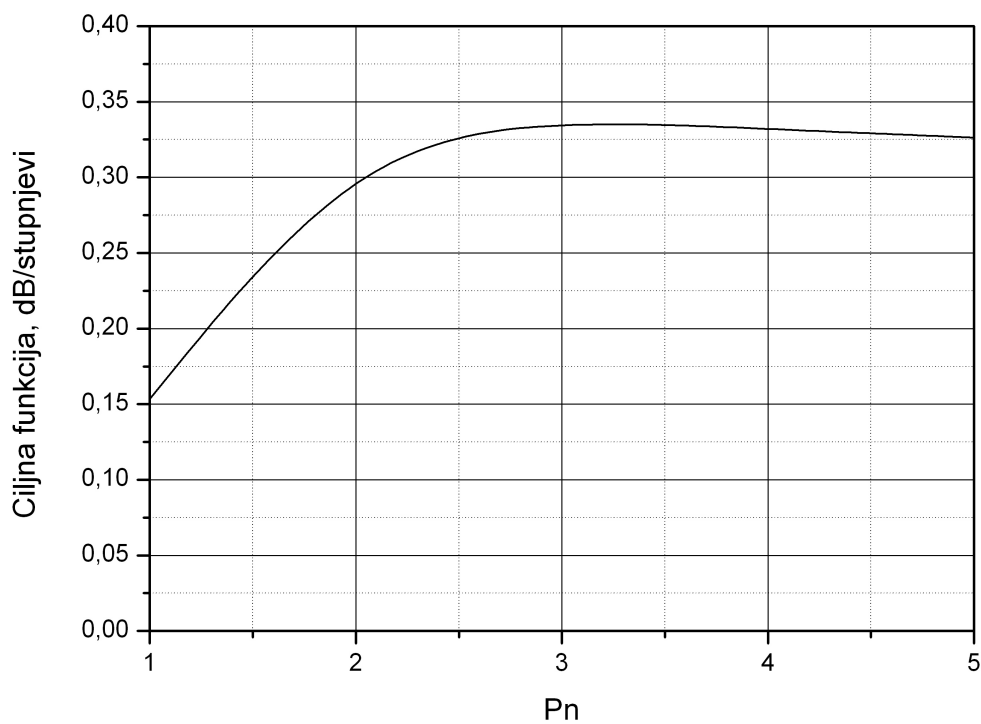
5.1.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

U poglavlju 4.4.2. koje govori o ikosaedarskoj konfiguraciji antenskih elemenata na sfernoj podlozi, objašnjena je podjela osnovne stranice ikosaedra u više jednakostraničnih trokuta u čije su vrhove, s ciljem povećanja gustoće osnovne konfiguracije, smješteni antenski elementi. Pri tome, ako se osnovni trokut ne dijeli, tada jedna stranica zadržava jedan trokut i slijedi da je $P_n=1$, te se na taj način na hemisferi može rasprediti 6 antenskih elemenata. $P_n=2$ podrazumijeva podjelu jedne stranice na dva dijela (tri jednakostranična trokuta) i broj antenskih elemenata je 26. Tako $P_n=3$ podrazumijeva 46, za $P_n=4$ je to 91 i na kraju $P_n=5$ podrazumijeva 126 elemenata na hemisferi.

Slike 5.3. i 5.4. prikazuju ovisnost ciljne funkcije o promjeni P_n , a izračun potvrđuje očekivanja. Povećanjem gustoće elemenata na sferi, ciljna funkcija raste za oba slučaja radijusa sfere. Ipak, taj porast nije konstantan, te nakon $P_n=4$ za E ravninu radijusa od 30 cm i H ravninu radijusa sfere od 52,9 cm opada, dok je maksimum za H ravninu radijusa sfere od 30 cm jednak $P_n=3$, a za E ravninu radijusa sfere od 52,9 cm krivulja ciljne funkcije nema izraženog maksimuma.

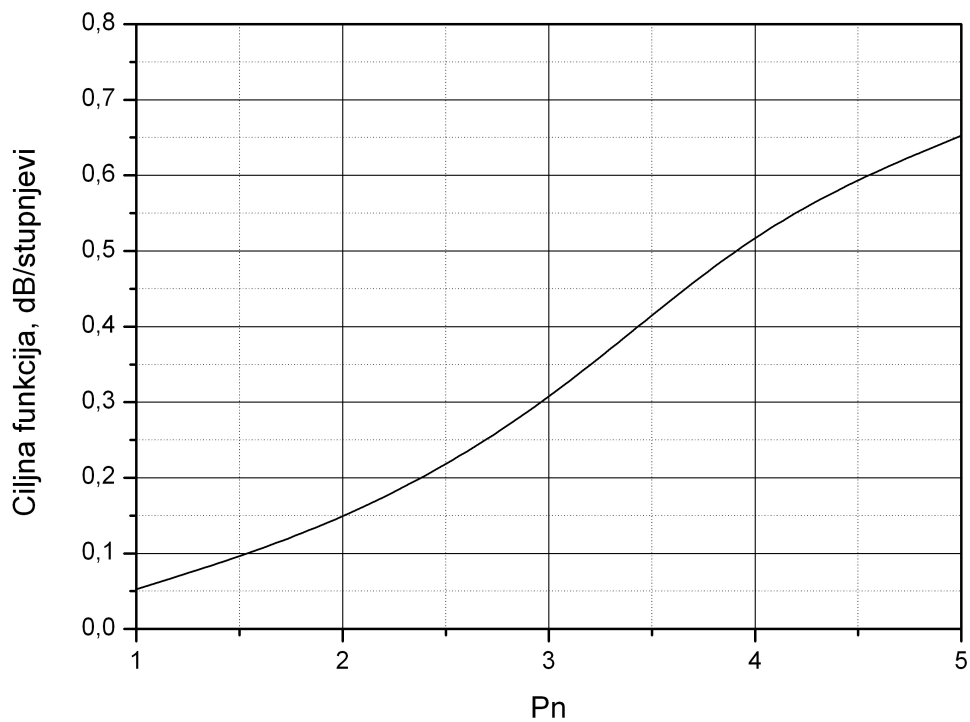


a)

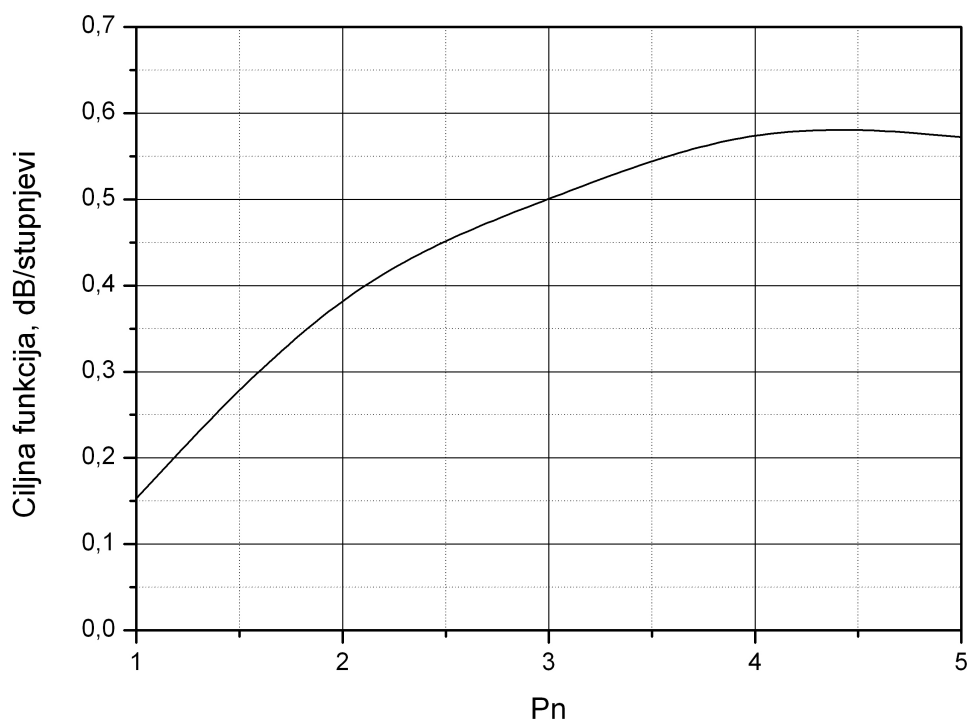


b)

Slika 5.3. Ovisnost vrijednosti ciljne funkcije CF_1 o promjeni broja elementarnih antena – broja podjela elementarnog trokuta P_n za: a) E – ravninu, b) H – ravninu uz $r_s = 30$ cm.



a)



b)

Slika 5.4. Ovisnost vrijednosti ciljne funkcije CF_1 o promjeni broja elementarnih antena – broja podjela elementarnog trokuta P_n za: a) E – ravninu, b) H – ravninu uz $r_s = 52,9$ cm.

U E ravnini pri $r_s = 30$ cm, ciljna funkcija postiže svoju maksimalnu vrijednost od 0,378 dB/stupnju za $P_n=4$, a u H ravnini 0,338 dB/stupnju za $P_n=3$. Ipak ova vrijednost u H ravnini je vrlo bliska maksimumu za $P_n = 4$ u iznosu od 0,336 dB/stupnju. Ako se radijus sfere promijeni na 52,9 cm, ciljna funkcija će postići maksimalnu vrijednost za $P_n=5$ 0,652, a u H ravnini za $P_n=4$ 0,592 dB/stupnju.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da ciljna funkcija raste s porastom P_n , tj. s porastom broja elemenata na sferi. No, nakon određenog broja i gustoće, ciljna funkcija će postupno opadati. Vrijednost P_n za koju bi se moglo zaključiti da u većini slučajeva koji su razmatrani daje maksimalnu vrijednost ciljne funkcije jest vrijednost $P_n=4$. Nadalje, prema raspoloživoj literaturi ([6], [7], [24], [2] i drugi) sve analize i izračuni rađeni su s tim brojem podjela osnovnog trokuta ikosaedarske konfiguracije. Ovo istraživanje pokazuje ispravnost odabira upravo te vrijednosti P_n kao optimalne za sve radijuse, a u daljnjim analizama i optimizacijama, vrijednost $P_n=4$ će pri ikosaedarskoj konfiguraciji definirati broj antena na sfernoj podlozi. Za druge konfiguracije rasporeda antena po sferi je broj antena definiran sa $P_n=4$ (91 antena na polusferi) orijentacijski broj antenskih elemenata.

5.1.2. Utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

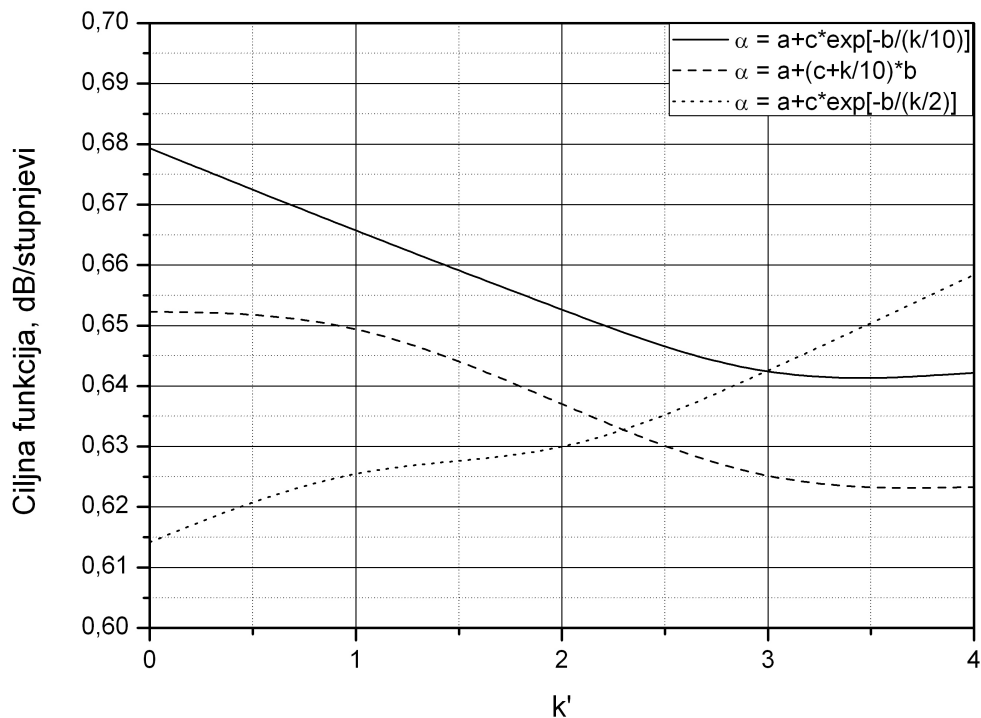
Pod pojmom rasporeda antenskih elemenata na sferi misli se na njihov međusobni položaj i ova je promjena povezana s gustoćom, pri čemu se broj elementarnih antena ne mijenja. Promjena rasporeda elemenata na sferi u ovom dijelu istraživanja ide za tim da se elementi rasporede na sfernoj podlozi neuniformno, uz zadržavanje ikosaedarske strukture za optimalan broj podjela osnovnog trokuta ikosaedra $P_n=4$, a gustoća antenskih elemenata mijenja se po elevacijskom kutu. Ta je promjena gustoće definirana s tri funkcije: eksponencijalnom (konveksnom), linearnom i obrnuto eksponencijalnom (konkavnom), koje uvjetuju povećanu gustoću za elevacijske kuteve bliže elevacijskom kutu maksimalnog zračenja (smjera maksimuma zračenja), a smanjenu gustoću za elevacijske kuteve dalje od elevacijskog kuta maksimalnog zračenja.

Ovo ispitivanje odvijalo se unutar granica minimalnog razmaka između elemenata u rasponu od $0,4\lambda$ do $0,5\lambda$, a s ciljem ograničenja sprege. Uz taj nužni uvjet, ispoštovan je i minimalno dozvoljeni razmak elemenata od $2 \cdot r_p$ (pri čemu je r_p radijus elementarne antene)

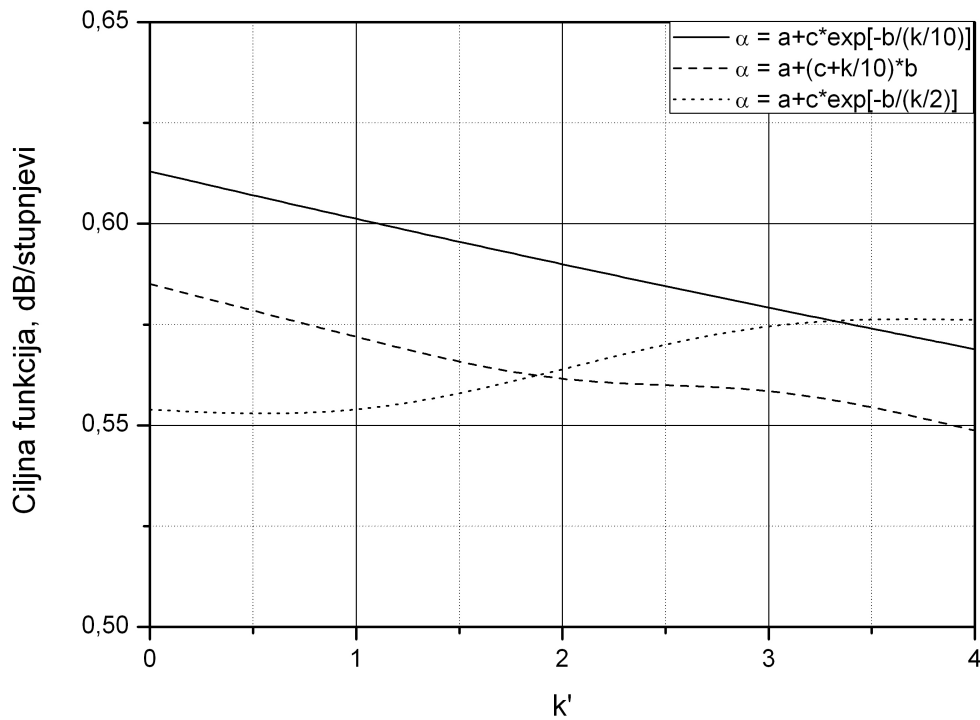
koji osigurava nepreklapanje dva antenska elementa. Seleksijski kut α od 65° osigurava obuhvaćanje svih elemenata čiji je položaj funkcijski ovisan.

Istraživanje je pokazalo da ako se uzme najmanji razmak između dva elementa $2 \cdot r_p$, vrijednost ciljne funkcije bitno se ne mijenja. Promjena je uočljiva za udaljenost $0,5\lambda$, s tim da su se parametri mijenjali u svom opsegu - izvan tih granica ne bi se ispoštovao gore naveden uvjet za udaljenost. Još je jedan zahtjev morao biti uzet u obzir, a to je radijus sfere od 52,9 cm. Povećanjem sfere, dakle, moglo se lakše 'pomicati' elemente na njenoj površini, a da se ne naruši minimalna udaljenost i da svi elevacijski prstenovi s elementima budu obuhvaćeni.

Sljedeći dijagrami prikazani na slici 5.5. prikazuju rezultate istraživanja.



a)



b)

Slika 5.5. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm, te $d_{\min}=0,5\lambda$.

Funkcijske ovisnosti elevacijskih pozicija prstenova antenskih elemenata predstavljene su sljedećim izrazima:

a) eksponencijalna promjena položaja elevacijskog kuta prstena na kome se nalaze antenski elementi:

$$\alpha = a + c \cdot \exp\left(\frac{-b}{k/10}\right), \quad (5-5)$$

gdje je:

$$a = -1171,17046,$$

$$c = 1229,16784,$$

$$b \in [0:6],$$

$$k - \text{koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, } k \in [122:126],$$

b) linearna promjena položaja elevacijskog kuta prstena na kome se nalaze antenski elementi:

$$\alpha = a + (c + k/10) \cdot b \quad (5-6)$$

gdje je:

$$a = 60,$$

$$c = 10,$$

$$b \in [0:6],$$

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [0:4]$,

c) obrnuto eksponencijalna promjena položaja elevacijskog kuta prstena na kome se nalaze antenski elementi:

$$\alpha = a + c \cdot \exp\left(\frac{-b}{k}\right) \quad (5-7)$$

gdje je:

$$a = 974,45287,$$

$$c = -914,44424,$$

$$b \in [0:6],$$

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [(-98):(-94)]$.

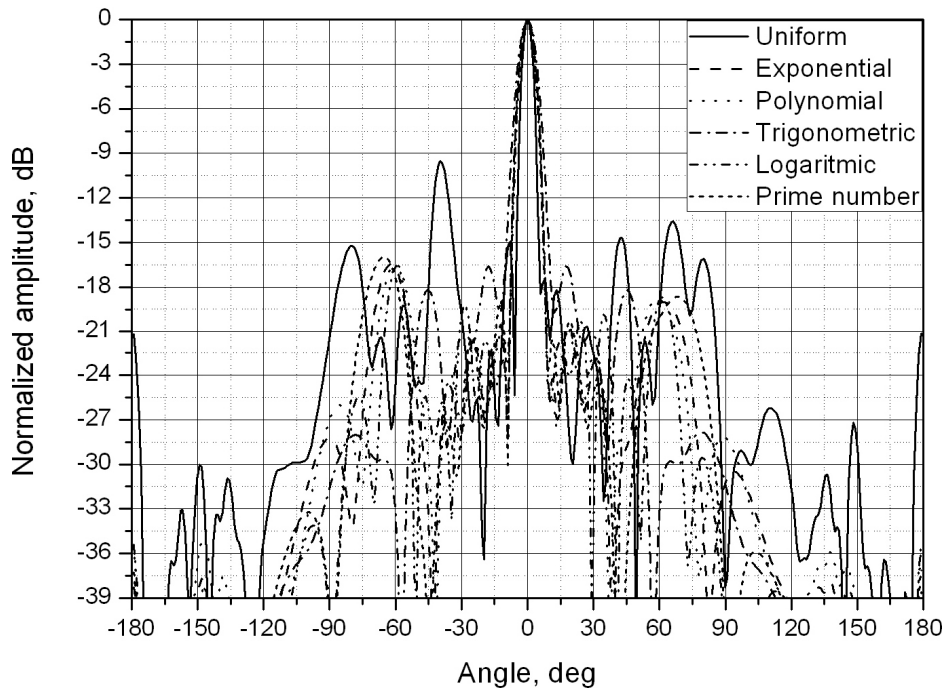
Ako se usporede jednačbe po kojima se mijenja položaj antena i odgovarajući dijagrami, može se uočiti razlika između koeficijenata k . Na x-osi dijagrama nalaze se prilagođeni koeficijenti k' kako bi grafovi bili usporedivi. Za sva tri slučaja prilagođeni koeficijent k' predstavlja razliku između trenutne k_{tren} i minimalne k_{min} vrijednosti stvarnog koeficijenta danog gornjim izrazima:

$$k' = k_{\text{tren}} - k_{\text{min}}. \quad (5-8)$$

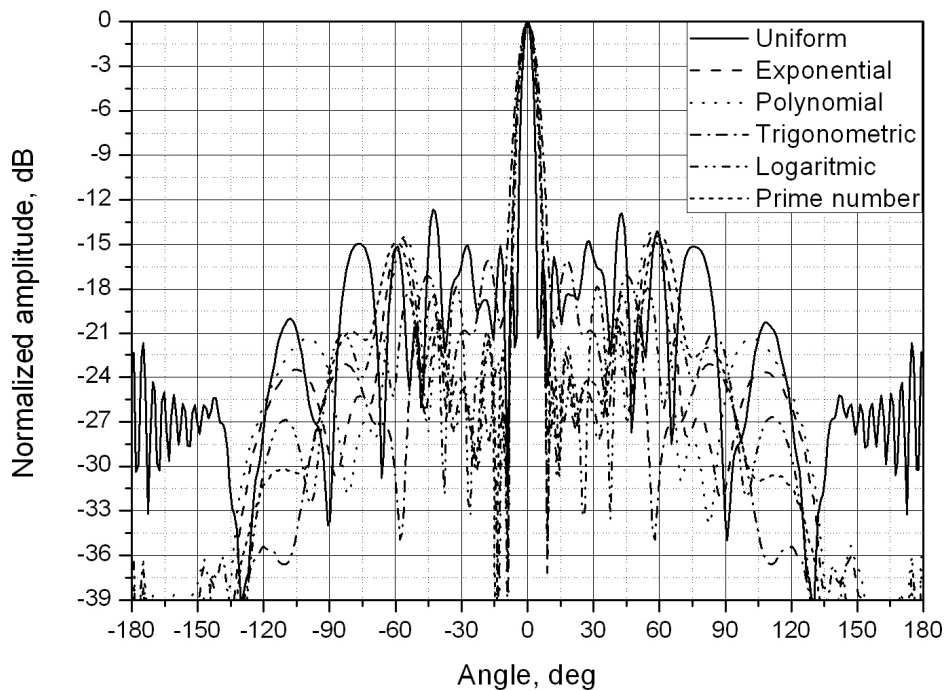
Na taj je način krivulje moguće usporediti. Sve tri funkcije različito djeluju na pomak prstenova. Granice koeficijenata definirane su očuvanjem strogog uvjeta minimalnog razmaka između dva elementa. U E ravnini, ciljna funkcija postiže svoju maksimalnu vrijednost za eksponencijalnu promjenu položaja prstena 0,679, te u H ravnini, za istu funkciju promjene 0,613 dB/stupnju. Međutim, niti jedna funkcija ne pokazuje očekivano izraženi ekstrem (maksimum). Ipak, u članku [56] u kojem je detaljno obrađen problem utjecaja promjene gustoće elevacijske pozicije antenskih elemenata ikosaedarske konstelacije za različite funkcije promjene gustoće, može se iščitati da je eksponencijalna konfiguracija ona koja ima najveću vrijednost ciljne funkcije. Prema podacima iz dijagrama na Slici 5.6. odredi li se vrijednost ciljne funkcije za dvije osnovne konfiguracije dobije se:

a) za eksponencijalnu funkcijsku ovisnost elevacijske pozicije, prva ciljna funkcija u E ravnini ima vrijednost od 0,710 dB/ stupnju, a u H ravnini 0,620 dB/ stupnju (ukupna ili druga ciljna funkcija 0,670 dB/ stupnju);

b) za uniformni raspored elevacijske pozicije, ciljna funkcija u E ravnini ima vrijednost od 0,500 dB/ stupnju, a u H ravnini 0,710 dB/ stupnju (ukupna ili druga ciljna funkcija 0,610 dB/ stupnju).



a)



b)

Slika 5.6. Dijagram zračenja uniformno raspoređenih antena u odnosu na neuniformni raspored 71 antene na sfernoj podlozi za: a) E-ravninu b) H-ravninu [56].

Ovaj segment istraživanja utjecaja promjene gustoće rasporeda elemenata uz zadržavanje ikosaedarske strukture rasporeda nije dao očekivane rezultate. Iz prethodnih istraživanja (prezentiranih u literaturi [56], a prikazanih na Slici 5.6.) može se zaključiti da promjene koje osiguravaju povećanje gustoće antenskih elemenata bliže smjeru maksimalnog zračenja, te njeno smanjenje s udaljavanjem od smjera maksimalnog zračenja mogu značajno promijeniti dijagram zračenja. Ta promjena uzrokuje povećanje vrijednosti ciljne funkcije CF_1 po svakoj od ortogonalnih ravnina, kao i ukupnu ciljnu funkciju prostornog dijagrama zračenja CF_2 .

5.1.3. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Funkcijske ovisnosti amplitude antenskih elemenata dane su sljedećim izrazima:

$$AMP = \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0,001) \rightarrow \text{eksponencijalna promjena amplitude}; \quad (5-9)$$

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0,001 \rightarrow \text{linearna promjena amplitude}; \quad (5-10)$$

$$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0,007) \rightarrow \text{obrnuto eksponencijalna promjena amplitude}, \quad (5-11)$$

gdje je:

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu 0:30,

α - elevacijski kut prstena na kojemu su smješteni antenski elementi. Za ikosaedarsku konfiguraciju uz $P_n=4$, elevacijski kut α može poprimiti vrijednosti 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° i 90° .

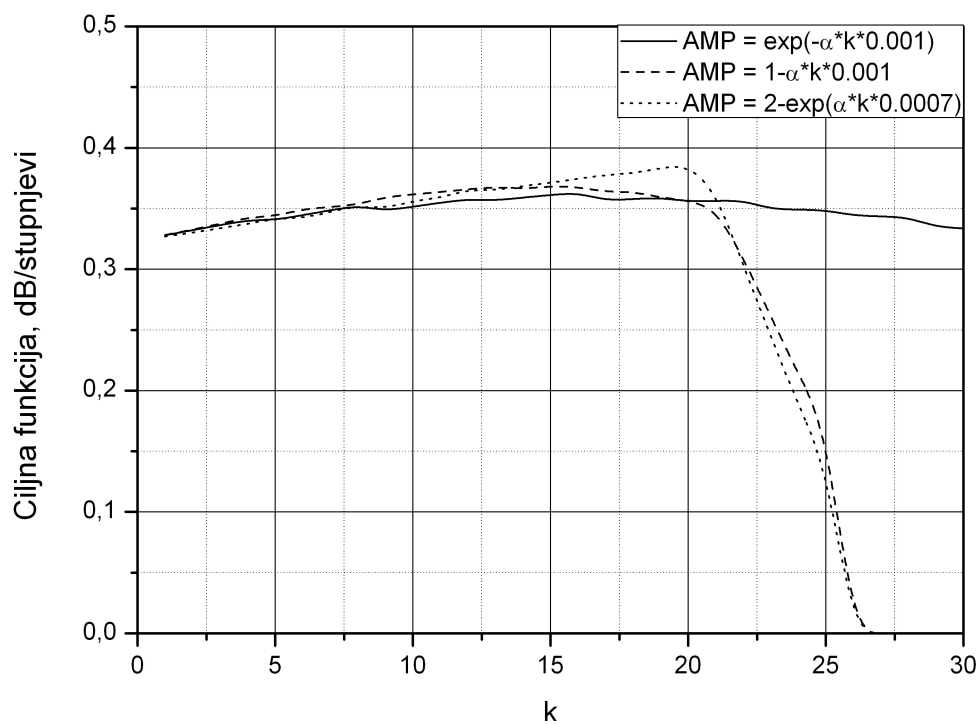
Za sve tri funkcijske ovisnosti vidljivo je da je u pitanju monotono opadajuća funkcija promjene amplitude. Važno je postaviti maksimalnu vrijednost amplitude za antenski element koji se nalazi u smjeru (ili najbliže smjeru) maksimalnog zračenja. Udaljavanjem od smjera maksimuma zračenja, amplituda opada.

Na slikama 5.7. i 5.8. prikazani su rezultati izračuna ciljne funkcije za dva radijusa sferne podloge u dvije ortogonalne ravnine.

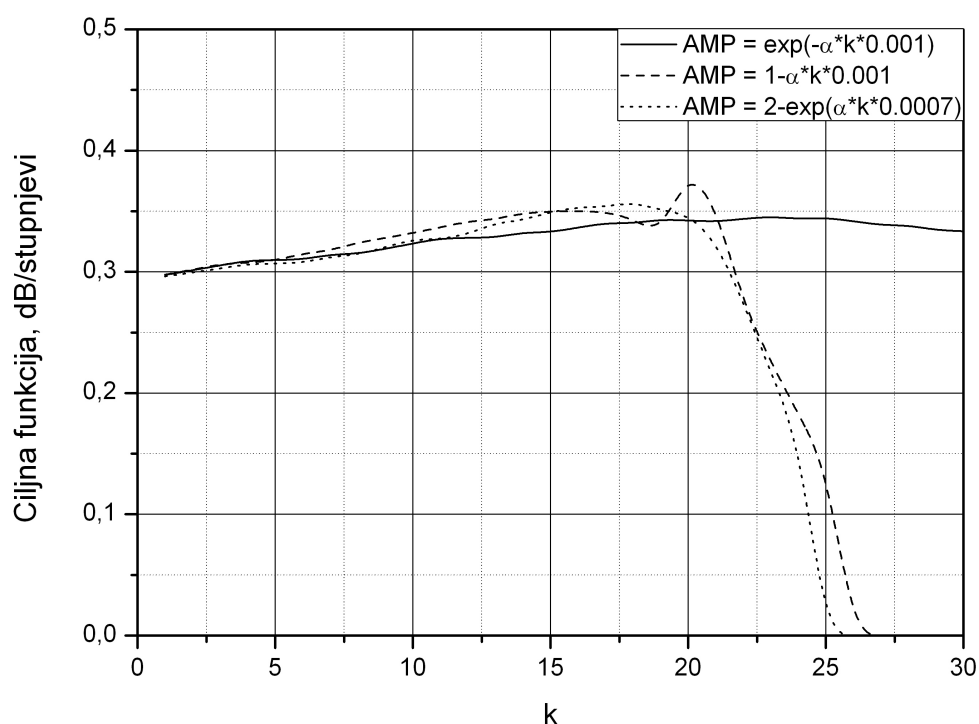
Amplituda pobude se ne mijenja za svaki od antenskih elemenata, već je promjena vezana uz elevacijski kut prstena α na kojem se nalaze antenski elementi, tako da svi antenski elementi na istom elevacijskom kutu imaju identičnu amplitudu pobude.

Za sferu radijusa 30 cm, maksimalna vrijednost ciljne funkcije u E ravnini postiže se pri obrnuto eksponencijalnoj promjeni amplitude i iznosi 0,386 dB/stupnju za vrijednost koeficijenta 20. U H ravnini postiže se pri linearnoj promjeni amplitude i iznosi 0,352

dB/stupnju za vrijednost koeficijenta 20. U ovoj ravni za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude vrijednost ciljne iznosi 0,341 dB/stupnju za vrijednost koeficijenta 17.



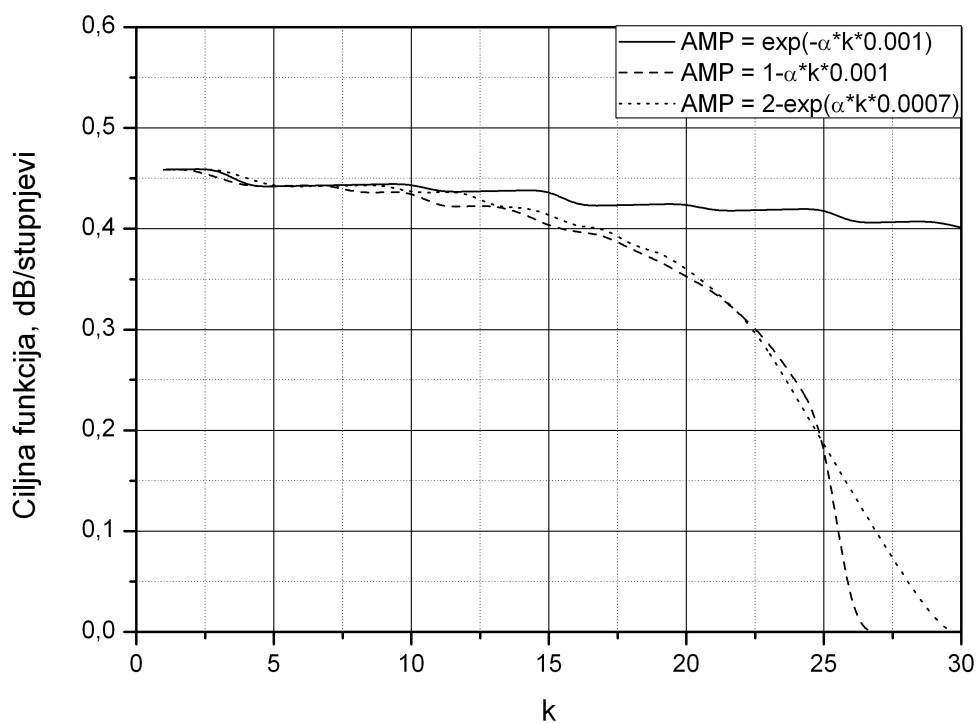
a)



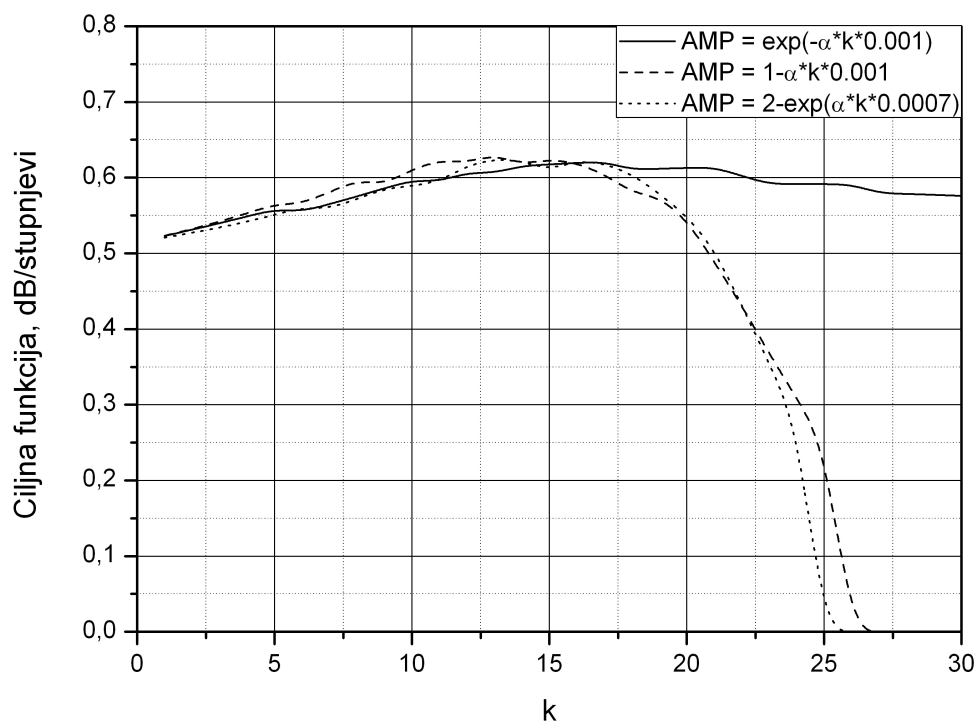
b)

Slika 5.7. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude pobude:

a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm.



a)



b)

Slika 5.8. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude pobude:

a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm.

Za sferu radijusa 52,9 cm u E ravnini ciljna funkcija postiže najveću vrijednost pri eksponencijalnoj promjeni pobudne amplitude niza i iznosi 0,459 dB/stupnju. U H ravnini maksimalna vrijednost ciljne funkcije iznosi 0,623 dB/stupnju za linearnu promjenu amplitude.

Ako se amplituda pobude mijenja po monotono opadajućoj funkciji, vidljiva je tendencija porasta vrijednosti ciljne funkcije, što implicira poboljšanje oblika dijagrama zračenja u odnosu na dijagram zračenja sa uniformnim amplitudama pobude. To poboljšanje se odnosi na zahtjeve postavljene na dijagram zračenja definiranjem ciljnih funkcija prema relacijama (5-1) i (5-2), odnosno na zahtjeve postavljene namjenom antenskog niza, a to je skeniranje prostora.

5.1.4. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Funkcijske ovisnosti polarizacije antenskih elemenata dane su slijedećim izrazima:

$$\phi = a + \exp(k \cdot |b - c| \cdot 0,001) \rightarrow \text{eksponencijalna promjena polarizacije}; \quad (5-12)$$

$$\phi = a + k \cdot |b - c| \cdot 0,001 \rightarrow \text{linearna promjena amplitude}; \quad (5-13)$$

$$\phi = a - \exp(k \cdot |b - c| \cdot 0,001) \rightarrow \text{obrnuto eksponencijalna promjena amplitude}, \quad (5-14)$$

gdje je:

k - koeficijent po kojemu se mijenja polarizacija, $k \in [1;51]$,

a - azimutalni (ϕ) kut u lokalnom koordinatnom sustavu,

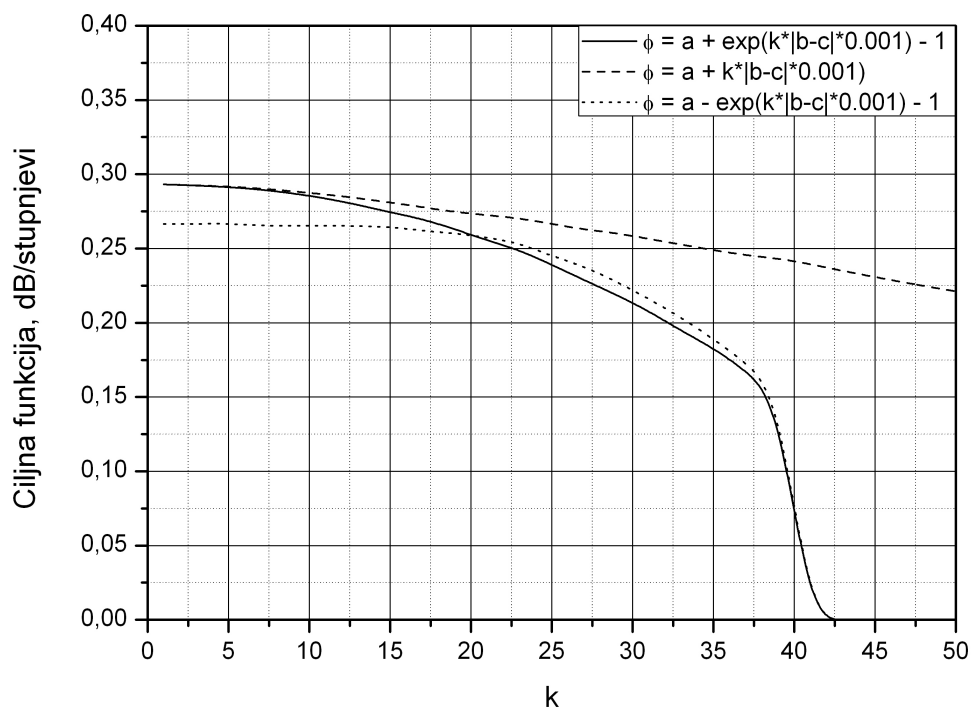
b - brojač po prstenovima elemenata, $b \in [0;c]$,

c - ukupni broj prstenova + centralni element, $c \in [1;7]$.

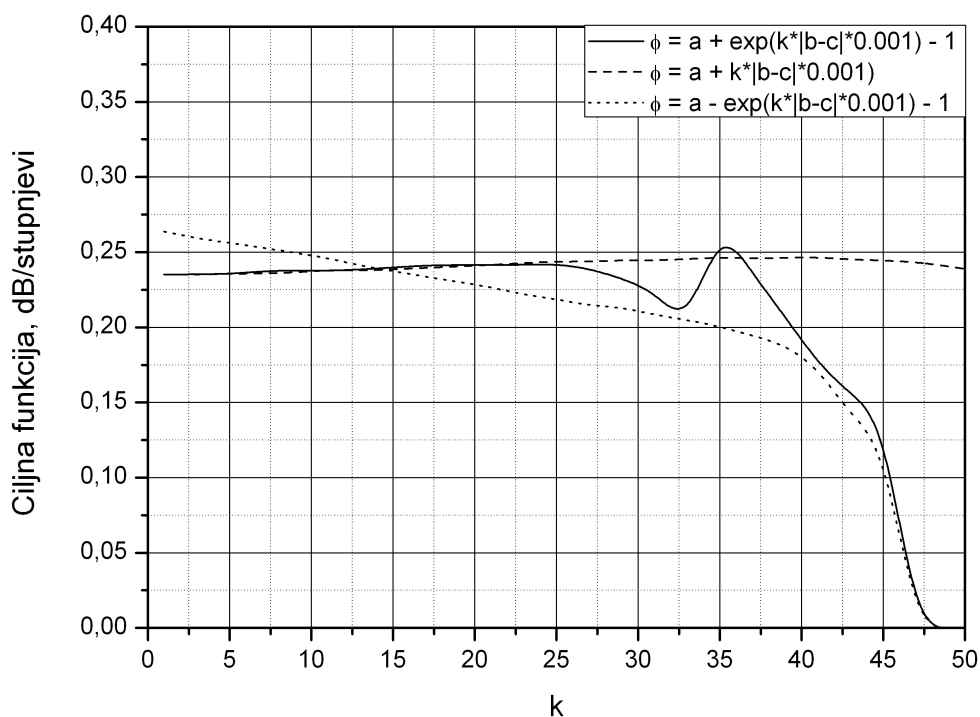
Pitanje polarizacije dosta je kompleksna stvar i iz tog razloga ispitivana je samo promjena pobude kad se polarizacija mijenja na isti način kao i amplituda, dakle po elevacijskom kutu prstena na kojem se nalaze mikrostrip antene. Promjena se odvija po monotono opadajućoj funkciji.

Slike 5.9. i 5.10. prikazuju utjecaj promjene polarizacije na ciljnu funkciju CF_1 . Za radijus sfere 30 cm u E ravnini, ciljna funkcija postiže najbolju vrijednost pri eksponencijalnoj promjeni polarizacije pobude od 0,293 dB/stupanj, a za H ravninu 0,264 dB/stupanj. Za $r_s = 52,9$ cm, u E ravnini ciljna funkcija postiže 0,439 dB/stupanj (ob. eksp.

pr.), dok u H ravnini vrijednost ciljne funkcije jest 0,434 dB/stupanj pri lin. promjeni polarizacije.



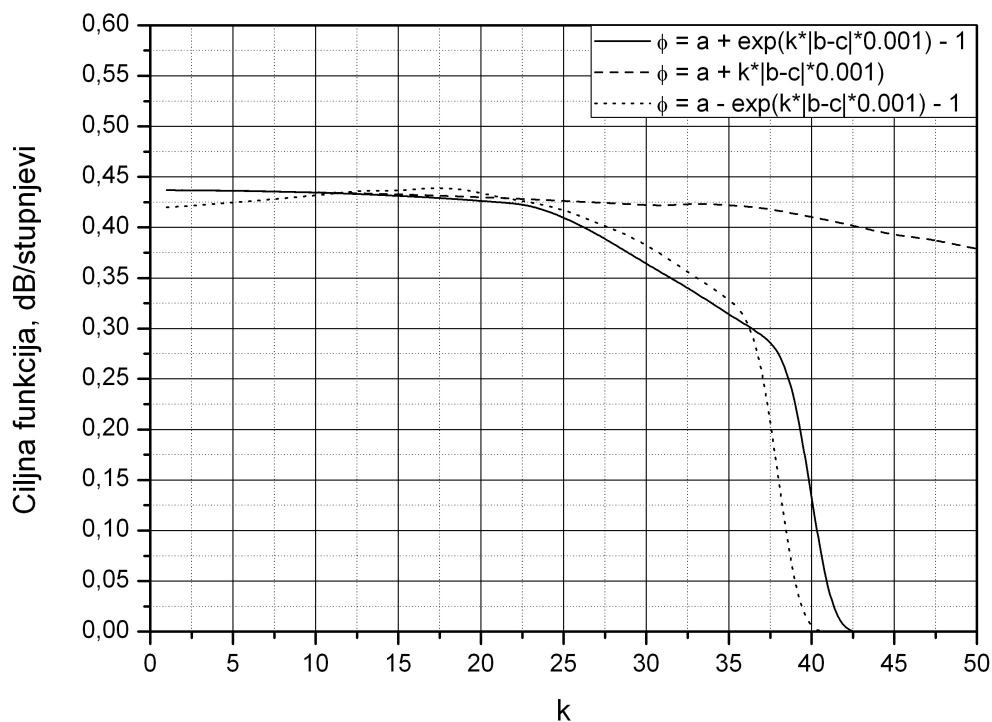
a)



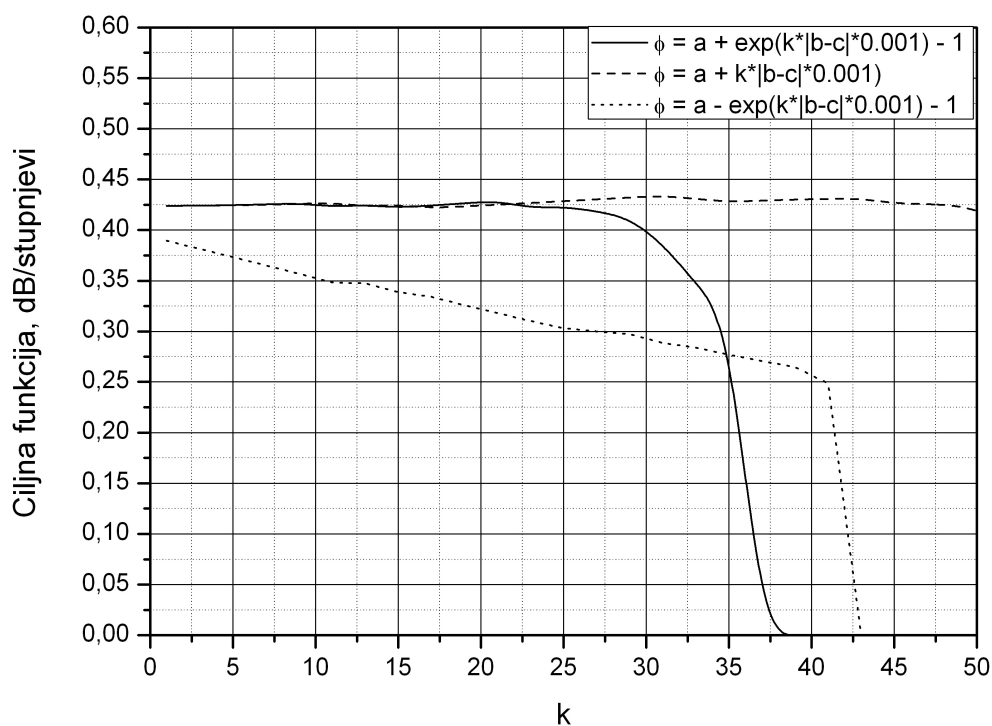
b)

Slika 5.9. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije pobude:

a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm.



a)



b)

Slika 5.10. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije pobude:

a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm.

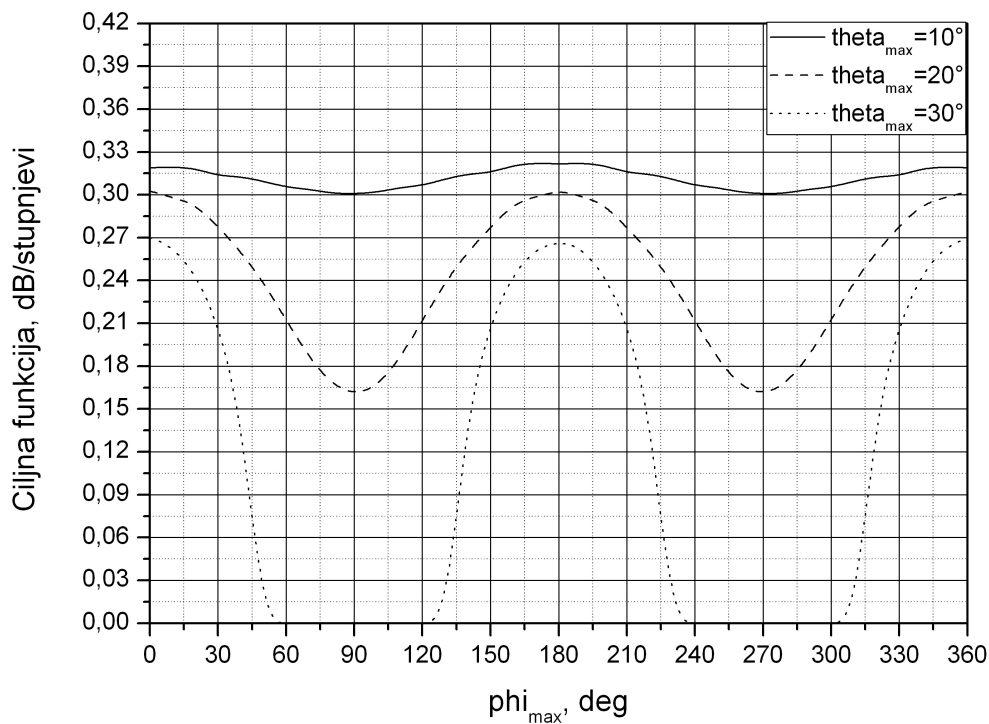
Dijagrami ovisnosti polarizacije elemenata zračenja pokazuju minimalni porast vrijednosti ciljne funkcije za eksponencijalne i obrnuto eksponencijalne promjene polarizacije po elevacijskim pretenovima, na dijelu krivulja prikazanih na slikama 5.9. b), te 5.10. a) i b). To znači da polarizacijsko oblikovanje dijagrama zračenja na način promjene polarizacije po elevacijskom kutu može neznatno povećati vrijednosti ciljne funkcije, a time i poboljšati oblik dijagrama zračenja. Potrebno bi bilo istražiti polarizacijske dijagrame cijelog niza kao i druge varijante promjene polarizacije antenskih elemenata koje bi, možda, dale bolje rezultate od prethodno prezentiranih.

5.1.5. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

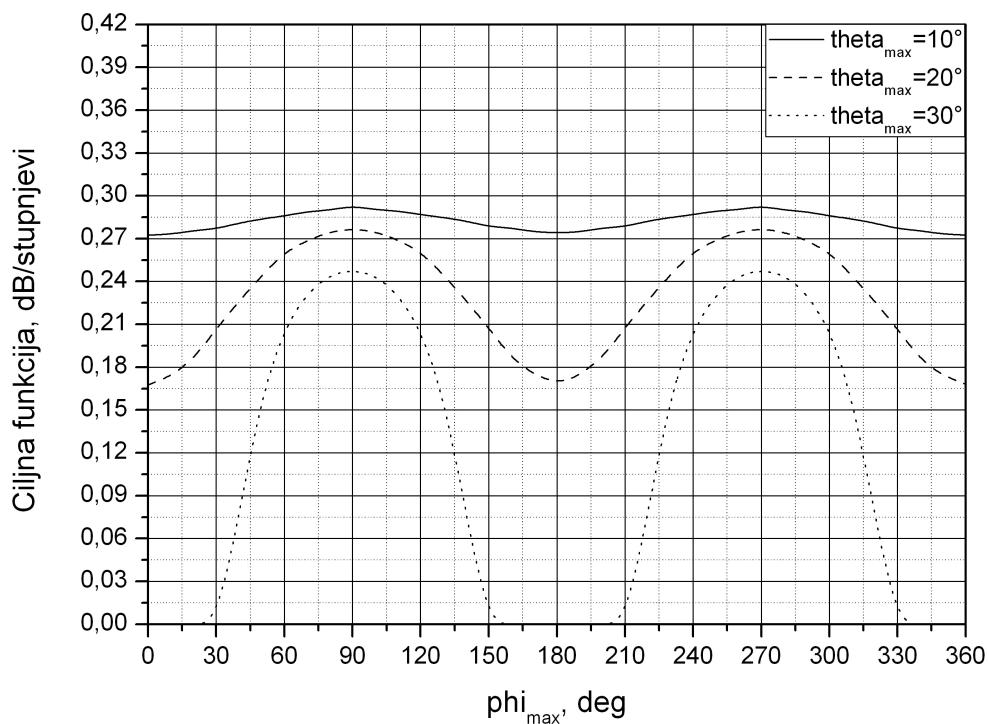
Kutevi maksimalnog zračenja (θ_{\max} , ϕ_{\max}) predstavljaju elevacijski i azimutalni smjer maksimalnog zračenja antenskog niza, odnosno željeni smjer maksimalnog zračenja ili smjer maksimuma glavne latice dijagrama zračenja (*eng.* main beam).

Smjer maksimuma zračenja, u direktnoj metodi pretraživanja prostora vrijednosti, mijenja se na način diskretne promjene azimutalnog kuta (ϕ_{\max}) s konstantnim koracima u opsegu od 0° do 360° uz konstantnu vrijednost elevacijskog kuta (θ_{\max}). Drugi dio istraživanja obuhvaća obrnuti slučaj, odnosno, diskretnu promjenu elevacijskog kuta (θ_{\max}) u opsegu od 0° do 180° uz konstantnu vrijednost azimutalnog kuta (ϕ_{\max}).

Na slikama 5.11., 5.12., 5.13. i 5.14. prikazani su dijagrami ovisnosti ciljne funkcije o kutu maksimalnog zračenja.

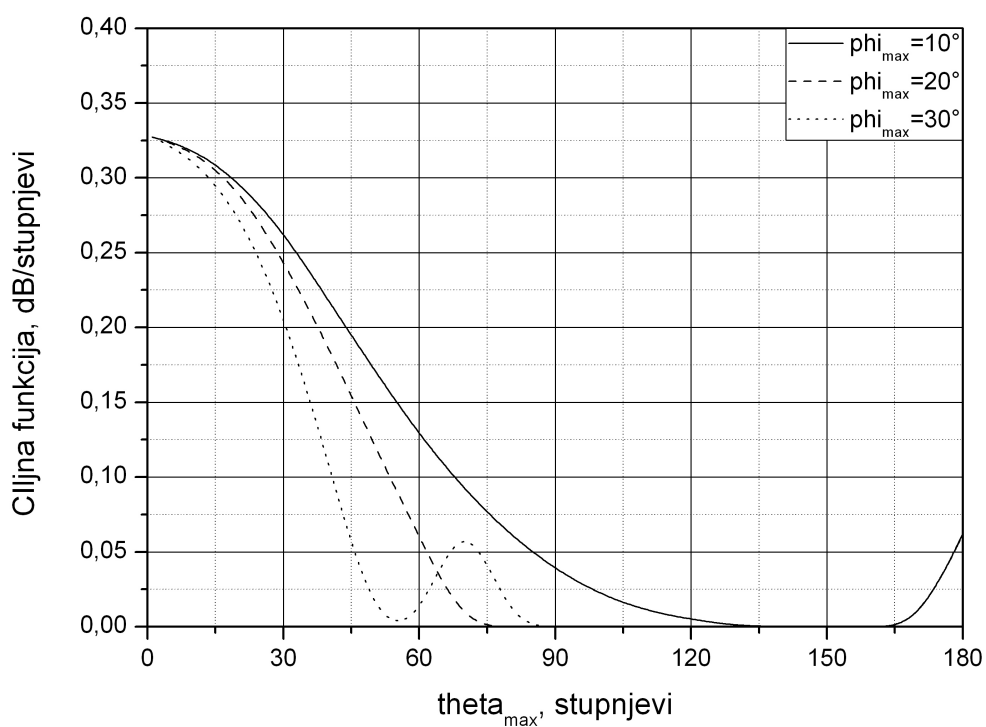


a)

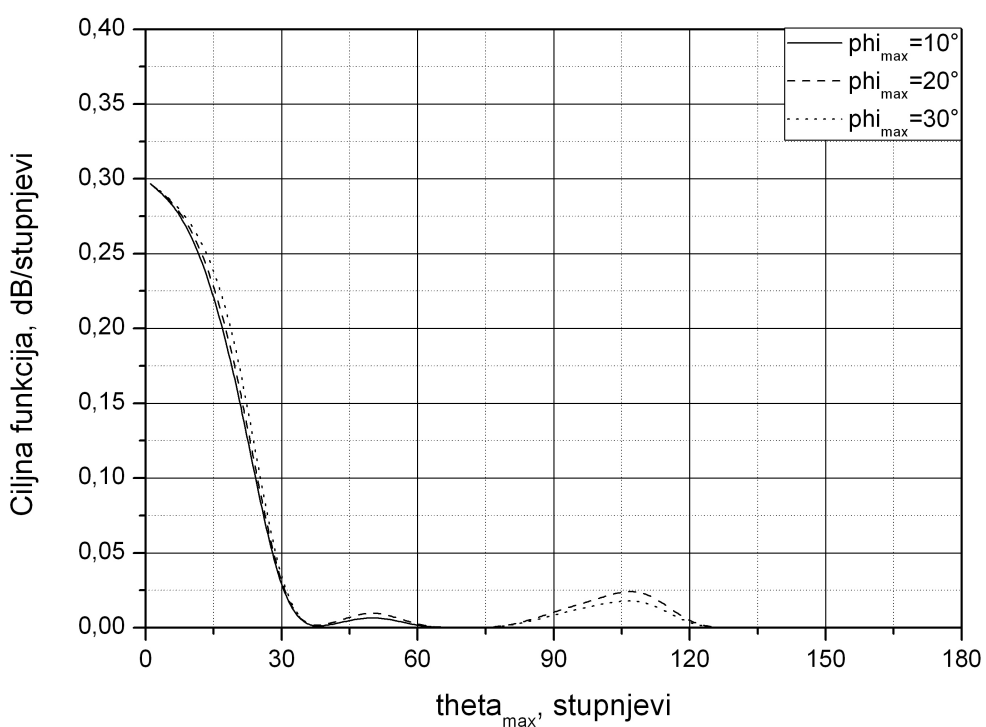


b)

Slika 5.11. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (ϕ_{max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm.

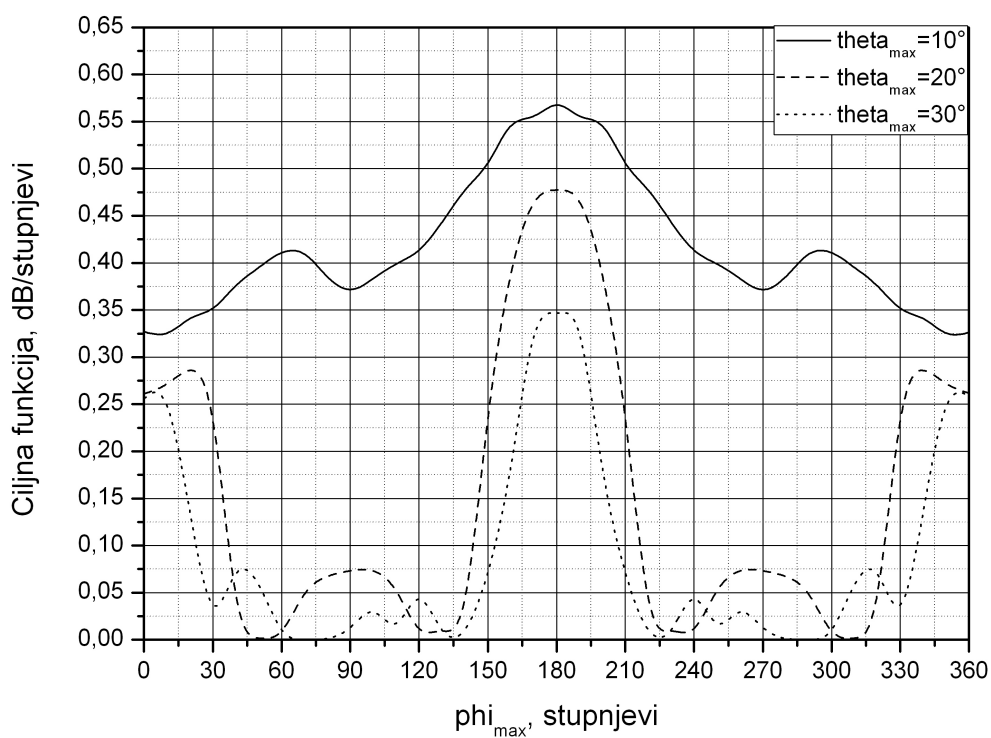


a)

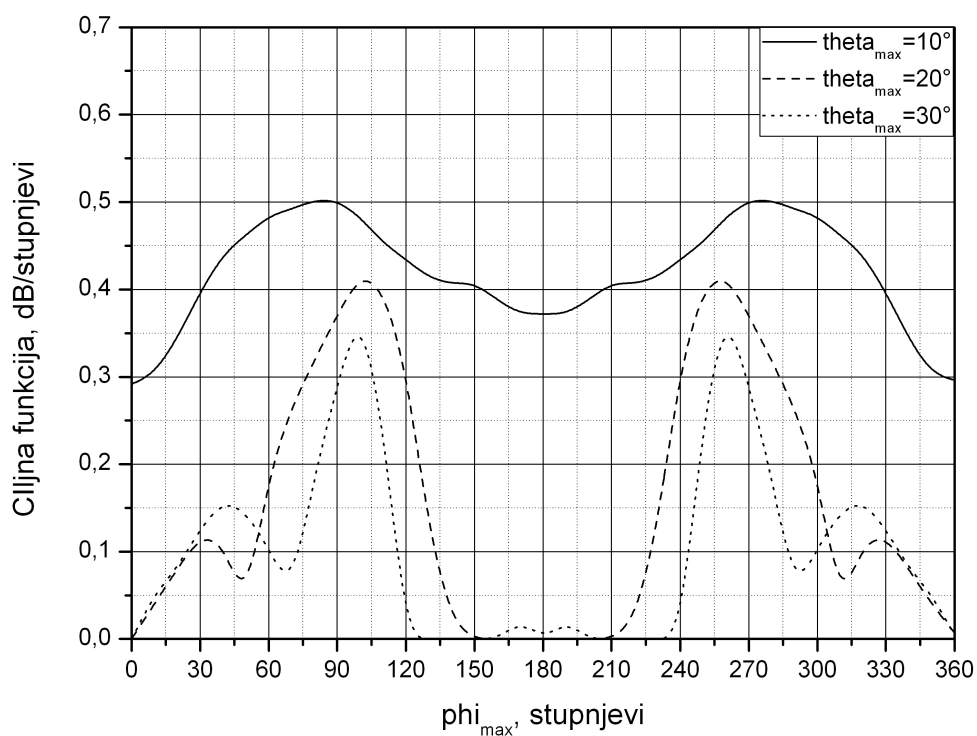


b)

Slika 5.12. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (θ_{max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm.

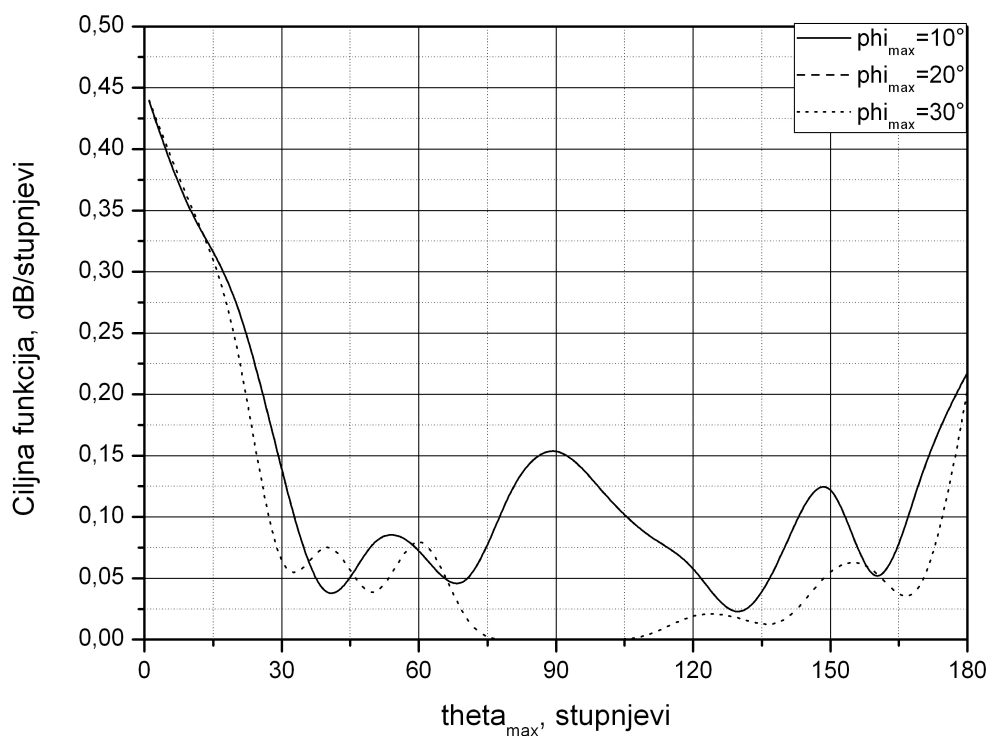


a)

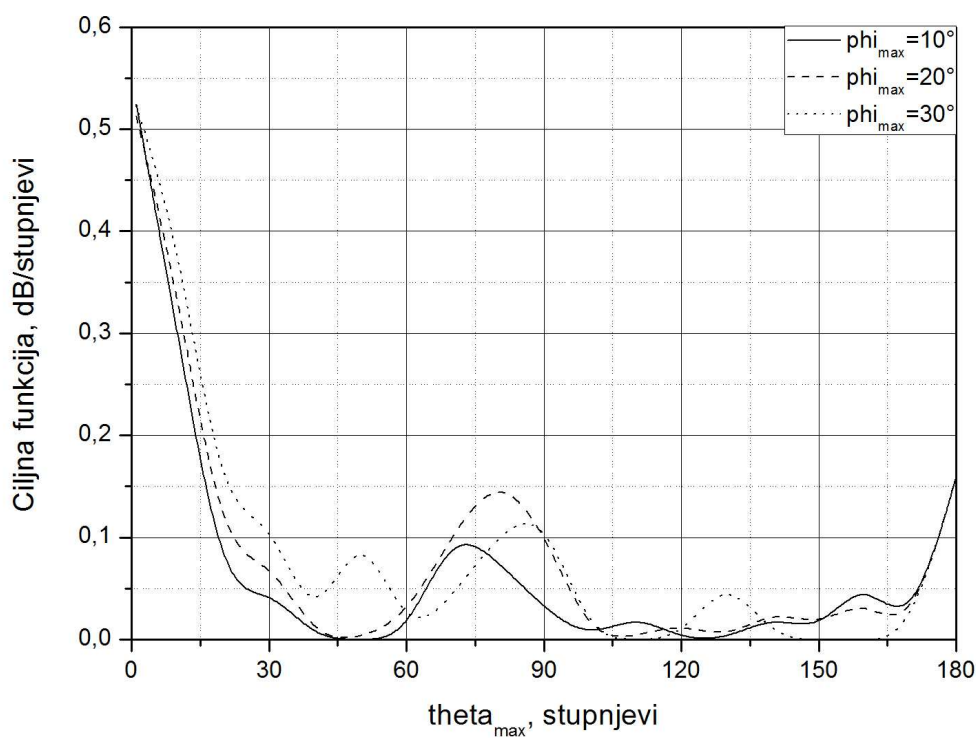


b)

Slika 5.13. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (ϕ_{max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm.



a)



b)

Slika 5.14. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (θ_{max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm.

Istraživanja su provedena za sfere radijusa 30 cm i 52,9 cm. U oba se slučaja dolazi do sličnih zaključaka. Pri radijusu sfere 30cm, za slučaj kad se mijenja azimutalni kut maksimuma zračenja ϕ_{\max} (Slika 5.10.), a θ_{\max} je konstantan, ciljna funkcija postiže svoj maksimum pri $\theta_{\max}=10^\circ$, na $\phi_{\max}=0^\circ$ i $\phi_{\max}=180^\circ$. Vrijednosti ciljne funkcije su 0,319 i 0,322 dB/stupnju (E - ravnina), dok je za istu situaciju i H – ravninu vrijednost ciljne funkcije 0,293 i 0,274 dB/stupnju na $\phi_{\max}=90^\circ$ i $\phi_{\max}=270^\circ$ što je i logičan zaključak kad se uzme u obzir da E – ravnina obuhvaća kuteve 0° i 180° , H – ravnina 90° i 270° .

Za situaciju kada se mijenja elevacijski kut (θ_{\max}) unutar opsega $0:180^\circ$ uz radijus sfere od 30cm, rezultati simulacije pokazuju da je maksimalna vrijednost ciljne funkcije 0,327 pri $\theta_{\max}=0^\circ$ u sva tri slučaja $\phi_{\max}=10^\circ$, $\phi_{\max}=20^\circ$ i $\phi_{\max}=30^\circ$ (E - ravnina). Za H – ravninu, ciljna funkcija poprima vrijednost 0,297 dB/stupnju na $\phi_{\max}=10^\circ$.

Za sferu radijusa 52,9 cm i očitane su sljedeće vrijednosti:

- ϕ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,568 dB/stupnju ($\phi_{\max}=180^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- ϕ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,502 dB/stupnju ($\phi_{\max}=90^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,562 dB/stupnju ($\phi_{\max}=270^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,440 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=30^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,524 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=30^\circ$).

Ciljna funkcija postiže svoj maksimum pri onim kutevima za koju se ravninu i radi simulacija dijagrama zračenja. Kako se maksimum zračenja promjenom parametara udaljava od akutalne ravnine, ciljna funkcija će opadati, što je i bilo za očekivati.

Pri ispitivanju utjecaja promjene geometrijskih parametara na promjenu ciljne funkcije, uzeli su se u obzir (unutar ovog preliminarnog istraživanja optimizacije dijagrama zračenja) broj elemenata na sferi i njihov raspored.

5.2. SPIRALNA KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA

Druga konfiguracija antenskih elemenata na koju se primjenjuje metoda direktnog pretraživanja jest spiralna konfiguracija. Zhou ([42]) uvodi spiralnu raspodjelu elemenata sfernog niza kao jednostavnu konfiguraciju namijenjenu velikom broju elemenata. U sklopu ovog istraživanja obradit će se, a na osnovu istraživanja optimalnog broja antena za odgovarajuće radijuse sfera, sfere s $N = 72$ i $N = 139$ antena. Ono što je karakteristično za ovakav antenski niz jest to da svaki antenski element ima elevacijsku i azimutalnu poziciju koja je definirana spiralnom funkcijom, što spomenuti niz razlikuje od ostalih obrađenih nizova (ikosaedar ili Leopardi) kod kojih je elevacijska pozicija elemenata definirana elevacijskim prstenovima.

I u ovom slučaju se analizira utjecaj promjene relevantnih parametara geometrije i pobude na promjenu ciljne funkcije (CF_1 i CF_2), a to su:

- utjecaj promjene broja elementarnih antena – ono što je za očekivati jest porast vrijednosti ciljne funkcije s porastom broja antena;

- utjecaj promjene pomaka elementarnih antena – usporedit će se utjecaj pomaka antena s izvornim položajem elemenata danih u poglavlju 4.4.2.

- utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena – elementi će se 'pomicati' po sferi ovisno o unaprijed zadanoj funkciji (eksponencijalna, linearna ili obrnuto eksponencijalna), a u skladu s tim očekuje se porast vrijednosti ciljne funkcije;

- utjecaj promjene amplitude – amplituda pobude pojedinog elementa mijenja se funkcijski ovisno (kao i u prethodnom slučaju);

- polarizacija pojedinog elementa mijenja se kao i amplituda – svakom elementu posebno, a funkcije po kojima se odvija ova promjena su: eksponencijalna, linearna i obrnuto eksponencijalna.

- na ciljnu funkciju utjecaj ima i promjena kuta maksimalnog zračenja - utjecaj kuteva maksimalnog zračenja istražen je na način uniformne promjene vrijednosti elevacijskog kuta s konstantnim koracima promjene, uz zadržavanje azimutalnog kuta konstantnim i obrnuto.

Postavke simulacije svakog od nabrojanih slučajeva spiralne konfiguracije:

- promjena faze pobude s promjenom elevacijskih kuteva antenskih elemenata na sferi;

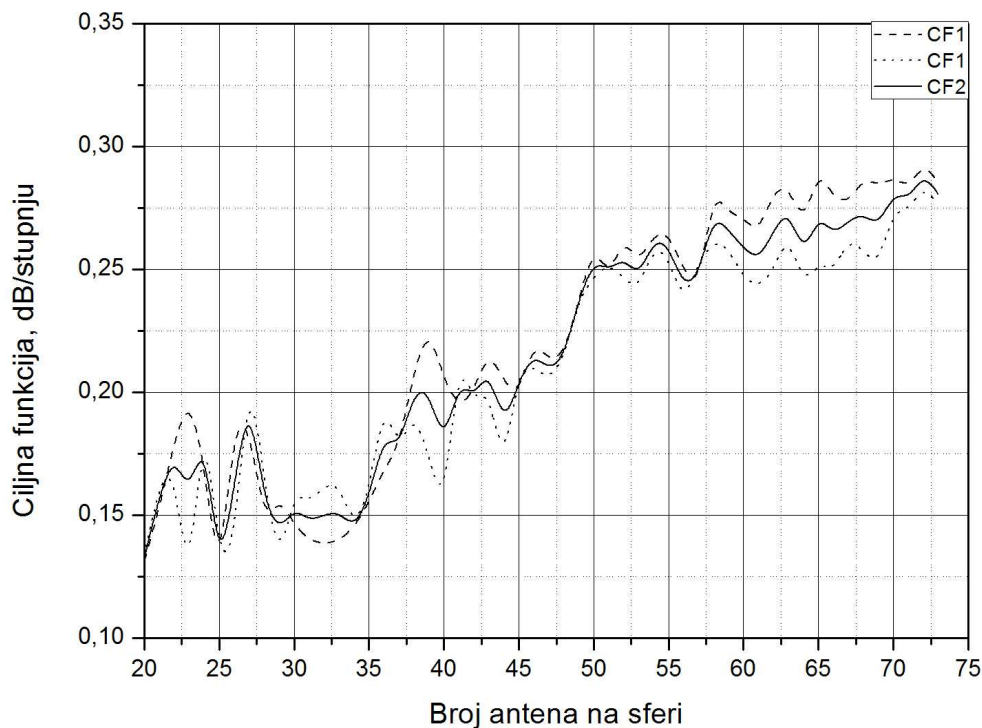
- radijus sfere: $r_s = 30$ cm i $r_s = 52,9$ cm;

- selekcijski kut konusa: $\alpha_{sel} = 180^\circ$ za odabir optimalnog broja antena i $\alpha_{sel} = 90^\circ$ za promjenu položaja antena na sferi, zatim $\alpha_{sel} = 83^\circ$ (za $r_s = 30$ cm) i $\alpha_{sel} = 56^\circ$ (za $r_s = 52,9$), što

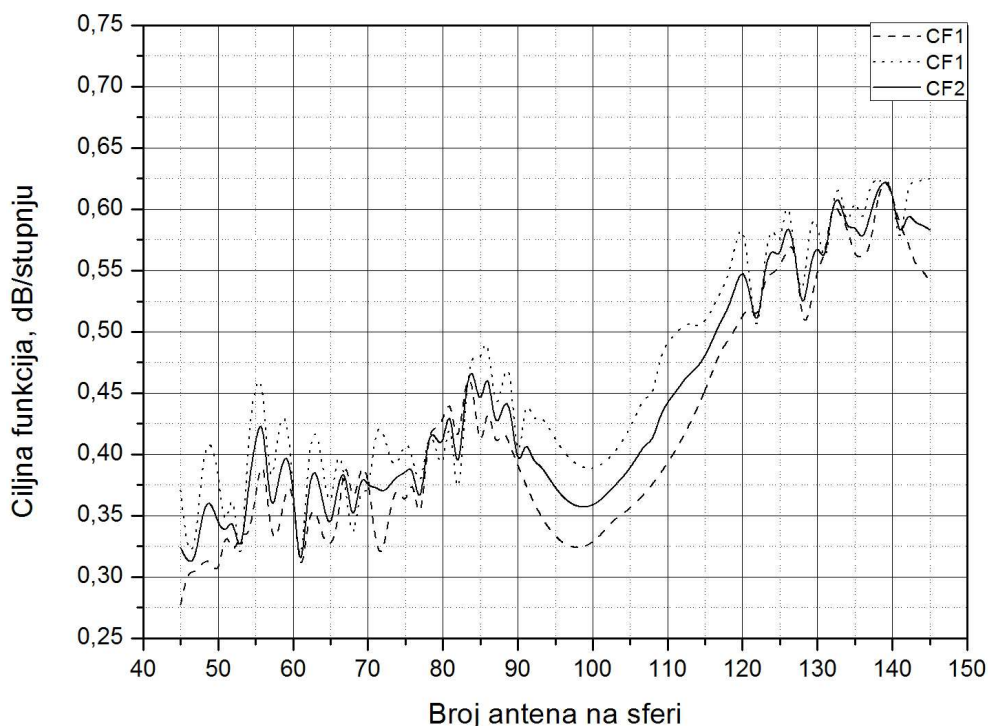
podrazumijeva 31 odabranu antenu (72 ukupno antene na sferi radijusa 30 cm i i 139 ukupno antena na sferi radijusa 52,9 cm) za optimizaciju dijagrama zračenja po parametrima pobude; - frekvencija pobude je 1,7 GHz i osigurava jednomodni režim rada.

5.2.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Za ovu konfiguraciju prvo se ispituje utjecaj promjene broja antena na sferi, te njihov utjecaj na ciljnu funkciju. Promjena broja antena spada u promjenu geometrijskih parametara, a ima za cilj istražiti pri kojem je broju antena postignut maksimum ciljne funkcije. Povećanje broja antena rezultira smanjenjem širine glavne laticice i snižavanja vrijednosti bočnih laticica, a samim tim i porastom ciljnih funkcija. Rezultati porasta ciljne funkcije s povećanjem broja antena prikazani su na slici 5.15.



a)



b)

Slika 5.15. Promjena ciljne funkcije CF_1 i CF_2 uz promjenu broja antena:

a) $r_s = 30$ cm i b) $r_s = 52,9$ cm.

Pošto su preliminarno napravljena istraživanja na ikosaedarskoj strukturi i uz odabrani broj antena unutar konusa 31, svi dalji rezultati dobiveni su za isti ili približan broj antena na sferi.

Kako bi se pronašlo rješenje zajedničko objema ravninama, napravljeni su dijagrami zračenja za E i H ravninu istovremeno, i ukupni dijagrami zračenja daju sljedeće zaključke: maksimalna vrijednost ciljne funkcije postignuta je na 72 antene za $r_s = 30$ cm od 0,289 dB/stupnju i na 139 antena za $r_s = 52,9$ cm od 0,624 dB/stupnju (vrijednost ukupne ciljne funkcije postiže se aritmetičkom sredinom vrijednosti ciljne funkcije E i H ravnine u svrhu ujednačavanja dijagrama zračenja).

5.2.2. Utjecaj promjene pomaka elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

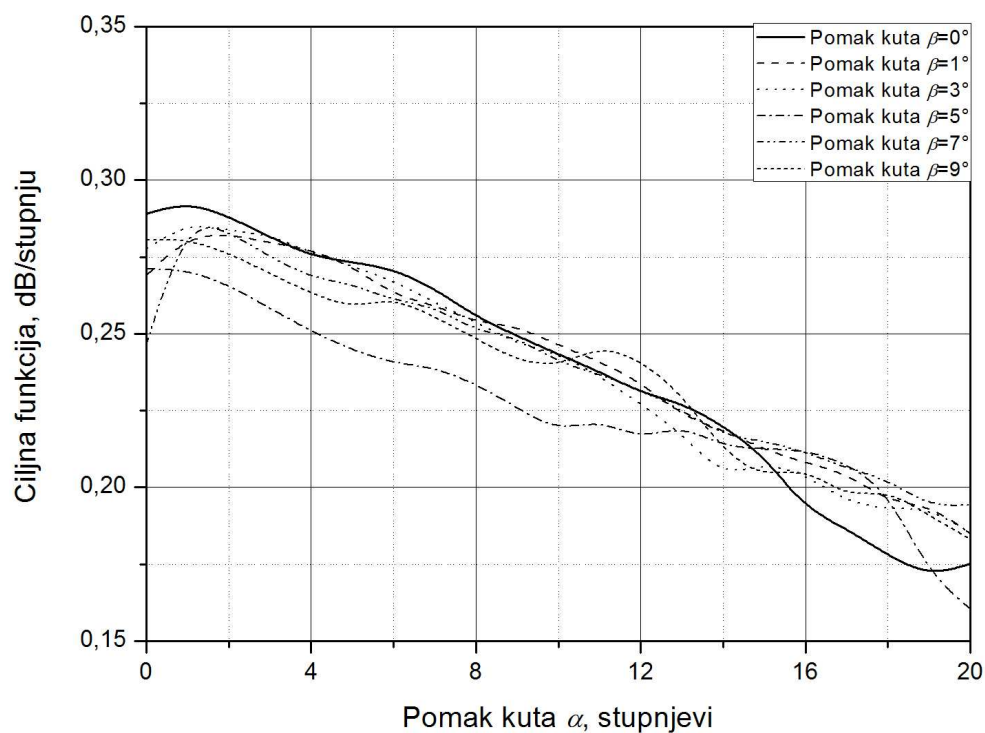
Pod pojmom promjene elevacijskog i azimutalnog kuta misli se na α i β promjenu položaja antena na sferi. Pošto se antena 'fizički' pomicala, program je računao minimalnu udaljenost dva elementa, a kretala se u granicama između $0,4\lambda$ i $0,5\lambda$ te se na taj način poštovao uvjet za ograničenje sprege.

Kao dio uvodnog ispitivanja spiralne konfiguracije napravljena je provjera originalnog rasporeda antena na sferi koja je dana [41]. U programu je mijenjan elevacijski i azimutalni položaj antena u rasponu od 0° (izvorni raspored) do 10° , gdje se alfa i beta kutevi mijenjaju istovremeno, određuje se dijagram zračenja za E i H ravninu, te ukupna ciljna funkcija (obje ravnine zajedno). Ovo istraživanje napravljeno je u svrhu pronalaska najboljeg položaja elemenata na sferi uz prethodno određen optimalan broj antena na sferi dan spiralnom konfiguracijom. Dalja istraživanja utjecaja promjene geometrijskih i pobudnih parametara na promjenu ciljne funkcije, vežu se na postignute rezultate. Raspored elemenata na sferi, kao i njihov broj i promjena položaja spada u geometrijske parametre koji utječu na dijagram zračenja određene konfiguracije.

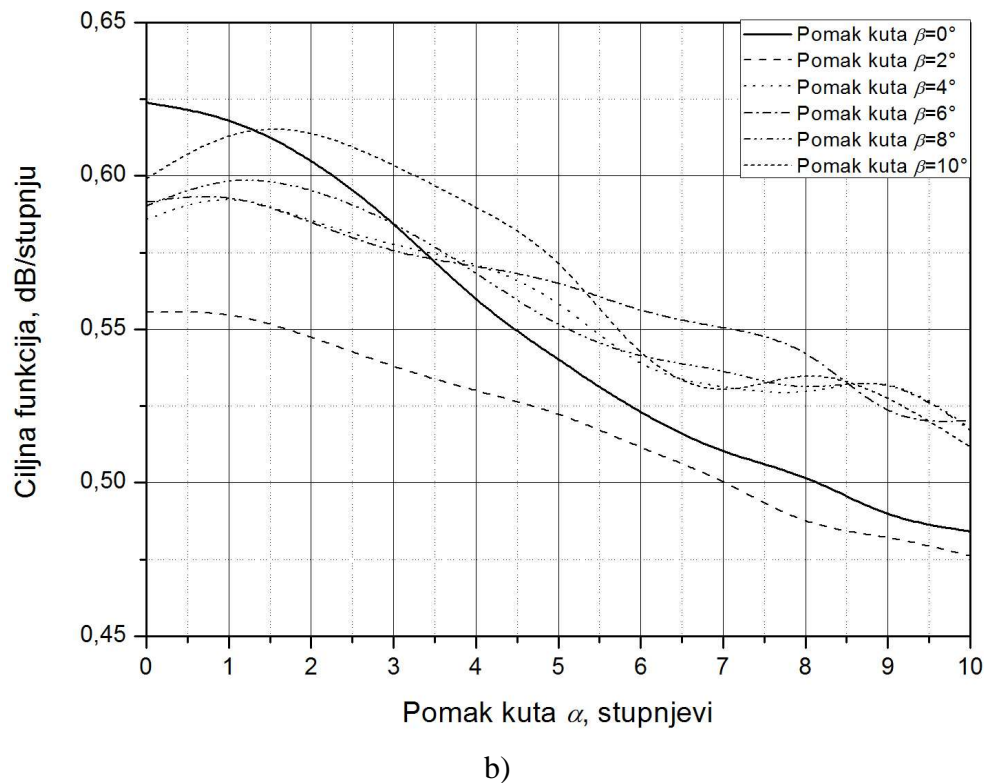
Ako je radijus sfere 30 cm, izvorni položaj antena dan algoritmom prema [41] nije optimalna konfiguracija. Istraživanja su pokazala da je maksimalna vrijednost ciljne funkcije postignuta za pomak elevacijskog $\alpha=1^\circ$ i azimutalnog kuta $\beta=0^\circ$, a njena vrijednost iznosi 0,293 dB/stupnju.

U drugom slučaju kada je $r_s = 52,9$ cm, rezultati su pokazali da izvorni položaj antena na sferi daje najveću vrijednost ciljne funkcije i ona iznosi 0,624 dB/stupnju.

Dijagrami na Slici 5.16. prikazuju promjenu ciljne funkcije u ovisnosti o promjeni azimutalnog kuta antena do 10° .



a)



Slika 5.16. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o promjeni azimutalnog i elevacijskog kuta elemenata: a) $r_s = 30$ cm, b) $r_s = 52,9$ cm.

5.2.3. Utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Kao i kod ikosaedarske konfiguracije elemenata na sferi, napravljeno je istraživanje promjene položaja antena za spiralni raspored. U ovom je slučaju na osnovni položaj antena (prema [41]) dodan 1° (za $r_s = 30$ cm) za elevacijski kut α (poglavlje 5.2.2.), te pomak α_{dod} koji se mijenja eksponencijalno, linearno ili obrnuto eksponencijalno kako bi se zadržala prvobitna ideja spiralne konfiguracije. Azimutalni kut β ostaje kakav je.

U svakoj od situacija vodilo se računa o minimalnoj udaljenosti dviju antena, simulacije su napravljene također za oba radijusa sfere, samo što se ovo i dalja istraživanja rade za E i H ravninu posebno, jer trenutno nije bitno ujednačavanje dijagrama zračenja iz nekog zajedničkog cilja.

Funkcijska ovisnost elevacijskog kuta prstena na kome se nalaze antenski elementi:

a) eksponencijalna promjena

$$\alpha_{\text{dod}} = (k/50) \cdot \exp((-k \cdot b \cdot 0.1)/50) \text{ za } r_s=30 \text{ cm}$$

$$\alpha_{\text{dod}} = (k/30) \cdot \exp((-k \cdot b \cdot 0.1)/30) \text{ za } r_s=52,9 \text{ cm} \quad (5-15)$$

gdje je:

$$b \in [0:\text{broj antena}],$$

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-1:10]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [0:20]$ za $r_s=52,9$ cm;

b) linearna promjena

$$\alpha_{\text{dod}} = (1-(k/2) \cdot b \cdot 0.3)/550 \text{ za } r_s=30 \text{ cm i } r_s=52,9 \text{ cm} \quad (5-16)$$

gdje je:

$$b \in [0:\text{broj antena}],$$

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-4:4]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-10:4]$ za $r_s=52,9$ cm;

c) obrnuto eksponencijalna promjena

$$\alpha_{\text{dod}} = (k/40) \cdot (2 - \exp((-k \cdot b \cdot 0.5)/50)) \text{ za oba radijusa} \quad (5-17)$$

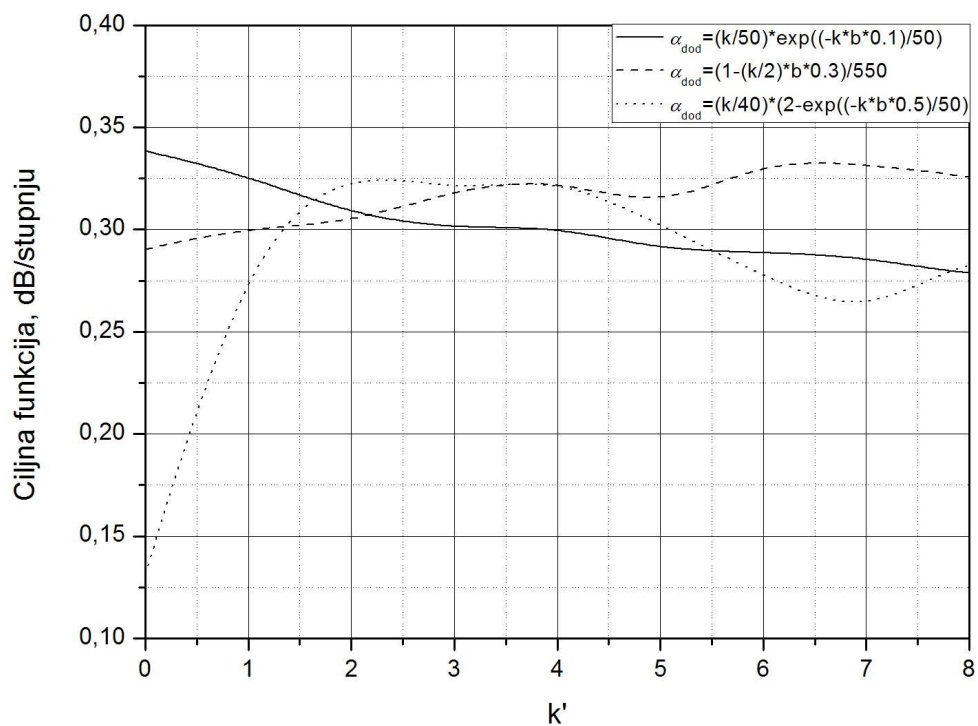
gdje je:

$$b \in [0:\text{broj antena}],$$

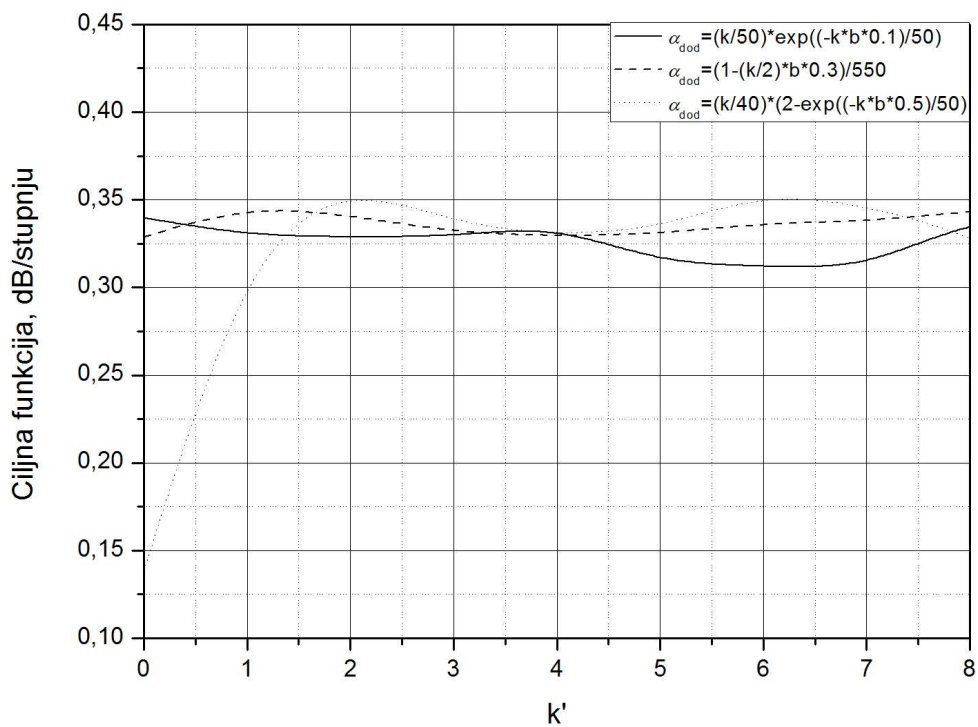
k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-4:10]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-1:10]$ za $r_s=52,9$ cm.

I u ovom se slučaju na x-osi dijagrama nalaze se prilagođeni koeficijenti kako bi grafovi bili usporedivi. Za sva tri slučaja prilagođeni koeficijent k' predstavlja razliku između trenutne i minimalne vrijednosti stvarnog koeficijenta danog gornjim izrazima, $k' = k_{\text{tren}} - k_{\text{min}}$. Na taj je način os skalirana, a krivulje se mogu usporediti.

Sve tri funkcije različito djeluju na pomak prstenova. Povećanje vrijednosti parametra k preko utvrđenih vrijednosti, rezultira neispunjavanjem uvjeta minimalnog razmaka između dva elementa. Dijagrami na slikama 5.17. i 5.18. prikazuju ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije k kojom se mijenja položaj elemenata na sferi u E i H ravnini. Pri tome dijagrami na slici 5.17. obuhvaćaju obje ravine za sferu radijusa 30 cm s minimalnim razmakom elemenata $d_{\text{min}}=0,4\lambda$, a na slici 5.18. za sferu radijusa 52,9 cm s minimalnim razmakom elemenata $d_{\text{min}}=0,5\lambda$.

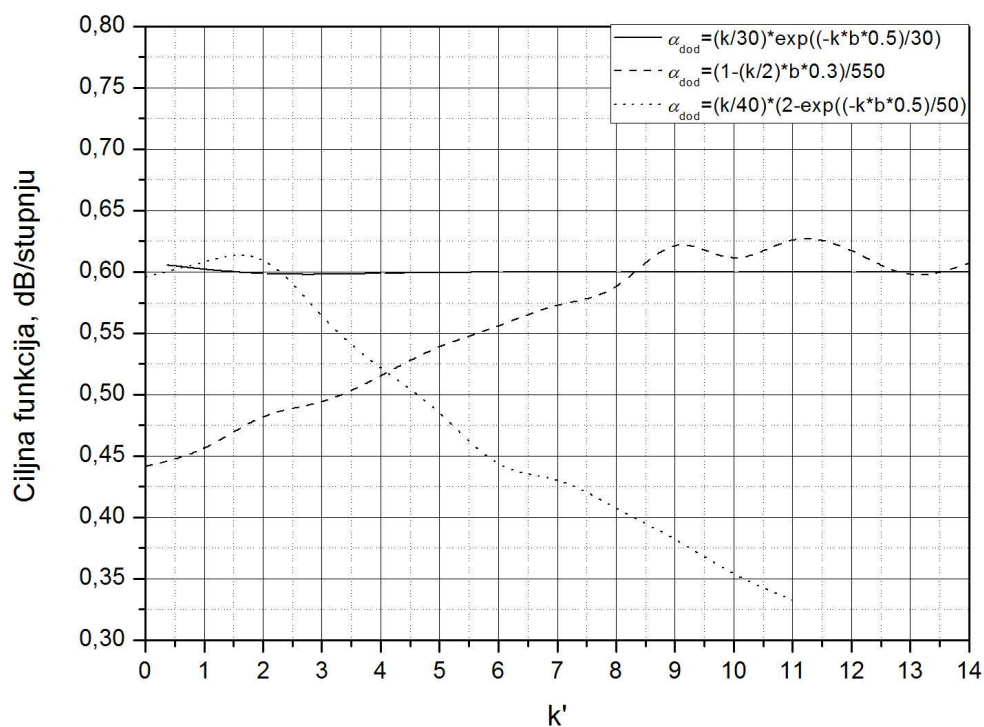


a)

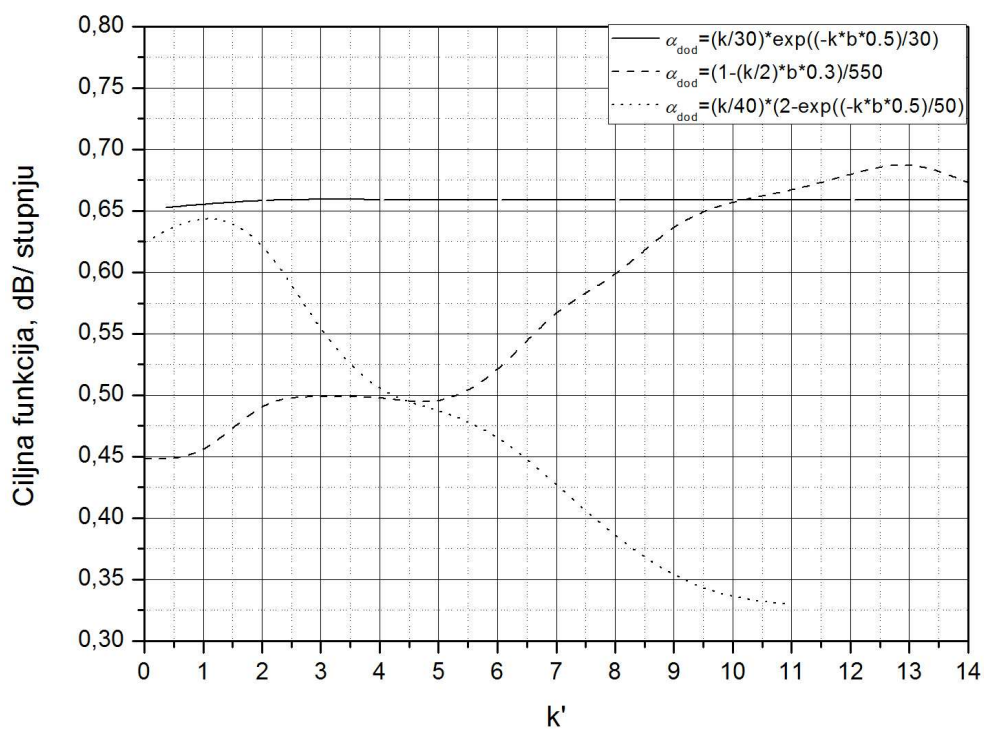


b)

Slika 5.17. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm, $d_{\min} = 0,4\lambda$.



a)



b)

Slika 5.18. Ovisnost ciljine funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm, $d_{min} = 0,5\lambda$.

U slučaju sfere 30 cm, simulacije su pokazale da ciljna funkcija doseže maksimum na 0,338 dB/stupnju za eksponencijalnu promjenu gustoće elemenata, pri $k' = 0$ u E ravnini, dok je u H ravnini ciljna funkcija vrijednosti 0,354 dB/stupnju za obrnuto eksponencijalnu promjenu funkcije i $k' = 6$. Veće se vrijednosti maksimuma ciljne funkcije postižu za $r_s = 52,9$ cm, što je i bilo za očekivati, jer je veći radijus sfere i broj obuhvaćnih antena. U E ravnini i pri linearnoj promjeni gustoće, najveća vrijednost ciljne funkcije je 0,634 za $k' = 11$, dok je za H ravninu 0,692 dB/stupnju za $k' = 13$ pri linearnoj promjeni gustoće elemenata.

5.2.4. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Pošto je spiralna konfiguracija takva da se sfera dijeli u N horizontalnih ravnina, a jedna ravnina podrazumijeva jedan antenski element, ovdje se amplituda mijenja po elevacijskom kutu α što znači da svaki prsten ima drukčiju amplitudu funkcijski ovisnu prema sljedećim relacijama:

$$AMP = 2 \cdot \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0.001) \text{ i } AMP = 4 \cdot \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0.001) \text{ za } r_s=30 \text{ cm i } r_s=52,9 \text{ cm} \quad (5-18)$$

→ eksponencijalna promjena amplitude;

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0.001 \text{ i } AMP = 2 - \alpha \cdot k \cdot 0.001 \text{ za } r_s=30 \text{ cm i } r_s=52,9 \text{ cm} \quad (5-19)$$

→ linearna promjena amplitude;

$$AMP = 2 \cdot \exp(\alpha \cdot k \cdot 0.0007) \text{ za oba radijusa sfere} \quad (5-20)$$

→ obrnuto eksponencijalna promjena amplitude,

gdje je:

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu:

$k \in [0,30]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-10:20]$ za $r_s=52,9$ cm (eksponencijalna promjena amplitude)

$k \in [-5:25]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-5:25]$ za $r_s=52,9$ cm (linearna promjena amplitude)

$k \in [-5:25]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-5:25]$ za $r_s=52,9$ cm (obrnuto eksponencijalna promjena amplitude),

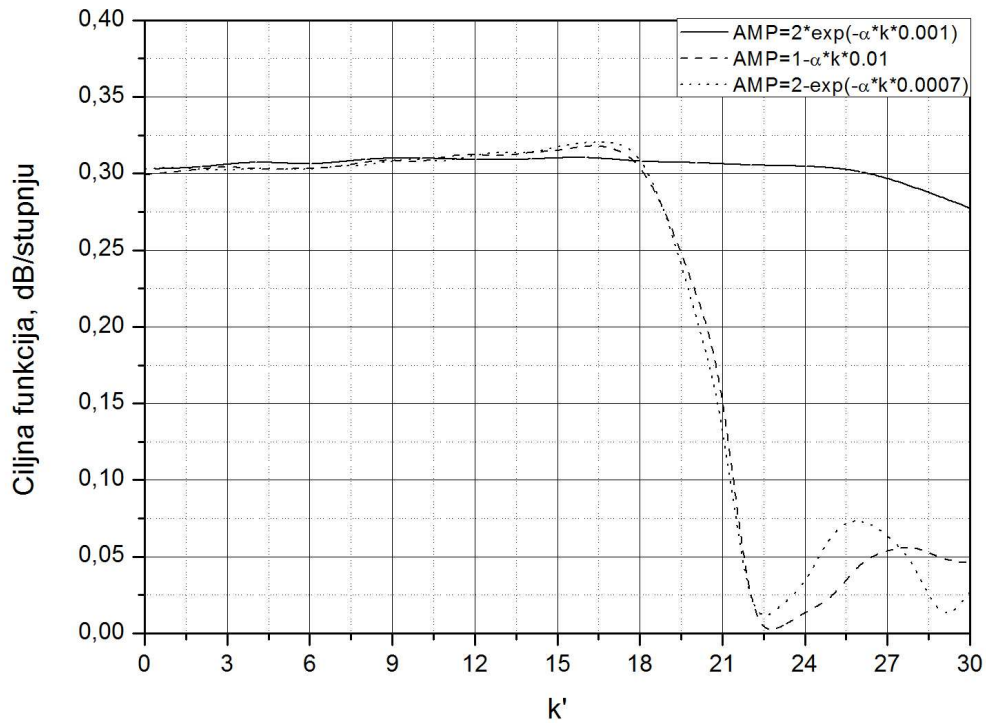
α – elevacijski kut prstena na kojemu je smješten antenski element.

Za spiralnu konfiguraciju i $r_s = 30$ cm, α poprima vrijednosti: 82,08729°, 80,44970°, 78,80335°, 77,14671°, 75,47816°, 73,79601°, 72,09841°, 70,38341°, 68,64887°, 66,89245°, 65,11160°, 63,30345°, 61,46483°, 59,59214°, 57,68129°, 55,72757°, 53,72554°, 51,66875°, 49,54957°, 47,35874°, 45,08488°, 42,71372°, 40,22688°, 37,60006°, 34,79985°, 31,77817°, 28,46112°, 24,72417°, 20,32408°, 14,63164°, 1°.

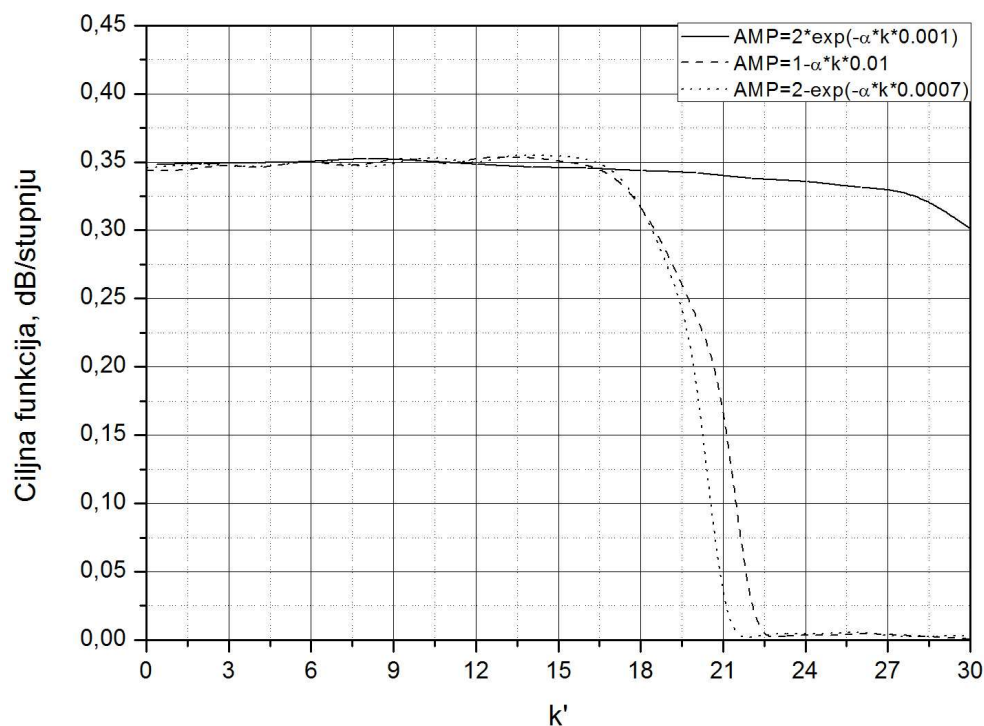
Za $r_s = 52,9$ cm, α poprima vrijednosti: $55,58261^\circ$, $54,56984^\circ$, $53,54417^\circ$, $52,50475^\circ$, $51,45066^\circ$, $50,38087^\circ$, $49,29429^\circ$, $48,18969^\circ$, $47,06569^\circ$, $45,92079^\circ$, $44,75329^\circ$, $43,56128^\circ$, $42,34261^\circ$, $41,09479^\circ$, $39,81500^\circ$, $38,49995^\circ$, $37,14580^\circ$, $35,74802^\circ$, $34,30115^\circ$, $32,79861^\circ$, $31,23226^\circ$, $29,59185^\circ$, $27,86418^\circ$, $26,03178^\circ$, $24,07061^\circ$, $21,94604^\circ$, $19,60486^\circ$, $16,95743^\circ$, $13,82874^\circ$, $9,76650^\circ$, 0° .

Iz ovih je vrijednosti vidljivo da je unutar konusa za obje sfere 31 antena, što se nastojalo postići kako bi bilo u skladu s proračunima na ikosaedarskoj strukturi.

Opet je u pitanju monotono opadajuća funkcija promjene amplitude iz istog razloga kao i kod ikosaedarske strukture. Izračun daje sljedeće rezultate za ciljnu funkciju CF_1 (slike 5.19. i 5.20.):

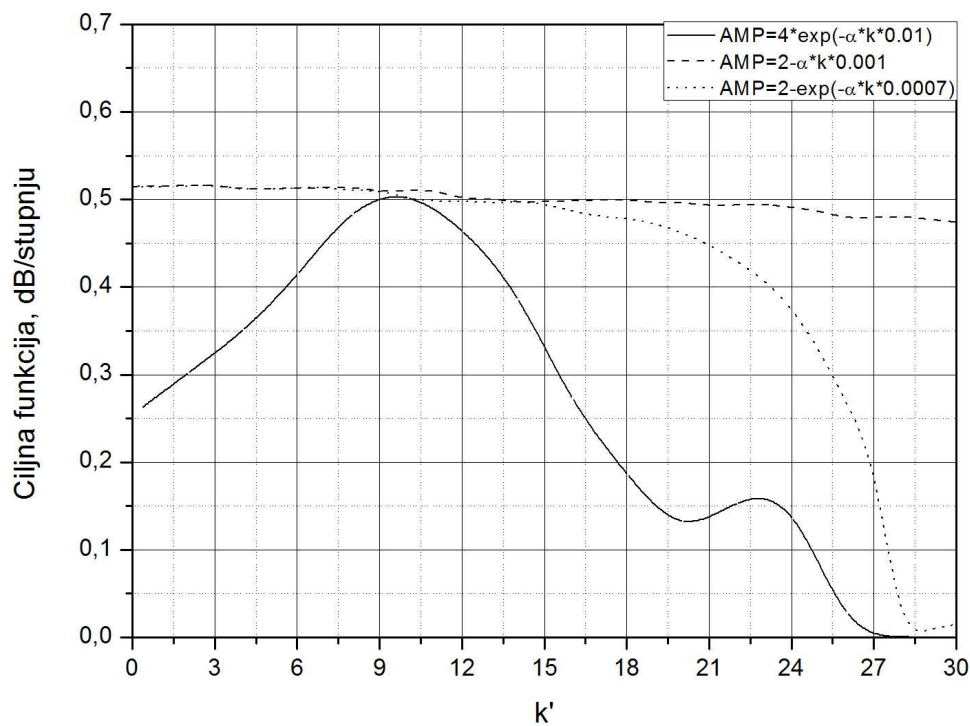


a)

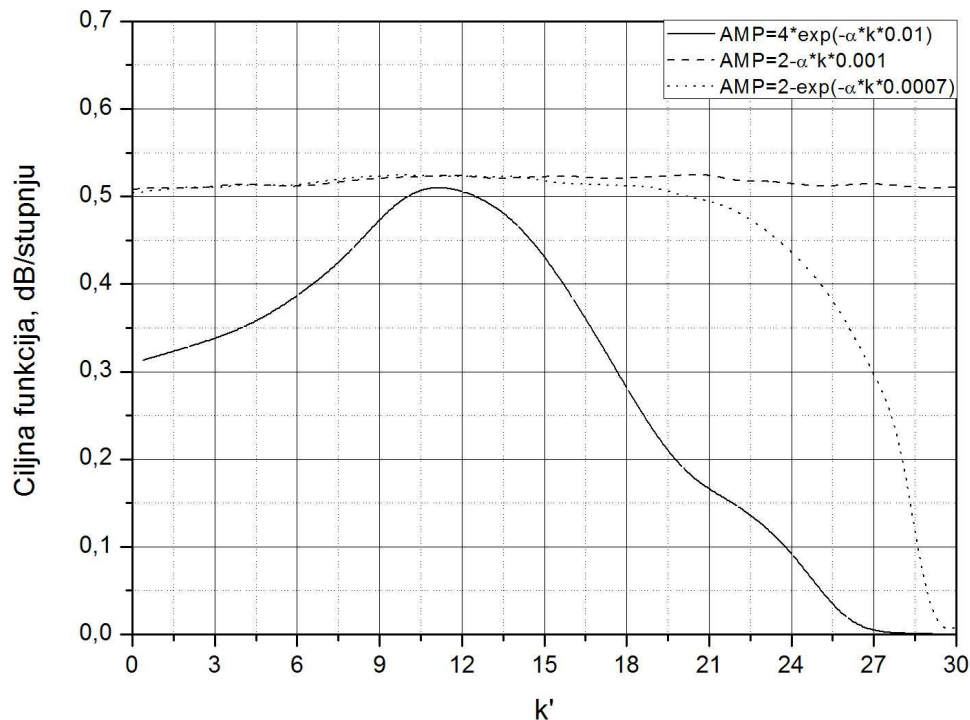


b)

Slika 5.19. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.



a)



b)

Slika 5.20. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

U prvom slučaju, tj., kada je radijus sfere 30 cm, ciljna funkcija ima najveću vrijednost u E ravnini 0,321 dB/stupnju za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude pri $k' = 17$. U H ravnini je 0,355 dB/stupnju pri obrnuto eksponencijalnu promjeni amplitude i $k' = 14$.

Za $r_s = 52,9$ cm, u E ravnini maksimum ciljne funkcije 0,516 postignut je na $k' = 3$ pri linearnoj promjeni, dok je u H ravnini nešto veća vrijednost (0,526 dB/stupnju) za također linearnu promjenu amplitude i koeficijent $k' = 21$.

5.2.5. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Polarizacija pobude antenskih elemenata niza mijenja se na tri načina:

$$\Phi = a + 5 \cdot \exp(k \cdot |b-c| \cdot 0.001) \text{ i } \Phi = a + \exp(k \cdot |b-c| \cdot 0.001) \text{ za } r_s = 30 \text{ cm i } r_s = 52,9 \text{ cm} \quad (5-21)$$

→ eksponencijalna promjena polarizacije;

$$\Phi = a - 2 \cdot k \cdot |b-c| \cdot 0.001 \text{ i } \Phi = a + k \cdot |b-c| \cdot 0.001 \text{ za } r_s = 30 \text{ cm i } r_s = 52,9 \text{ cm} \quad (5-22)$$

→ linearna promjena polarizacije;

$$\Phi = a \cdot 3 \cdot \exp(k \cdot |b-c| \cdot 0.001) - 1 \text{ i } \Phi = a \cdot \exp(k \cdot |b-c| \cdot 0.001) - 1 \text{ za } r_s=30 \text{ cm i } r_s=52,9 \text{ cm} \quad (5-23)$$

→ obrnuto eksponencijalna promjena polarizacije,

gdje je:

a – azimutalni (ϕ) kut u lokalnom koordinatnom sustavu,

b – brojač po elementa, $b \in [0:c]$,

c – ukupni broj elemenata i

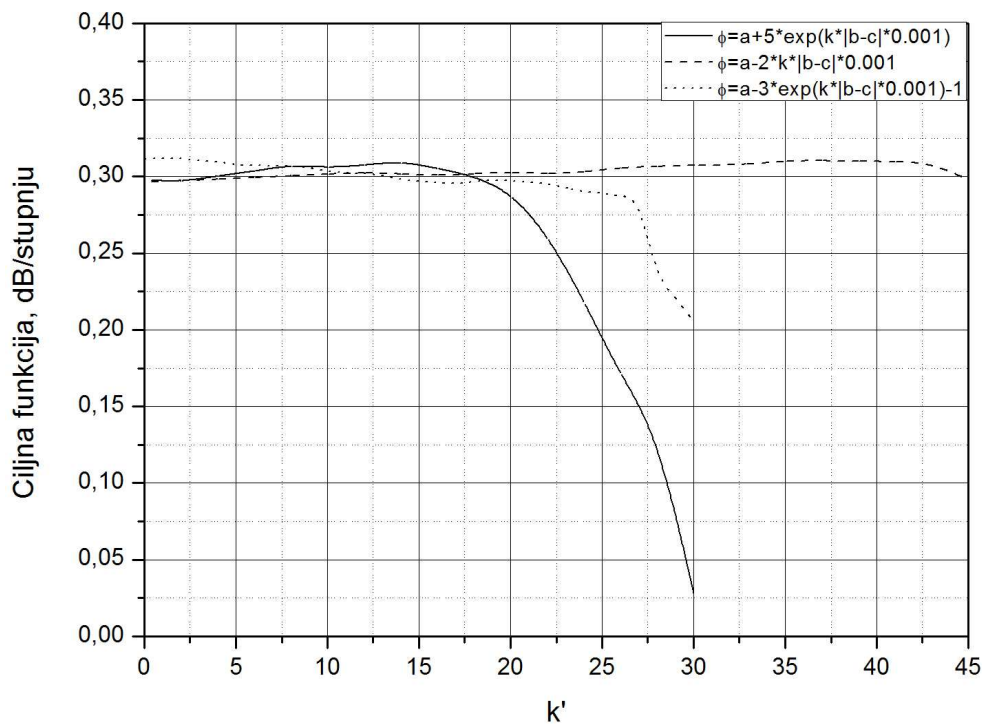
k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda:

$k \in [-10:20]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-20:20]$ za $r_s=52,9$ cm (eksponencijalna promjena polarizacije)

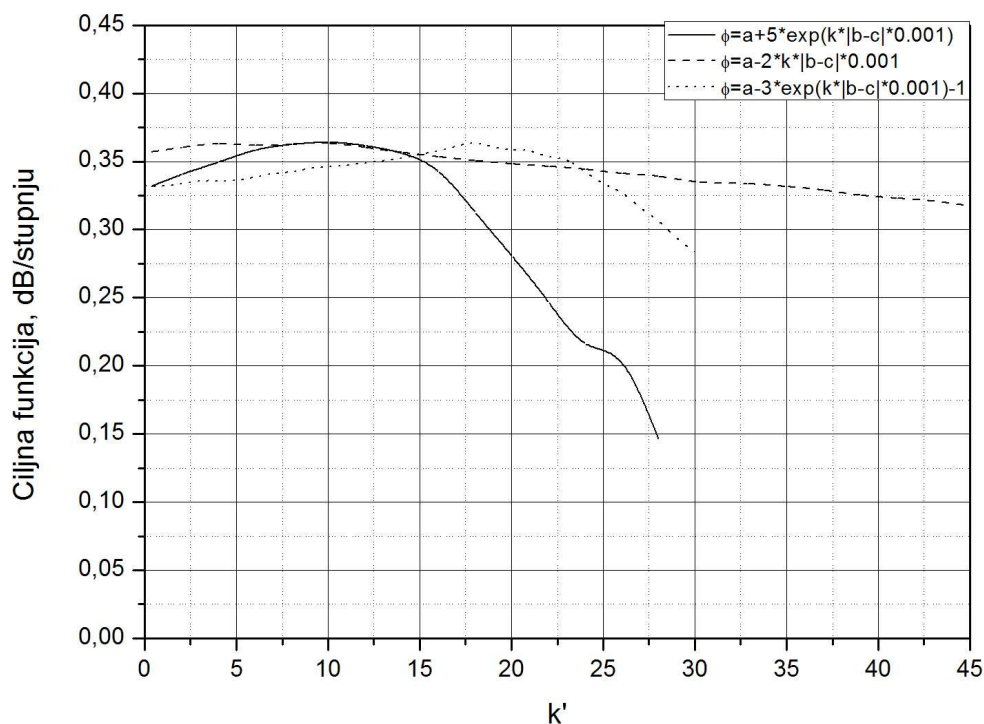
$k \in [-20:26]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-12:12]$ za $r_s=52,9$ cm (linearna promjena polarizacije)

$k \in [-10:20]$ za $r_s=30$ cm i $k \in [-10:205]$ za $r_s=52,9$ cm (obrnuto eksponencijalna promjena polarizacije).

Polarizacija se mijenja po elevacijskom kutu položaja antenskog elementa na sferi po monotono opadajućim funkcijama danim u prethodnim izrazima.



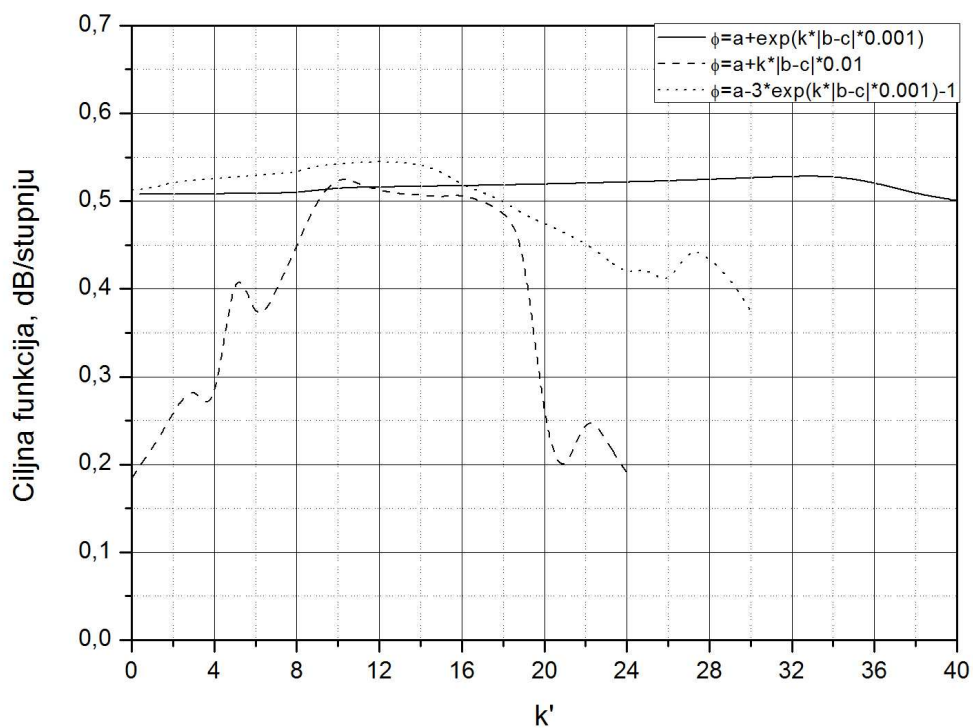
a)



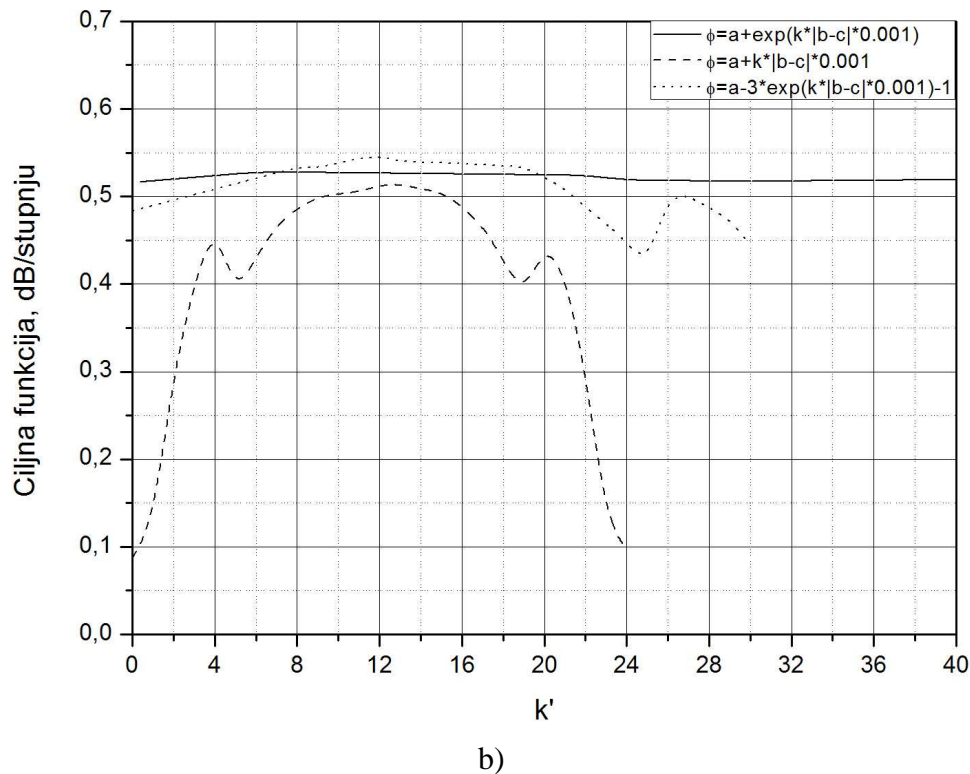
b)

Slika 5.21. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.



a)



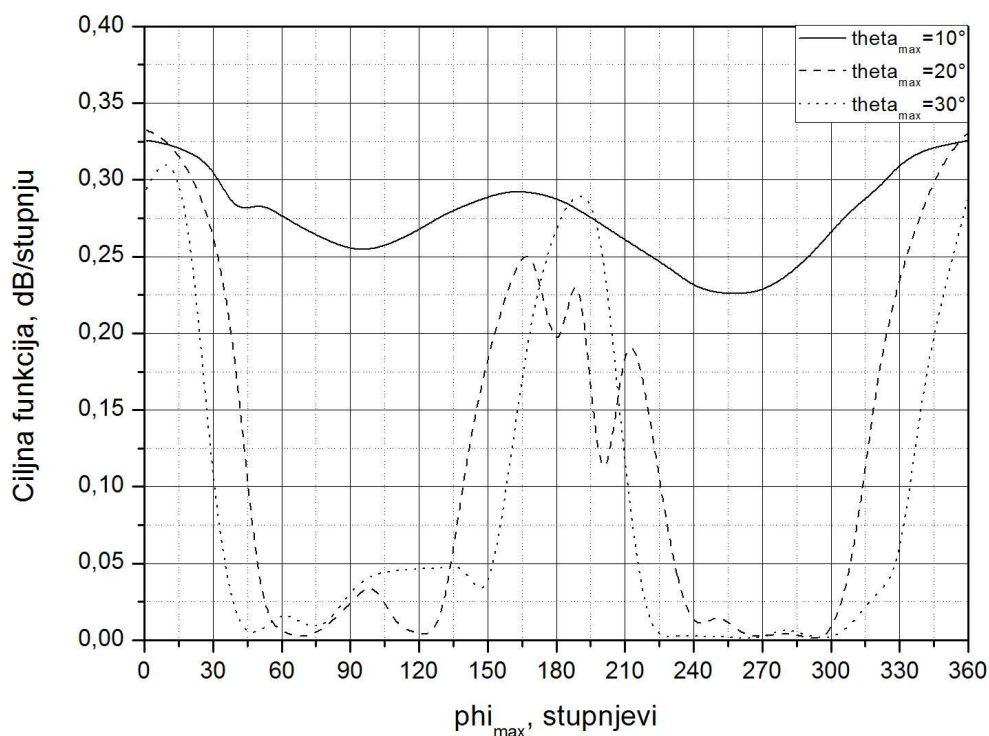
Slika 5.22. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

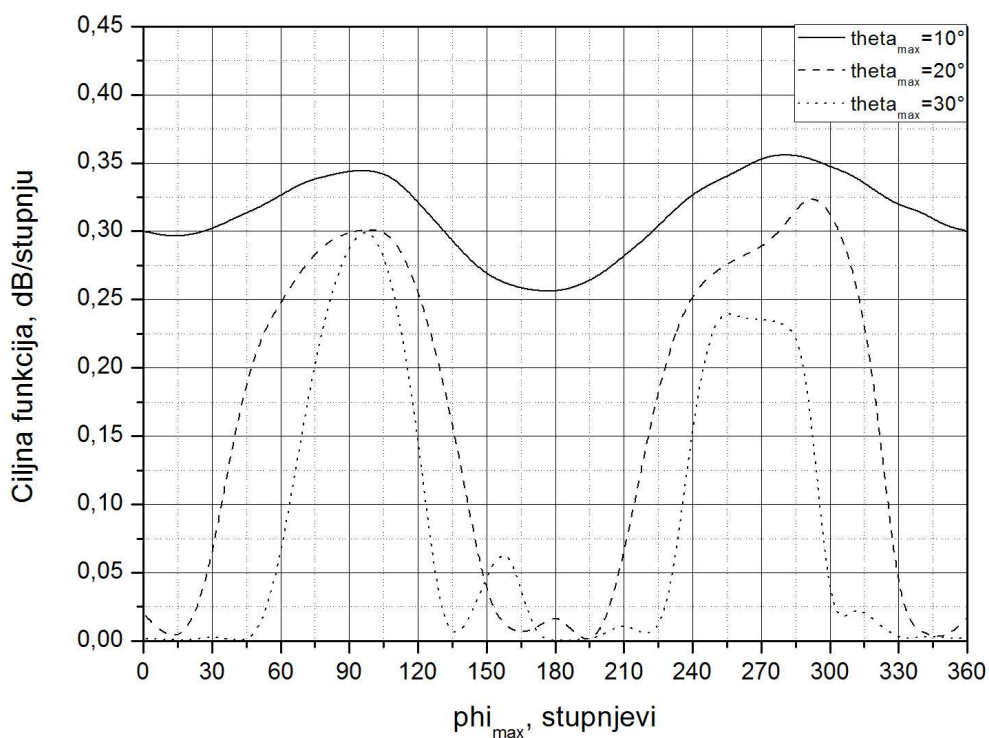
Iz dijagrama na slikama 5.21. i 5.22. vidljivo je da ciljna funkcija raste pri povećanju koeficijenta k' do određene vrijednosti na kojoj postiže svoj maksimum, a nakon toga opada. Parametar k' , pri radijusu sfere od 30 cm, mijenja se u opsegu $[0:45]$. Za sferu radijusa 30 cm, u E ravnini maksimum ciljne funkcije postignut je za obrnuto eksponencijalnu promjenu polarizacije i pri $k'=2$, te ostvaruje 0,312 dB/stupnju. U H ravnini na $k'=10$ uz eksponencijalnu promjenu polarizacije, maksimum ciljne funkcije je 0,365 dB/stupnju. Povećanjem radijusa sfere na $r_s=52,9$ cm, maksimalna vrijednost ciljne funkcije povećava se na 0,545 dB/stupnju za obrnuto eksponencijalnu promjenu polarizacije u E – ravnini pri iznosu $k'=12$, te na 0,546 dB/stupnju u H – ravnini za obrnuto eksponencijalnu promjenu polarizacije i $k'=12$. Opseg promjene parametra k' je pri tome $[0:40]$.

5.2.6. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

U okviru ovog istraživanja provedena su ispitivanja ponašanja ciljne funkcije u ovisnosti o promjeni kuta maksimalnog zračenja spiralne konfiguracije elemenata. Maksimum zračenja mijenja se na način da je azimutalni kut (ϕ_{\max}) promjenjiv u svojim granicama $0:360^\circ$, a elevacijski kut (θ_{\max}) je postavljen na svoju vrijednost i konstantan je za tu iteraciju. U sljedećem slučaju, elevacijski kut (θ_{\max}) mijenja se od $0:180^\circ$, dok je azimutalni kut (ϕ_{\max}) konstantan.



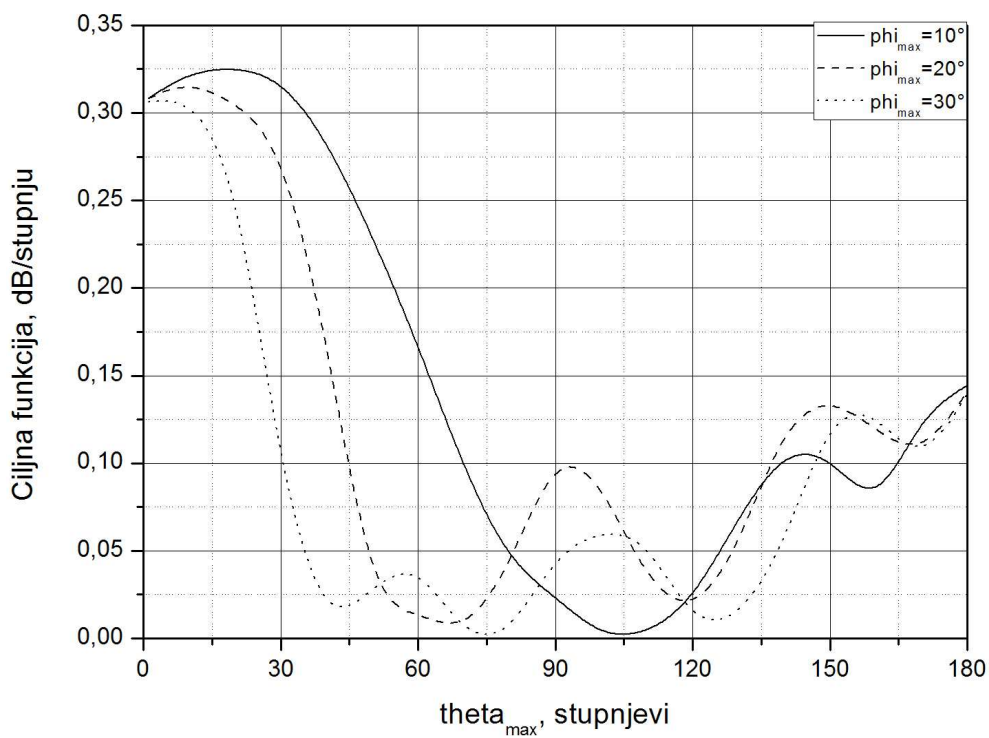
a)



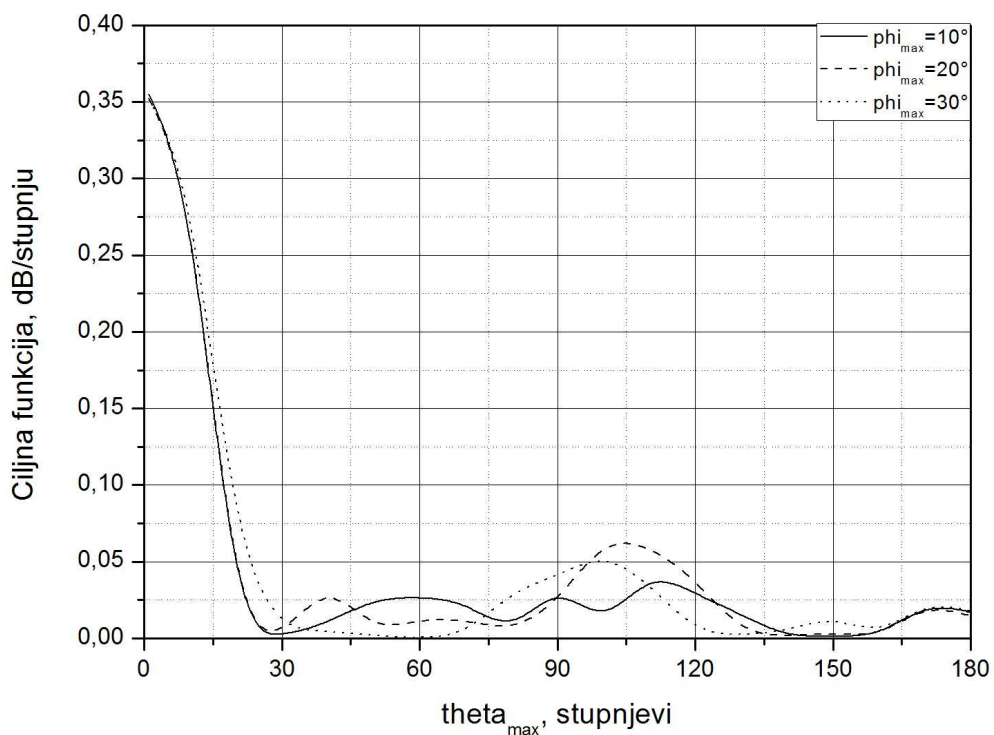
b)

Slika 5.23. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.



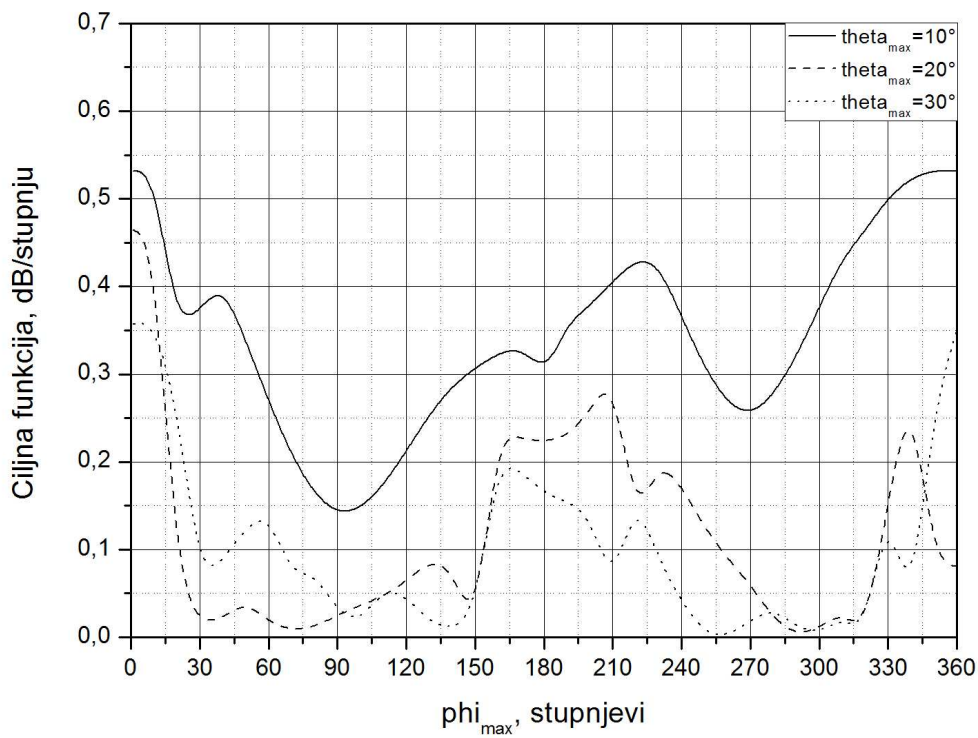
a)



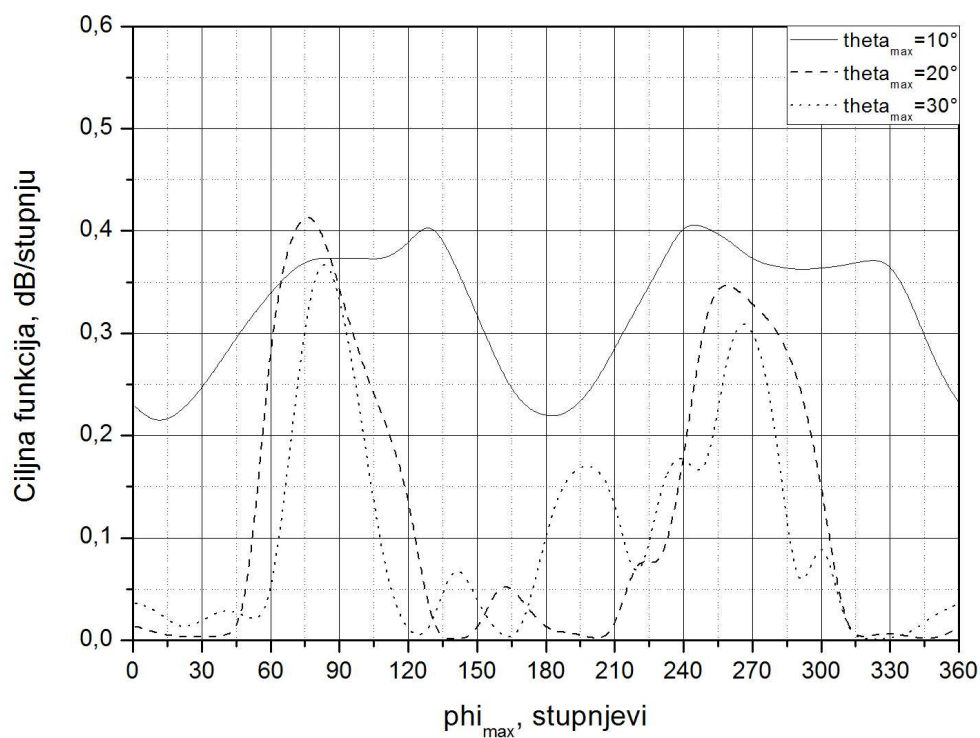
b)

Slika 5.24. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.



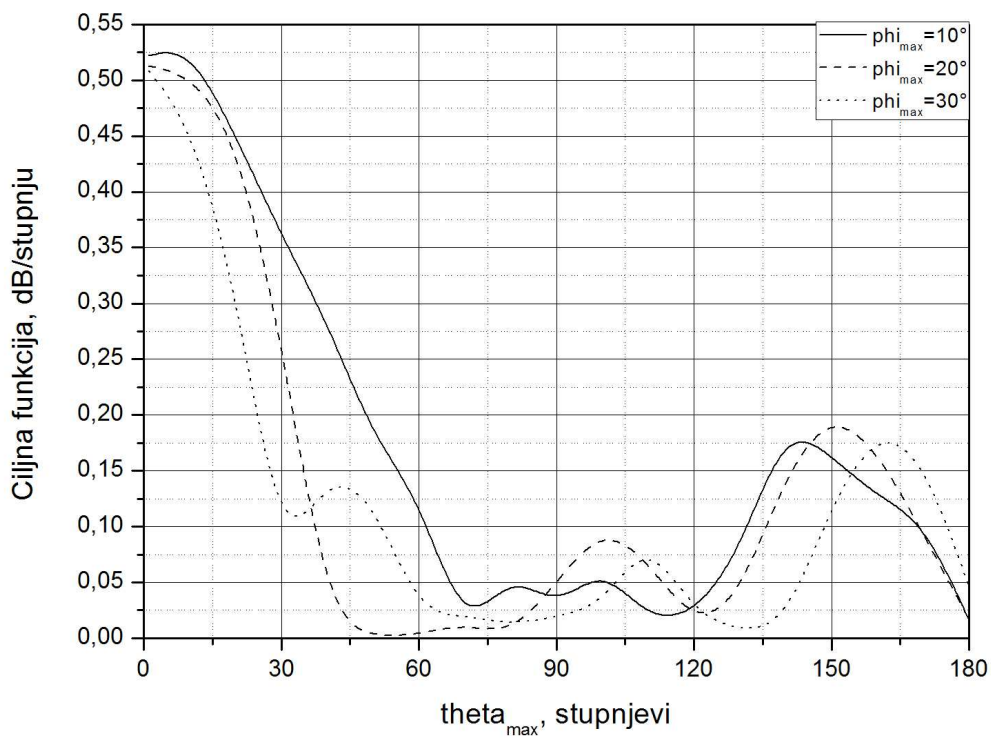
a)



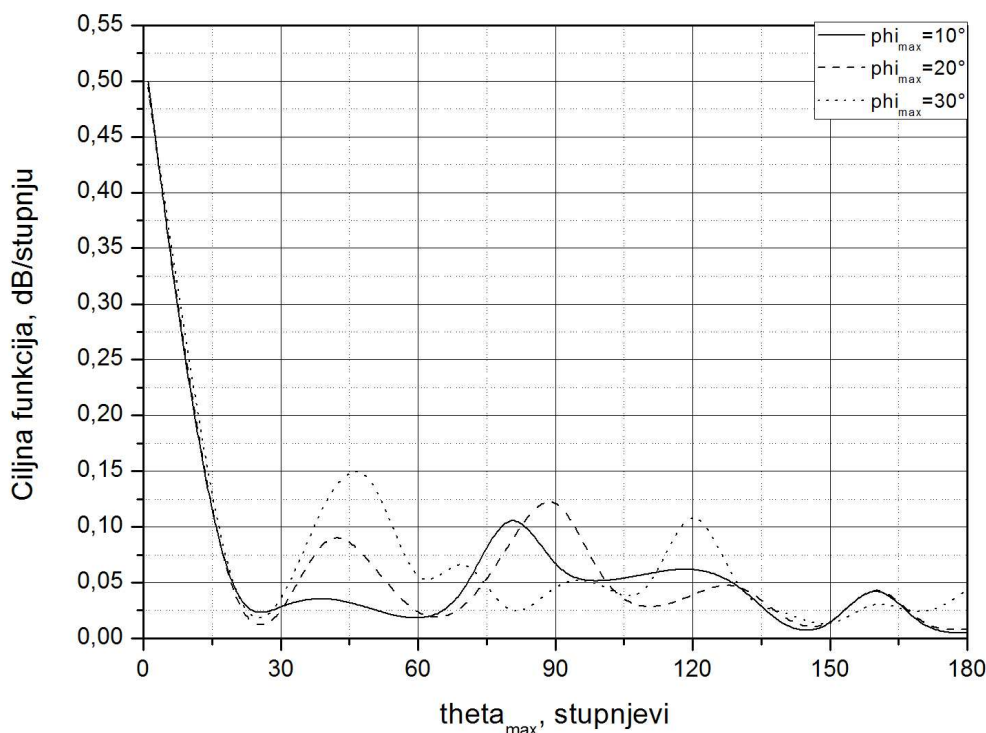
b)

Slika 5.25. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.



a)



b)

Slika 5.26. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

Iz dijagrama na slici 5.23. a) vidljivo je da ciljna funkcija ima svoj maksimum na 0° i 160° (0,332 dB/stupnju za $\theta_{\max}=20^\circ$, te 0,293 dB/stupnju $\theta_{\max}=10^\circ$) što je i za očekivati ako su simulacije izvedene za E – ravninu. Maksimalne vrijednosti ciljne funkcije na $\theta_{\max}=10^\circ$ i H ravninu pri 100° i 280° su 0,344 i 0,357 dB/stupnju.

U sljedećem ispitivanju promjenjiv je bio elevacijski kut θ_{\max} , a radijus sfere također 30cm. Na $\theta_{\max}=20^\circ$ vrijednost ciljne funkcije je maksimalna i pri $\phi_{\max}=10^\circ$ postiže 0,326 dB/stupnju. Za H – ravninu situacija je nešto drukčija, pri $\phi_{\max}=10^\circ$ i elevacijskom kutu 0° postignut je maksimum i iznosi 0,355 dB/stupnju.

Isto istraživanje provedeno je na sferi radijusa 52,9 cm i postignuti su sljedeći rezultati:

- ϕ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,532 dB/stupnju ($\phi_{\max}=0^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,431 dB/stupnju ($\phi_{\max}=220^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- ϕ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,422 dB/stupnju ($\phi_{\max}=80^\circ$, $\theta_{\max}=20^\circ$) i 0,410 dB/stupnju ($\phi_{\max}=240^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,530 dB/stupnju ($\theta_{\max}=10^\circ$, $\phi_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,499 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=10^\circ$).

5.3. LEOPARDI KONFIGURACIJA ANTENSKIH ELEMENATA

Pristup konfiguriranju antenskih nizova baziranih na podjeli sfere na područja jednakih površina temelji se na disertaciji P. Leopardija iz 2006. godine [43]. U izvornoj varijanti, površine su raspoređene po koncentričnim prstenovima jednake širine, pri čemu međusobni azimutalni pomak prstenova nije važan element podjele (konfiguracije). Ipak, kada se ovakva podjela primjenjuje za konfiguriranje antenskih nizova tada je međusobni odnos (azimutalni pomak) prstenova izuzetno važan element konfiguracije. Budući da je jedinična površina kriterij podjele sferne podloge, za razliku od drugih istraživanih konfiguracija sfernog niza, promjena bilo kojeg geometrijskog parametra mijenja konfiguraciju u potpunosti te se stoga mora pristupiti istraživanju i optimizaciji ove vrste nizova sa posebnom pažnjom. Primjerice, promjena samo broja antena niza mijenja veličinu jedinične površine, te stoga i broj prstenova, njihov međusobni azimutalni pomak kao i broj antena po prstenovima. Sličan je problem i pri promjeni radijusa sferne podloge uz konstantan broj elementarnih antena. Ne postoji, dakle čvrsta struktura rasporeda elemenata kao kod ikosaedarskog ili spiralnog rasporeda.

U ovom poglavlju rada najprije se korištenjem PSO algoritma određuje azimutalni pomak prstenova za različite radijuse sferne podloge i za različit broj antena na sfernoj podlozi koji odgovara broju površina na koje se dijeli sfera, a zatim se primjenjuje direktno pretraživanje prostora sa različitim geometrijsko-pobudnim parametrima. Ovo je posljednja konfiguracija kod koje je izvedena optimizacija dijagrama zračenja po osnovnim geometrijskim i pobudnim parametrima korištenjem metode direktnog pretraživanja cjelokupnog prostora. U ovom poglavlju se istražuje utjecaj sljedećih parametara na dijagram zračenja niza:

- broj elementarnih antena uniformnog rasporeda koji definira gustoću antenskih elemenata osnovne konfiguracije uz različit radijus sferne podloge.
- gustoće antenskih elemenata pri neuniformnom rasporedu elementarnih antena na sfernoj podlozi, uz zadržavanje Leopardi strukture. Broj elementarnih antena jednak je optimalnom broju određenom PSO algoritmom za odgovarajuće radijuse sfere, ali je gustoća antenskih elemenata po elevacijskom kutu promjenjiva. Ta je promjena definirana s tri funkcije: eksponencijalnom (konveksna), linearnom i obrnuto eksponencijalnom (konkavna).

- amplituda pobude svakog antenskog elementa uz varijablu - elevacijski kut antenskog niza. Funkcije promjene amplitude jesu: eksponencijalna, linearna i obrnuto eksponencijalna.
- polarizacija pobude antenskih elementa koja je također definirana eksponencijalnom, linearnom i obrnuto eksponencijalnom funkcijom uz varijablu - elevacijski kut antenskog niza.
- kutevi maksimalnog zračenja. Utjecaj kuteva maksimalnog zračenja je istražen na način uniformne promjene vrijednosti elevacijskog kuta sa konstantnim koracima promjene, uz zadržavanje azimutalnog kuta konstantnim i obrnuto.

Postavke izračuna za sve slučajeve pri ikosaedarskoj konfiguraciji su slijedeće:

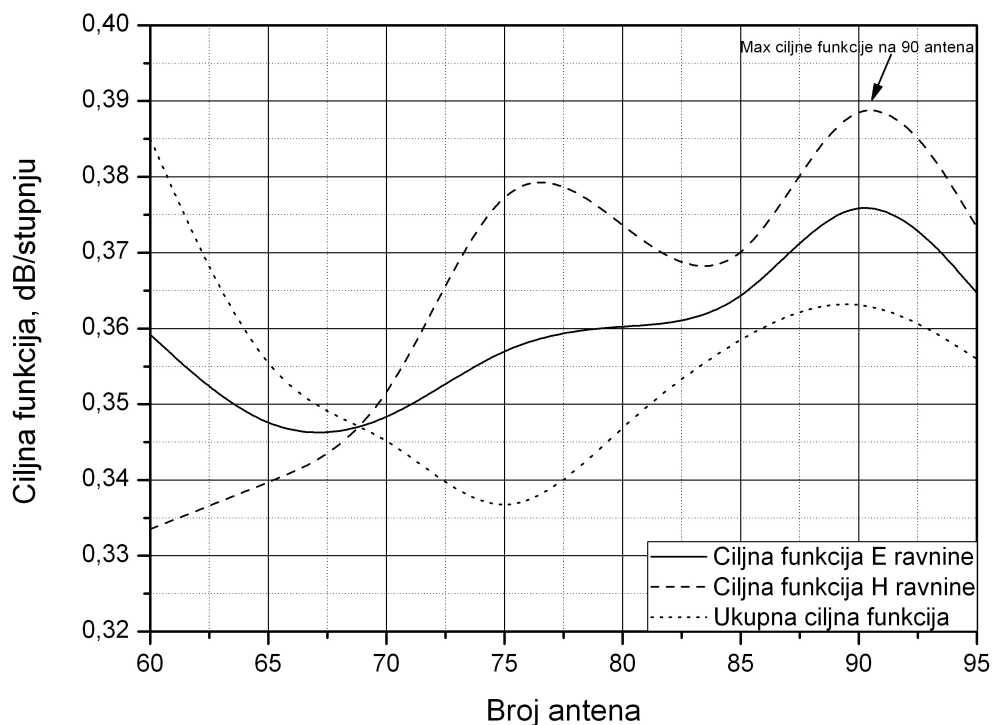
- promjena faze pobude s promjenom elevacijskih kuteva antenskih elemenata na sferi;
- izračun je načinjen za dva radijusa sfere: $r_s = 30$ cm i $r_s = 52,9$ cm;
- ukupan broj antena: 90 (za $r_s = 30$ cm) i 145 (za $r_s = 52,9$);
- selekcijski kut konusa $\alpha_{sel} = 90^\circ$ u slučaju promjene gustoće elemenata i za $r_s = 30$ i za $r_s = 52,9$, $\alpha_{sel} = 72^\circ$ (33 antene unutar konusa za $r_s = 30$ cm) i $\alpha_{sel} = 57^\circ$ (37 antena unutar konusa za $r_s = 52,9$) za promjenu svih ostalih parametara – analogno kao i kod ikosaedra i spirale;
- frekvencija pobude je 1,7 GHz i osigurava jednomodni režim rada.

Izračuni za sve slučajeve izvedeni su dvije ortogonalne ravnine (E i H ravnina), korištenjem prve ciljne funkcije (ciljne funkcije označene indeksom jedan). Slijedi istraživanje utjecaja svih parametara geometrije i pobude na dijagram zračenja Leopardi konfiguracije.

5.3.1. Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

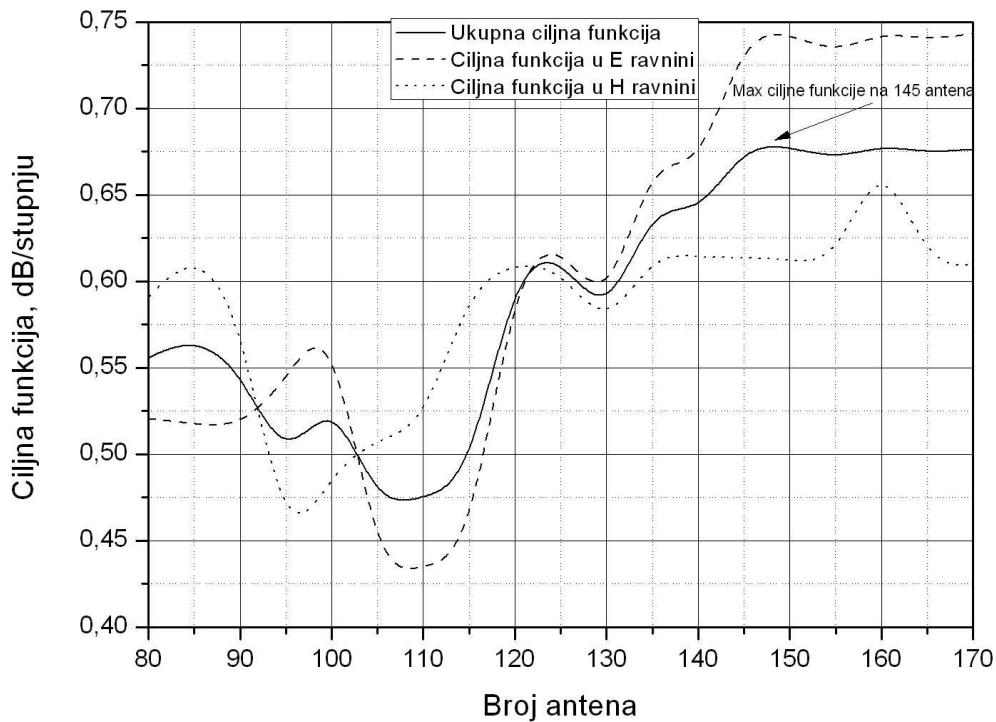
Kao za prethodne dvije konfiguracije, i u ovom slučaju istražen je utjecaj broja antena na dijagram zračenja za različite radijuse sfera. Za očekivati je da iznos ciljne funkcije raste s porastom broja antena.

Optimizacija pomaka elevacijskih prstenova niza izvedena je korištenjem PSO optimizacije. Ovo je bitno načiniti na samom početku ovog dijela analize stoga što je potrebno poznavati geometriju niza koji se kasnije istražuje primjenom direktnog pretraživanja po različitim parametrima. Važno je, kao polazne parametre za dalja ispitivanja, znati broj antena optimalan za određenu sferu u obje ravnine te sam položaj antena. Stoga je ovaj izračun izveden tako da se optimizacija dijagrama zračenja Leopardi konfiguracije izvela za različite radijuse. Pri tome je za svaki radijus (uz unaprijed definiranu minimalno dozvoljenu distancu antenskih elemenata) dobivena optimalna vrijednost ciljne funkcije za različit broj elementarnih antena. Optimizacijom su obuhvaćeni međusobni pomaci elevacijskih prstenova. Rezultati dobiveni ovim optimizacijama prikazani su za dva radijusa na slikama 5.27. i 5.28.



Slika 5.27. Ciljne funkcije u ovisnosti o broju antena ($r_s=30$ cm).

Iz slike 5.27. za sferu radijusa 30 cm, najveća vrijednost ukupne ciljne funkcije (druga ciljna funkcija – CF_2) iznosi 0,382 dB/stupnju i postignuta je za 90 antena na sferi (Napomena: kako bi krivulja imala blaže prijelaze između dviju vrijednosti, programski je primijenjena funkcija *spline* zbog čega su moguća odstupanja od tekstom navedenih i vrijednosti ciljnih funkcija na dijagramima).



Slika 5.28. Ciljne funkcije u ovisnosti o broju antena ($r_s=52,9$ cm).

Optimizacija sfere s ovim radijusom rađena je za maksimalni broj antena 95, stoga što pri ovoj konfiguraciji, za veći broj antena minimalna distanca antenskih elemenata pada ispod minimalne vrijednosti od $0,4\lambda$.

Za sferu radijusa 52,9 cm ukupna ciljna funkcija ima maksimum 0,679 dB/stupnju za 145 antena na sferi (Slika 5.28.).

Raspored antena na sferi po Leopardi konfiguraciji za prethodno određene maksimalne ciljne funkcije dva radijusa prikazan je u tablicama 5.1. i 5.2.

Tablica 5.1. Pozicijski kutevi elementarnih antena Leopardi konfiguracije za sferu radijusa $r_s=30$ cm i 90 antena.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 14,62385 | 165,96032 |
| 3 | 20,74343 | 40,52154 |
| 3 | 20,74343 | 220,52154 |
| 4 | 27,13354 | 124,13529 |
| 4 | 27,13354 | 304,13529 |
| 5 | 33,39817 | 31,50765 |
| 5 | 33,39817 | 151,50764 |
| 5 | 33,39817 | 271,50764 |
| 6 | 39,85166 | 79,57571 |
| 6 | 39,85166 | 199,57571 |
| 6 | 39,85166 | 319,57571 |
| 7 | 46,35470 | 77,09658 |
| 7 | 46,35470 | 167,09658 |
| 7 | 46,35470 | 257,09658 |
| 7 | 46,35470 | 347,09658 |
| 8 | 53,06349 | 60,00694 |
| 8 | 53,06349 | 150,00694 |
| 8 | 53,06349 | 240,00694 |
| 8 | 53,06349 | 330,00694 |
| 9 | 59,21644 | 18,07858 |
| 9 | 59,21644 | 108,07858 |
| 9 | 59,21644 | 198,07858 |
| 9 | 59,21644 | 288,07858 |
| 10 | 64,99288 | 70,34986 |
| 10 | 64,99288 | 160,34986 |
| 10 | 64,99288 | 250,34986 |
| 10 | 64,99288 | 340,34986 |
| 11 | 71,16894 | 51,41524 |
| 11 | 71,16894 | 123,41524 |
| 11 | 71,16894 | 195,41524 |
| 11 | 71,16894 | 267,41524 |
| 11 | 71,16894 | 339,41524 |
| 12 | 77,79249 | 18,14822 |
| 12 | 77,79249 | 90,14822 |
| 12 | 77,79249 | 162,14822 |
| 12 | 77,79249 | 234,14822 |
| 12 | 77,79249 | 306,14822 |
| 13 | 84,25183 | 46,04561 |
| 13 | 84,25183 | 118,04561 |
| 13 | 84,25183 | 190,04561 |
| 13 | 84,25183 | 262,04561 |
| 13 | 84,25183 | 334,04561 |
| 14 | 90,00000 | 17,53397 |
| 14 | 90,00000 | 107,53397 |
| 14 | 90,00000 | 197,53397 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 14 | 90,00000 | 287,53397 |
| 15 | 95,74817 | 69,76161 |
| 15 | 95,74817 | 141,76161 |
| 15 | 95,74817 | 213,76161 |
| 15 | 95,74817 | 285,76161 |
| 15 | 95,74817 | 357,76161 |
| 16 | 102,20751 | 52,24406 |
| 16 | 102,20751 | 124,24407 |
| 16 | 102,20751 | 196,24407 |
| 16 | 102,20751 | 268,24406 |
| 16 | 102,20751 | 340,24406 |
| 17 | 108,83106 | 54,47169 |
| 17 | 108,83106 | 126,47169 |
| 17 | 108,83106 | 198,47169 |
| 17 | 108,83106 | 270,47169 |
| 17 | 108,83106 | 342,47169 |
| 18 | 115,00712 | 74,72793 |
| 18 | 115,00712 | 164,72793 |
| 18 | 115,00712 | 254,72793 |
| 18 | 115,00712 | 344,72793 |
| 19 | 120,78356 | 20,85302 |
| 19 | 120,78356 | 110,85302 |
| 19 | 120,78356 | 200,85302 |
| 19 | 120,78356 | 290,85302 |
| 20 | 126,93651 | 51,58520 |
| 20 | 126,93651 | 141,58520 |
| 20 | 126,93651 | 231,58520 |
| 20 | 126,93651 | 321,58520 |
| 21 | 133,64530 | 28,53120 |
| 21 | 133,64530 | 118,53120 |
| 21 | 133,64530 | 208,53120 |
| 21 | 133,64530 | 298,53120 |
| 22 | 140,14834 | 50,37307 |
| 22 | 140,14834 | 170,37307 |
| 22 | 140,14834 | 290,37307 |
| 23 | 146,60183 | 60,26119 |
| 23 | 146,60183 | 180,26119 |
| 23 | 146,60183 | 300,26119 |
| 24 | 152,86646 | 125,19809 |
| 24 | 152,86646 | 305,19809 |
| 25 | 159,25657 | 57,14440 |
| 25 | 159,25657 | 237,14441 |
| 26 | 165,37615 | 133,27561 |
| 27 | 180,00000 | 0,00000 |

Optimizacija na radijusu 52,9 cm rađena je do maksimalnog broja elementarnih antena 170 stoga što pri većem broju antena minimalna distanca antenskih elemenata pada ispod minimalne vrijednosti od $0,4 \lambda$, a to je bio uvjet očuvanja stanja sa zanemarivom spregom između antenskih elemenata.

Tablica 5.2. Pozicijski kutjevi elementarnih antena Leopardi konfiguracije za sferu radijusa $r_s=52,9$ cm i 145 antena.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 14,32426 | 74,51596 |
| 2 | 14,32426 | 194,51596 |
| 2 | 14,32426 | 314,51596 |
| 3 | 23,14564 | 77,53332 |
| 3 | 23,14564 | 167,53332 |
| 3 | 23,14564 | 257,53332 |
| 3 | 23,14564 | 347,53332 |
| 4 | 31,00808 | 40,75190 |
| 4 | 31,00808 | 112,75190 |
| 4 | 31,00808 | 184,75190 |
| 4 | 31,00808 | 256,75190 |
| 4 | 31,00808 | 328,75190 |
| 5 | 39,22446 | 24,79325 |
| 5 | 39,22446 | 76,22182 |
| 5 | 39,22446 | 127,65039 |
| 5 | 39,22446 | 179,07896 |
| 5 | 39,22446 | 230,50753 |
| 5 | 39,22446 | 281,93611 |
| 5 | 39,22446 | 333,36468 |
| 6 | 47,86927 | 39,02996 |
| 6 | 47,86927 | 84,02996 |
| 6 | 47,86927 | 129,02996 |
| 6 | 47,86927 | 174,02996 |
| 6 | 47,86927 | 219,02996 |
| 6 | 47,86927 | 264,02995 |
| 6 | 47,86927 | 309,02995 |
| 6 | 47,86927 | 354,02995 |
| 7 | 56,40890 | 31,87197 |
| 7 | 56,40890 | 71,87197 |
| 7 | 56,40890 | 111,87197 |
| 7 | 56,40890 | 151,87197 |
| 7 | 56,40890 | 191,87197 |
| 7 | 56,40890 | 231,87197 |
| 7 | 56,40890 | 271,87197 |
| 7 | 56,40890 | 311,87197 |
| 7 | 56,40890 | 351,87197 |
| 8 | 64,62133 | 12,80558 |
| 8 | 64,62133 | 52,80558 |
| 8 | 64,62133 | 92,80558 |
| 8 | 64,62133 | 132,80558 |
| 8 | 64,62133 | 172,80558 |
| 8 | 64,62133 | 212,80558 |
| 8 | 64,62133 | 252,80558 |
| 8 | 64,62133 | 292,80558 |
| 8 | 64,62133 | 332,80558 |
| 9 | 73,10793 | 22,16992 |
| 9 | 73,10793 | 54,89720 |
| 9 | 73,10793 | 87,62447 |
| 9 | 73,10793 | 120,35174 |
| 9 | 73,10793 | 153,07901 |
| 9 | 73,10793 | 185,80629 |
| 9 | 73,10793 | 218,53356 |
| 9 | 73,10793 | 251,26083 |
| 9 | 73,10793 | 283,98810 |
| 9 | 73,10793 | 316,71538 |
| 9 | 73,10793 | 349,44265 |
| 10 | 81,65226 | 12,50109 |
| 10 | 81,65226 | 48,50109 |
| 10 | 81,65226 | 84,50109 |
| 10 | 81,65226 | 120,50109 |
| 10 | 81,65226 | 156,50109 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 10 | 81,65226 | 192,50109 |
| 10 | 81,65226 | 228,50109 |
| 10 | 81,65226 | 264,50109 |
| 10 | 81,65226 | 300,50109 |
| 10 | 81,65226 | 336,50109 |
| 11 | 90,00000 | 23,12685 |
| 11 | 90,00000 | 55,85412 |
| 11 | 90,00000 | 88,58139 |
| 11 | 90,00000 | 121,30867 |
| 11 | 90,00000 | 154,03594 |
| 11 | 90,00000 | 186,76321 |
| 11 | 90,00000 | 219,49048 |
| 11 | 90,00000 | 252,21776 |
| 11 | 90,00000 | 284,94503 |
| 11 | 90,00000 | 317,67230 |
| 11 | 90,00000 | 350,39958 |
| 12 | 98,34774 | 24,44174 |
| 12 | 98,34774 | 60,44174 |
| 12 | 98,34774 | 96,44174 |
| 12 | 98,34774 | 132,44174 |
| 12 | 98,34774 | 168,44174 |
| 12 | 98,34774 | 204,44174 |
| 12 | 98,34774 | 240,44174 |
| 12 | 98,34774 | 276,44174 |
| 12 | 98,34774 | 312,44174 |
| 12 | 98,34774 | 348,44174 |
| 13 | 106,89207 | 10,81370 |
| 13 | 106,89207 | 43,54097 |
| 13 | 106,89207 | 76,26824 |
| 13 | 106,89207 | 108,99552 |
| 13 | 106,89207 | 141,72279 |
| 13 | 106,89207 | 174,45006 |
| 13 | 106,89207 | 207,17733 |
| 13 | 106,89207 | 239,90461 |
| 13 | 106,89207 | 272,63188 |
| 13 | 106,89207 | 305,35915 |
| 13 | 106,89207 | 338,08643 |
| 14 | 115,37867 | 28,64139 |
| 14 | 115,37867 | 68,64139 |
| 14 | 115,37867 | 108,64139 |
| 14 | 115,37867 | 148,64139 |
| 14 | 115,37867 | 188,64139 |
| 14 | 115,37867 | 228,64139 |
| 14 | 115,37867 | 268,64139 |
| 14 | 115,37867 | 308,64139 |
| 14 | 115,37867 | 348,64139 |
| 15 | 123,59110 | 27,20847 |
| 15 | 123,59110 | 67,20847 |
| 15 | 123,59110 | 107,20847 |
| 15 | 123,59110 | 147,20847 |
| 15 | 123,59110 | 187,20847 |
| 15 | 123,59110 | 227,20847 |
| 15 | 123,59110 | 267,20847 |
| 15 | 123,59110 | 307,20847 |
| 15 | 123,59110 | 347,20847 |
| 16 | 132,13073 | 42,54395 |
| 16 | 132,13073 | 87,54395 |
| 16 | 132,13073 | 132,54395 |
| 16 | 132,13073 | 177,54395 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 16 | 132,13073 | 222,54395 |
| 16 | 132,13073 | 267,54395 |
| 16 | 132,13073 | 312,54395 |
| 16 | 132,13073 | 357,54395 |
| 17 | 140,77554 | 22,89754 |
| 17 | 140,77554 | 74,32611 |
| 17 | 140,77554 | 125,75468 |
| 17 | 140,77554 | 177,18325 |
| 17 | 140,77554 | 228,61182 |
| 17 | 140,77554 | 280,04040 |
| 17 | 140,77554 | 331,46897 |
| 18 | 148,99192 | 46,10521 |
| 18 | 148,99192 | 118,10521 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 18 | 148,99192 | 190,10521 |
| 18 | 148,99192 | 262,10521 |
| 18 | 148,99192 | 334,10521 |
| 19 | 156,85436 | 47,83055 |
| 19 | 156,85436 | 137,83055 |
| 19 | 156,85436 | 227,83055 |
| 19 | 156,85436 | 317,83055 |
| 20 | 165,67574 | 34,21193 |
| 20 | 165,67574 | 154,21193 |
| 20 | 165,67574 | 274,21193 |
| 21 | 180,00000 | 0,00000 |

5.3.2. Utjecaj promjene rasporeda elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Poznavanje broja elementarnih antena na sferi određenog rasporeda (kojim se postiže najveća vrijednost ciljne funkcije) omogućuje dalje ispitivanje utjecaja promjene pojedinih parametara (geometrijskih ili pobudnih) s ciljem dodatnog povećanja izosa ciljne funkcije. Idući korak je istražiti ponašanje ciljne funkcije ako se elementi na različite načine grupiraju. Ovo grupiranje je izvedeno korištenjem nekoliko funkcija kojima se definira položaj prstenova sa elementarnim antenama, jednako kao kod ikosaedarske i spiralne konfiguracije.

U ovom slučaju, pri crtanju dijagrama na slikama 5.29. i 5.30. upotrebljava se prilagođeni k' parametar kako bi krivulje bile usporedive.

Na tri se načina mijenja položaj antena, i to tako da se na osnovnu poziciju elemenata superponira eksponencijalna, linearna ili obrnuto eksponencijalna promjena položaja, s tim da se zadovolji minimalna udaljenost dva elementa koja ne smije pasti ispod $0,4\lambda$, kao i selekcijski kut od 90° .

Za sferu radijusa 30 cm funkcijska ovisnost položaja prstenova sa elementarnim antenama definirana je slijedećim funkcijama:

a) eksponencijalna promjena položaja

$$\alpha_{dod} = \frac{k}{160} \cdot \exp\left(\left(\frac{-k}{40}\right) \cdot \left(\frac{b \cdot 60,5}{1000}\right)\right), \quad (5-24)$$

gdje je:

$$b \in [\text{broj prstenova}:0] \text{ ili } [25:0] \text{ za } r_s=30 \text{ cm};$$

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-7:9]$;

b) linearna promjena položaja

$$\alpha_{dod} = 1 - \left(\frac{k}{12}\right) \cdot b \cdot \frac{0,3}{50}, \quad (5-25)$$

gdje je:

$b \in [\text{broj prstenova:0}]$ ili $[25:0]$ za $r_s=30$ cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [0:16]$;

c) obrnuto eksponencijalna promjena položaja

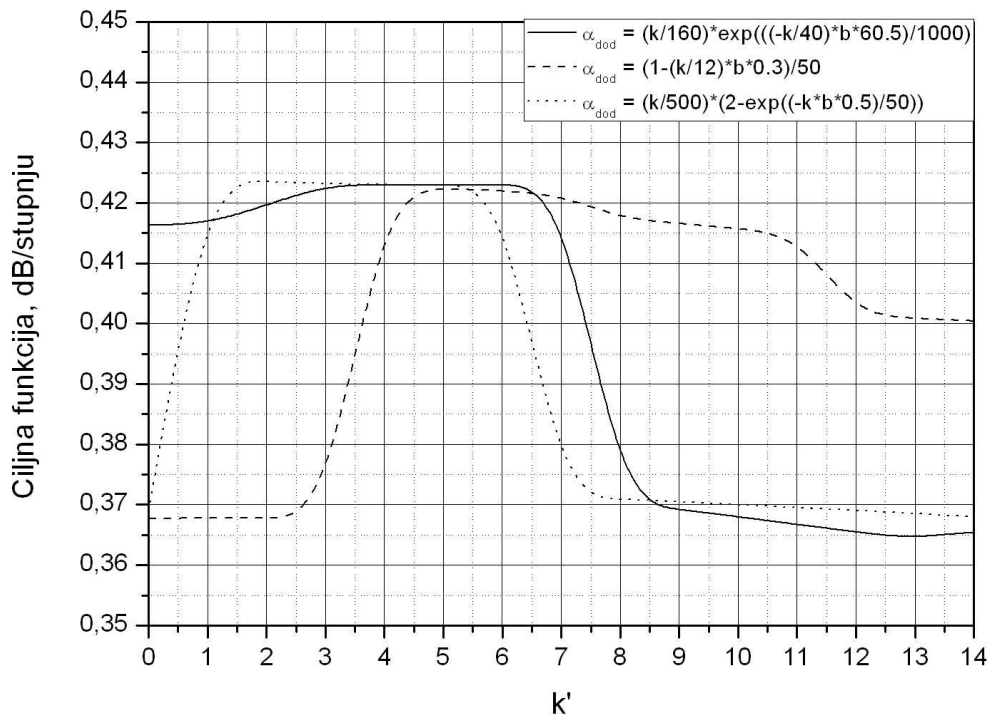
$$\alpha_{dod} = \left(\frac{k}{500}\right) \cdot \left[2 - \exp\left(\frac{-k \cdot b \cdot 0,5}{50}\right)\right], \quad (5-26)$$

gdje je:

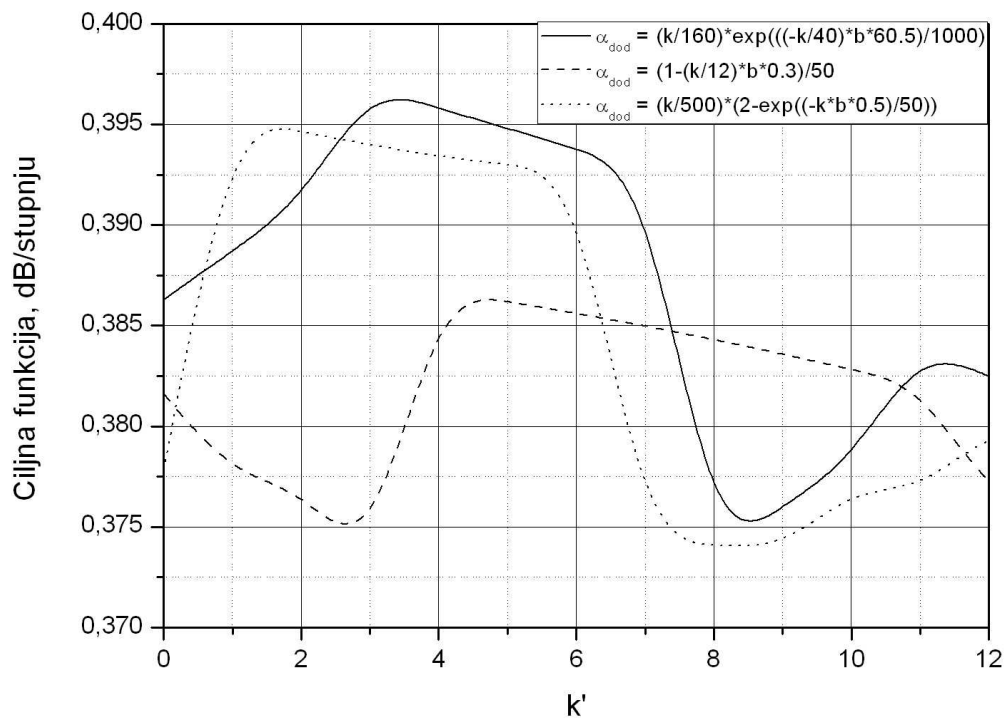
$b \in [\text{broj prstenova:0}]$ ili $[25:0]$ za $r_s=30$ cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-6:8]$.

Slike 5.29. a) i b) pokazuju ciljnu funkciju CF_1 za sferu radijusa 30 cm u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' koji definira položaj elementarnih antena.



a)



b)

Slika 5.29. Promjena ciljne funkcije CF_1 u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' :

a) E – ravnina, b) H – ravnina ($r_s = 30$ cm).

U E ravnini je postignuta nešto veća vrijednost ciljne funkcije, i za obrnuto eksponencijalnu promjenu gustoće elemenata iznosi 0,424 dB/stupnju pri $k' = 1,5$. U H – ravnini, ciljna funkcija je najveća i pri eksponencijalnoj promjeni gustoće iznosi 0,397 dB/stupnju za $k' = 3$.

U svakom slučaju, postiglo se da je ciljna funkcija veća od početne kada je optimizacija izvedena samo po broju i položaju antena.

Za sferu radijusa 52,9 cm funkcijska ovisnost položaja prstenova sa elementarnim antenama definirana je slijedećim funkcijama:

a) eksponencijalna promjena položaja

$$\alpha_{dod} = \frac{k}{320} \cdot \exp\left(\left(\frac{-k}{360}\right) \cdot \left(\frac{b \cdot 60,5}{10}\right)\right), \quad (5-27)$$

gdje je:

$b \in$ [broj prstenova:0] ili [19:0] za $r_s=52,9$ cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-4:10]$;

b) linearna promjena položaja

$$\alpha_{dod} = \frac{1 - \frac{k}{12} \cdot b \cdot 0,3}{100}, \quad (5-28)$$

gdje je:

$b \in [\text{broj prstenova:0}]$ ili $[19:0]$ za $r_s=52,9$ cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [1:12]$;

c) obrnuto eksponencijalna promjena položaja

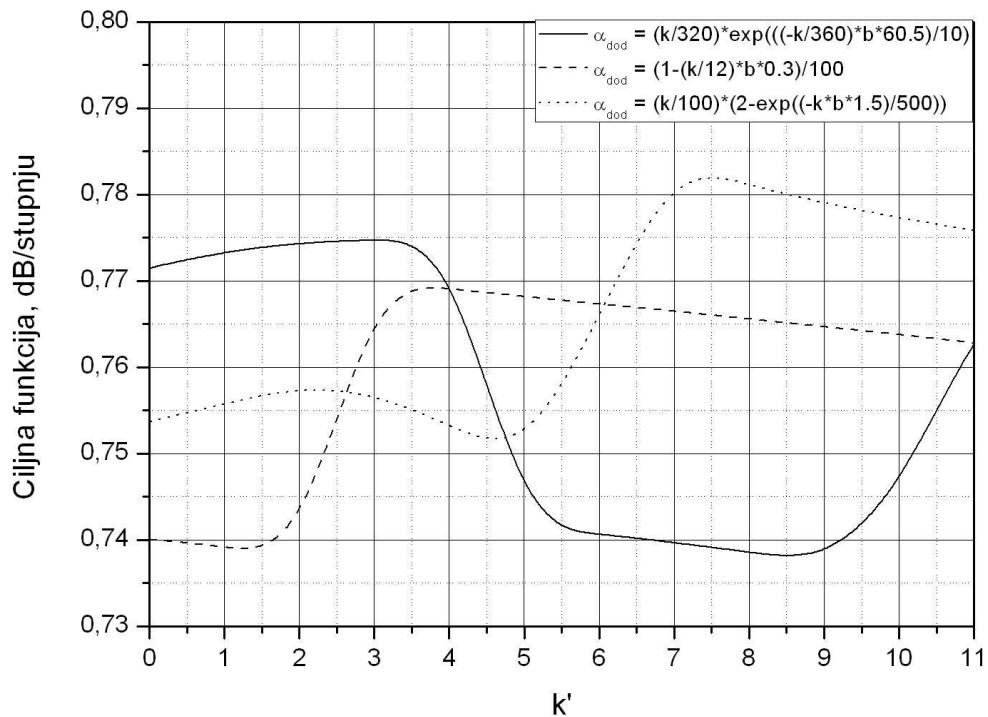
$$\alpha_{dod} = \frac{k}{100} \cdot \left[2 - \exp\left(\frac{-k \cdot b \cdot 1,5}{500}\right) \right], \quad (5-29)$$

gdje je:

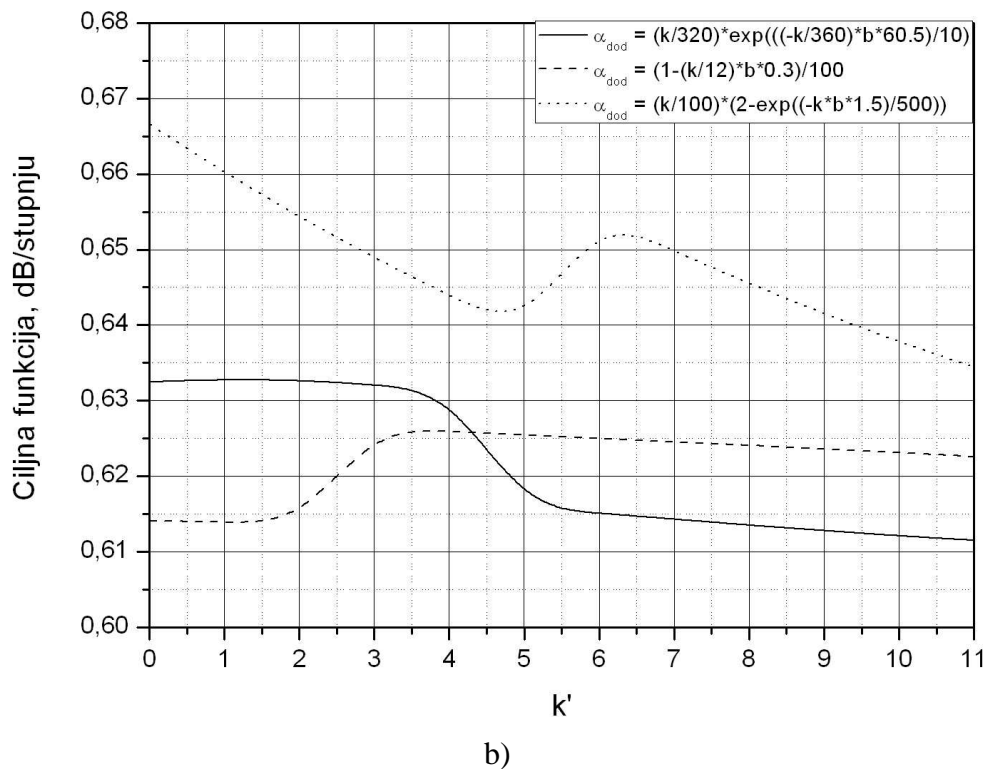
$b \in [\text{broj prstenova:0}]$ ili $[19:0]$ za $r_s=52,9$ cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in [-12:0]$.

Slike 5.30 a) i b) pokazuju ciljnu funkciju u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' kojim se mijenja položaj antena ($r_s=52,9$ cm).



a)



Slika 5.30. Promjena ciljne funkcije CF_1 u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' :

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

U E ravnini, pri $k' = 7$ i obrnuto eksponencijalnoj promjeni gustoće elemenata, postiže se maksimalna vrijednost ciljne funkcije od 0,784 dB/stupnju. U H ravnini, također pri eksponencijalnoj promjeni gustoće, ali za $k' = 0$, ciljna funkcija je maksimalna (0,667 dB/stupnju).

5.3.3. Utjecaj promjene amplitude na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Promjenom amplitude započinje se istraživanje promjene dijagrama zračenja ako se mijenjaju parametri pobude. Amplituda pobude se mijenja tako da se antenskim elementima na jednakoj elevacijskoj poziciji mijenja amplituda pobude prema eksponencijalnoj, linearnoj i obrnuto eksponencijalnoj funkciji.

Za sferu radijusa 30 cm funkcijska ovisnost amplitude pobude elementarnih antena definirana je sljedećim funkcijama:

a) eksponencijalna promjena amplitude pobude

$$AMP = 2 \cdot \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0,001) \quad (5-30)$$

gdje je:

α – elevacijska pozicija antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu [-40:60];

b) linearna promjena amplitude pobude

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0,001 \quad (5-31)$$

gdje je:

α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $k \in [-6:16]$;

c) obrnuto eksponencijalna promjena amplitude pobude

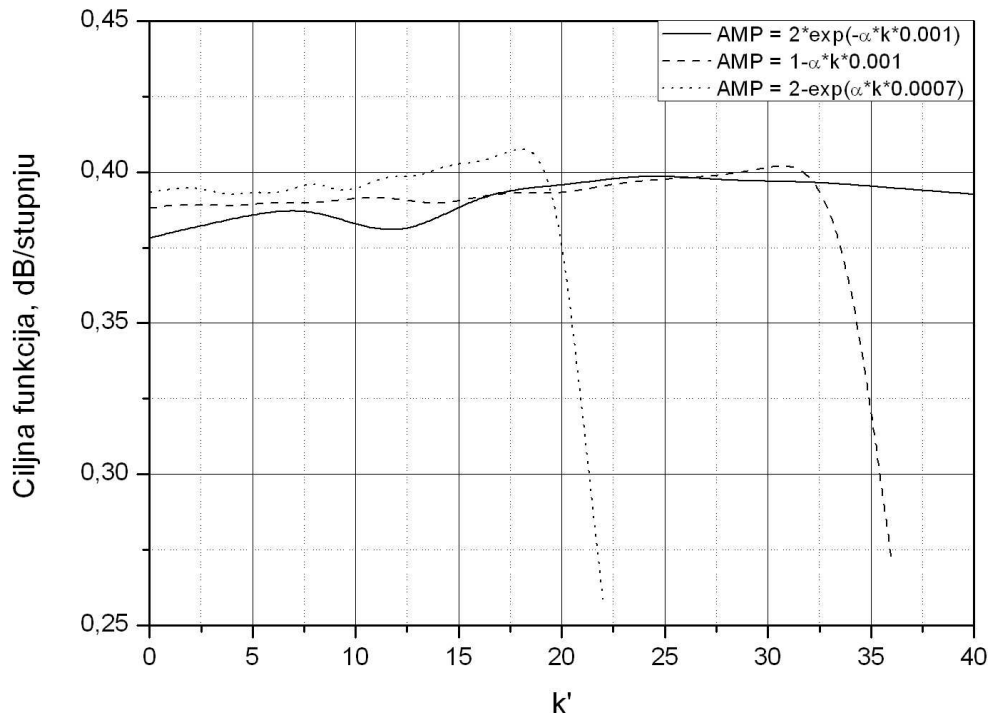
$$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0,0007) \quad (5-32)$$

gdje je:

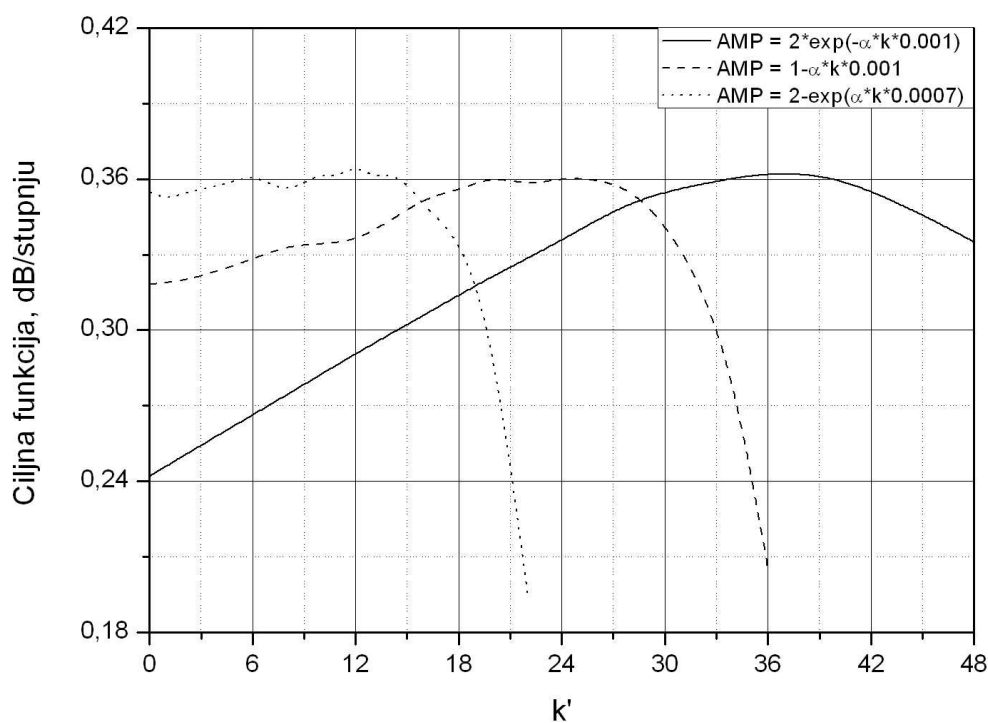
α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $k \in [-20:16]$.

Nadalje, početna konfiguracija elemenata se ne mijenja i obuhvaća 33 antenska elementa.



a)



b)

Slika 5.31. Utjecaj promjene amplitude pobude na ciljnu funkciju CF_1 :

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.

Iz slike 5.31. je vidljivo da ciljna funkcija CF_1 ima svoj maksimum za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude i doseže 0,408 dB/stupnju uz $k' = 18$ (E - ravnina), i veća je od početne vrijednosti ciljne funkcije postignute u dijelu 5.3.1.

U H ravnini, najveća je vrijednost 0,366 dB/stupnju za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude i pri koeficijentu $k' = 12$.

Za sferu radijusa 52,9 cm funkcijska ovisnost amplitude pobude elementarnih antena definirana je slijedećim funkcijama:

a) eksponencijalna promjena amplitude pobude

$$AMP = \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0,01) \quad (5-33)$$

gdje je:

α – elevacijska pozicija antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $[-2;9]$;

b) linearna promjena amplitude pobude

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0,001 \quad (5-34)$$

gdje je:

α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $k \in [-10;10]$;

c) obrnuto eksponencijalna promjena amplitude pobude

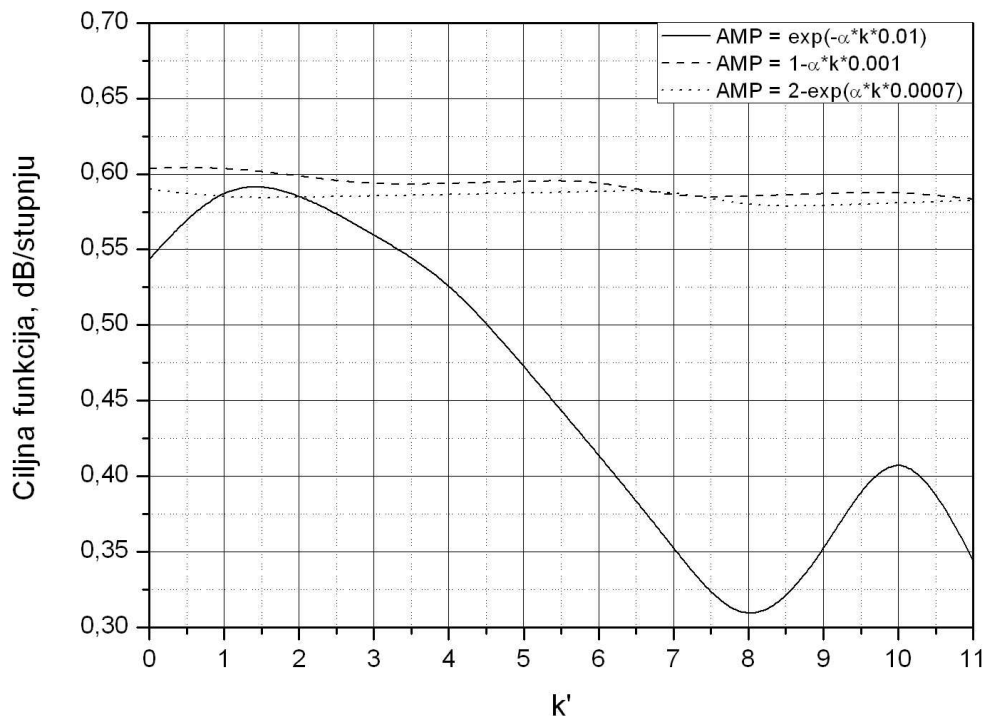
$$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0,0007) \quad (5-35)$$

gdje je:

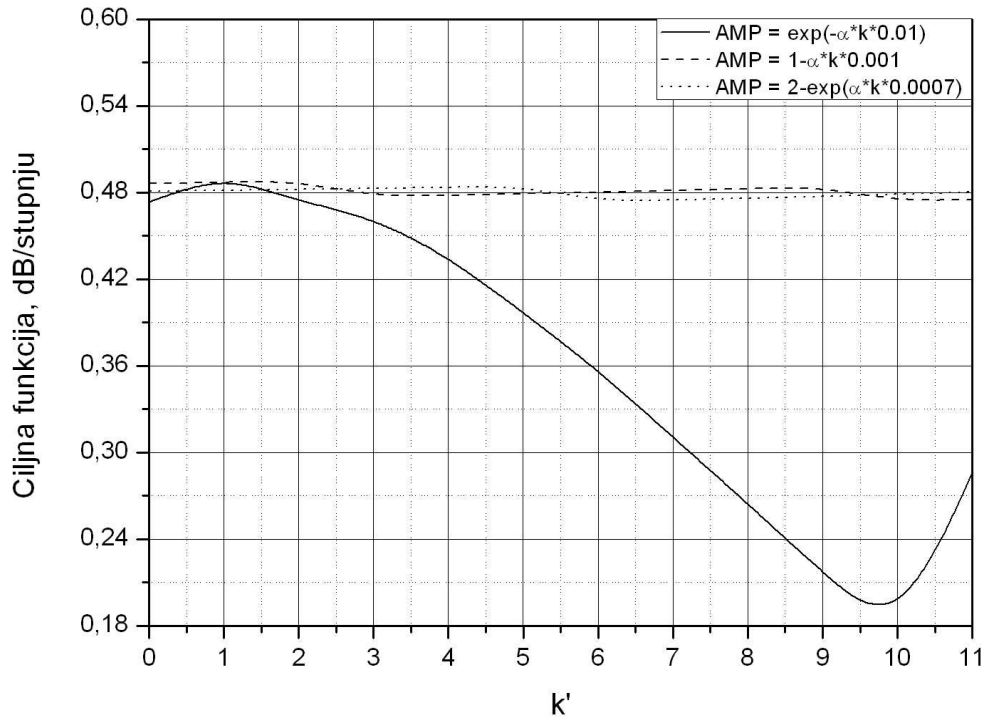
α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $k \in [-6;16]$.

U E ravnini, maksimum ciljane funkcije CF_1 je na $k' = 1$, uz linearnu promjenu amplitude pobude i iznosi 0,605 dB/stupnju. U H ravnini, pri eksponencijalnoj promjeni amplitude i $k' = 1$, ciljna funkcija je 0,493 dB/stupnju.



a)



b)

Slika 5.32. Utjecaj promjene amplitude pobude na ciljnu funkciju – CF₁:

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

5.3.4. Utjecaj promjene polarizacije na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Polarizacija pobude, u istraživanju utjecaja polarizacije na dijagram zračenja antenskog niza na sferi, se mijenja tako da se antenskim elementima na jednakoj elevacijskoj poziciji mijenja polarizacija pobude prema eksponencijalnoj, linearnoj i obrnuto eksponencijalnoj funkciji.

a) eksponencijalna promjena amplitude pobude

$$\phi = a + \exp(k \cdot |b - c| \cdot 0,01) \quad (5-36)$$

b) linearna promjena amplitude pobude

$$\phi = a + k \cdot |b - c| \cdot 0,01 \quad (5-37)$$

c) obrnuto eksponencijalna promjena amplitude pobude

$$\phi = a - 0,5 \cdot \exp(k \cdot |b - c| \cdot 0,01) \quad (5-38)$$

gdje je:

α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

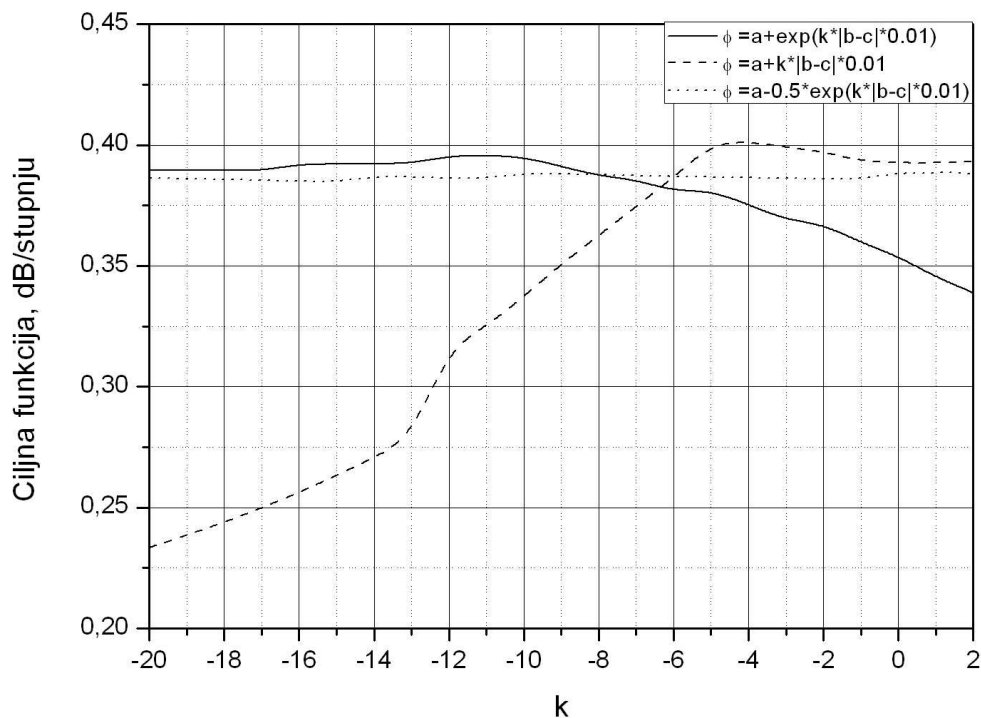
k - koeficijent po kojemu se mijenja polarizacija i kreće se u intervalu $k \in [-20:2]$ za $r_s = 30$ cm te $k \in [-13:3]$ za $r_s = 52,9$ cm;

b – redni broj elementa, $b \in [c:0]$;

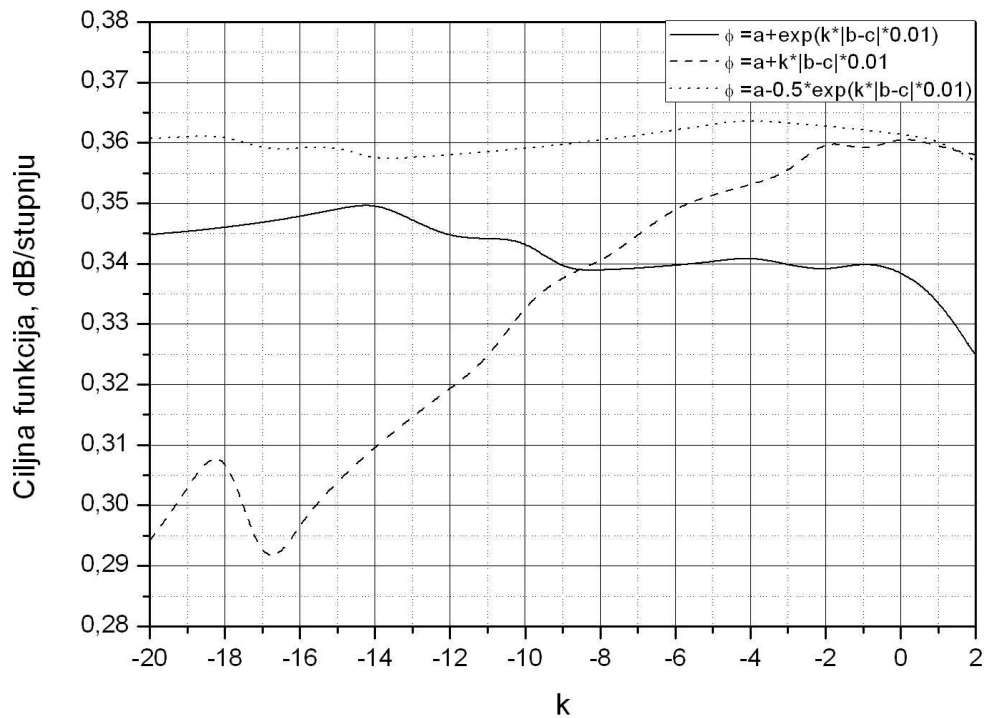
c – ukupni broj pojaseva na koje je podijeljena sfera.

Polarizacija se mijenja po elevacijskom kutu položaja antenskog elementa na sferi po monotono opadajućoj funkciji danim prethodnim izrazima.

Slike 5.33. a) i b) prikazuju promjenu polarizacije za sferu radijusa 30 cm. Ciljna funkcija CF_1 postiže svoj maksimum za linearnu promjenu od 0,401 dB/stupnju pri $k = -4$ u E - ravni. U H – ravni maksimum je postignut za obrnuto eksponencijalnu promjenu i iznosi 0,364 dB/stupnju za $k = -4$.



a)

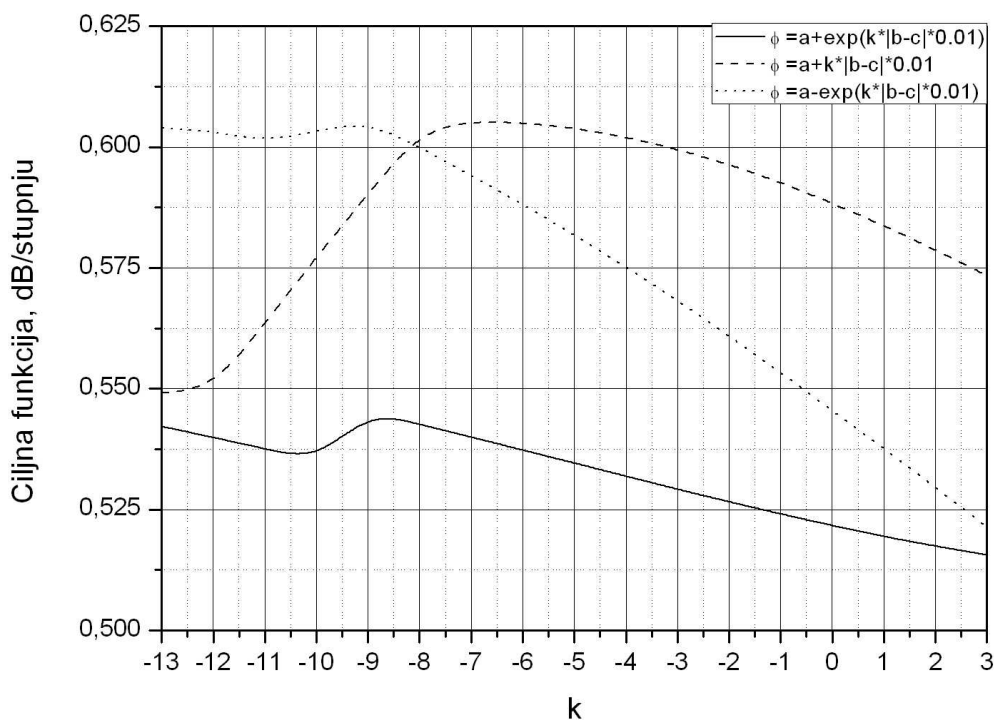


b)

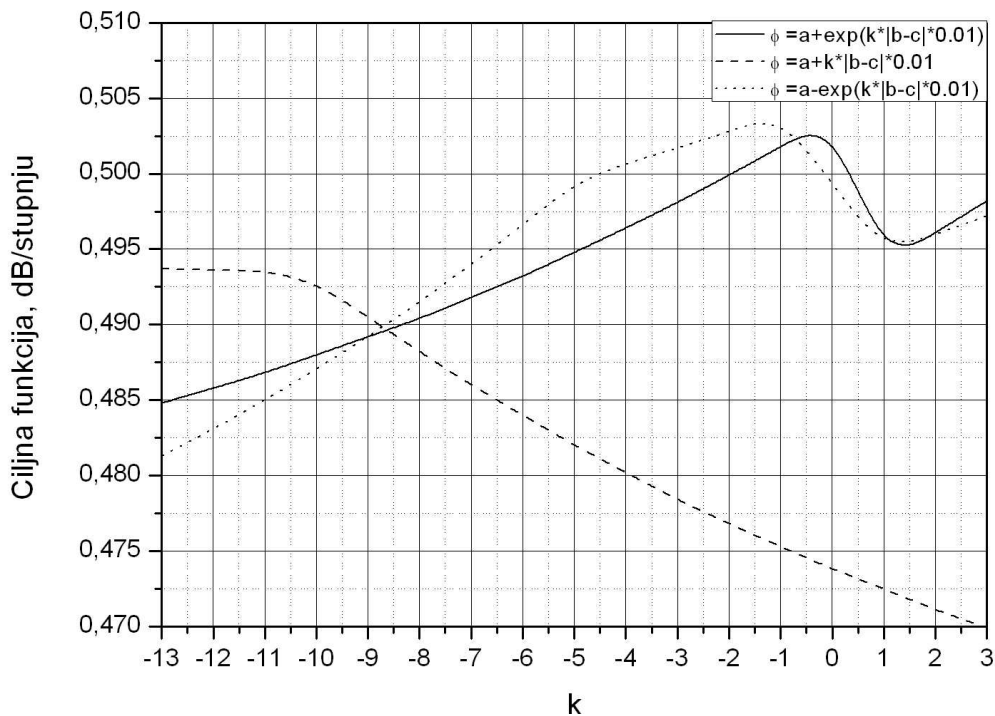
Slika 5.33. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta k :

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.

Slike 5.34. a) i b) prikazuju promjenu vrijednosti ciljne funkcije CF_1 za promjenu polarizacije pobude za sferu radijusa 52,9 cm.



a)



b)

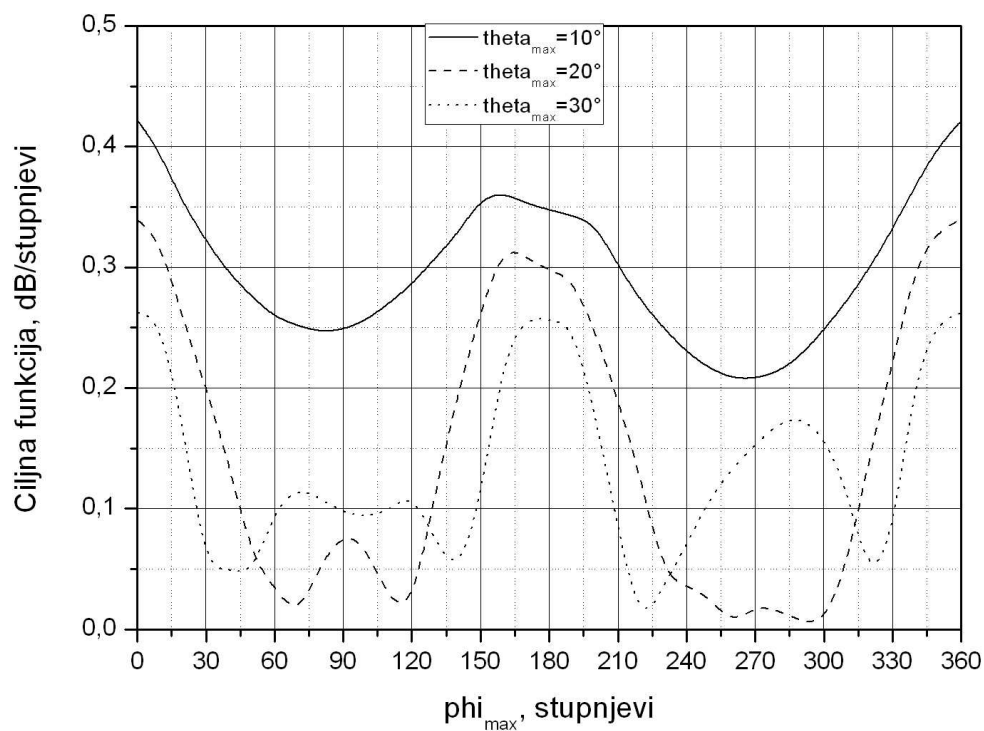
Slika 5.34. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta k :

a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

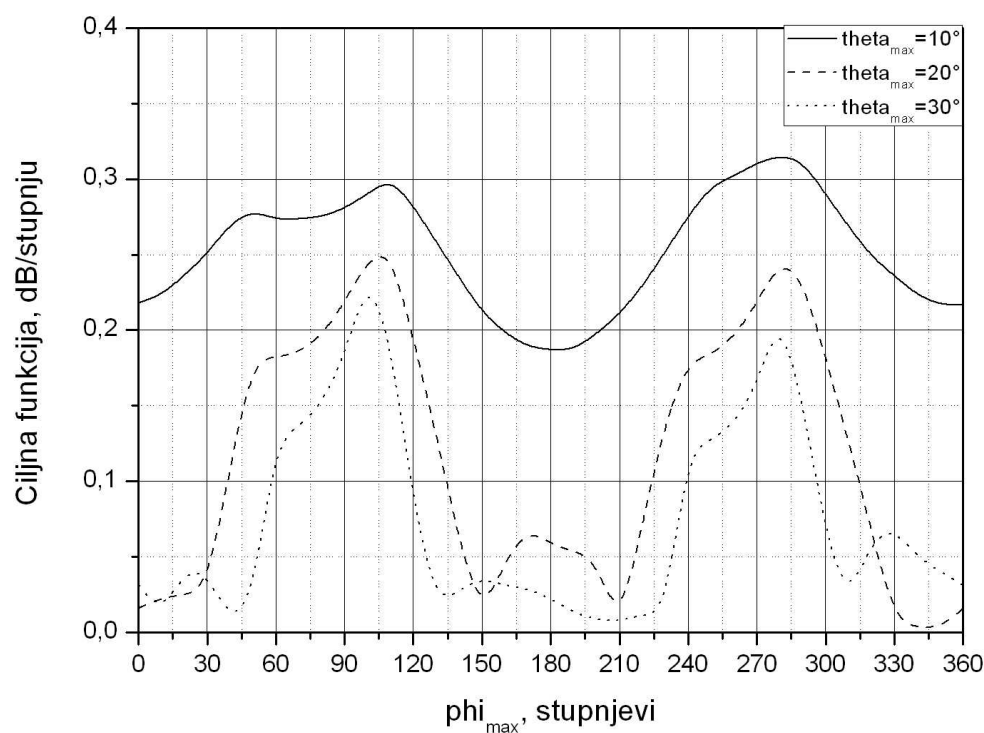
U E ravnini, za dvije funkcije promjene polarizacije, linearna, i obrnuto eksponencijalna, ciljna funkcija CF_1 ima maksimalnu vrijednost od 0,605 dB/stupnju za $k = -7$ i $k = -9$ pojedinačno. U H ravnini, obrnuto eksponencijalna promjena polarizacije pobude daje najveću vrijednost ciljne funkcije CF_1 iznosa 0,504 dB/stupnju za $k = -1$.

5.3.5. Utjecaj promjene kuteva maksimalnog zračenja na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

U ovom će se poglavlju obraditi utjecaj posljednjeg parametra pobude – promjena kuta maksimalnog zračenja na promjenu ciljne funkcije. U prvom slučaju mijenja se azimutalni, a zatim elevacijski kut smjera maksimalnog zračenja. Izračun je izveden za E i H ravninu (ciljne funkcije CF_1).

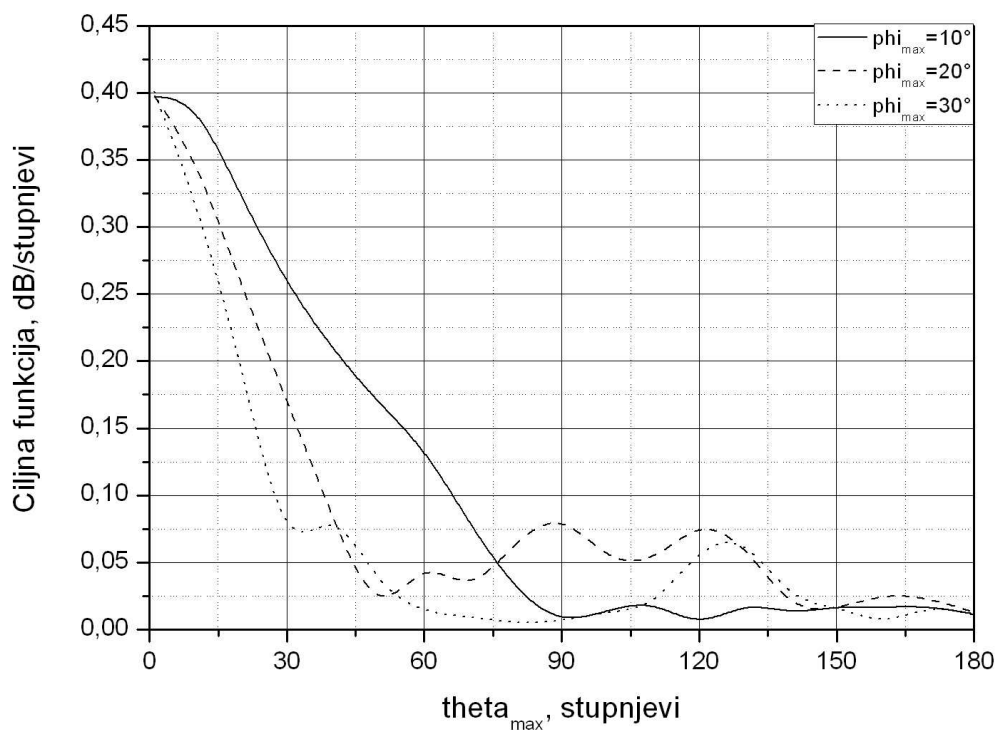


a)

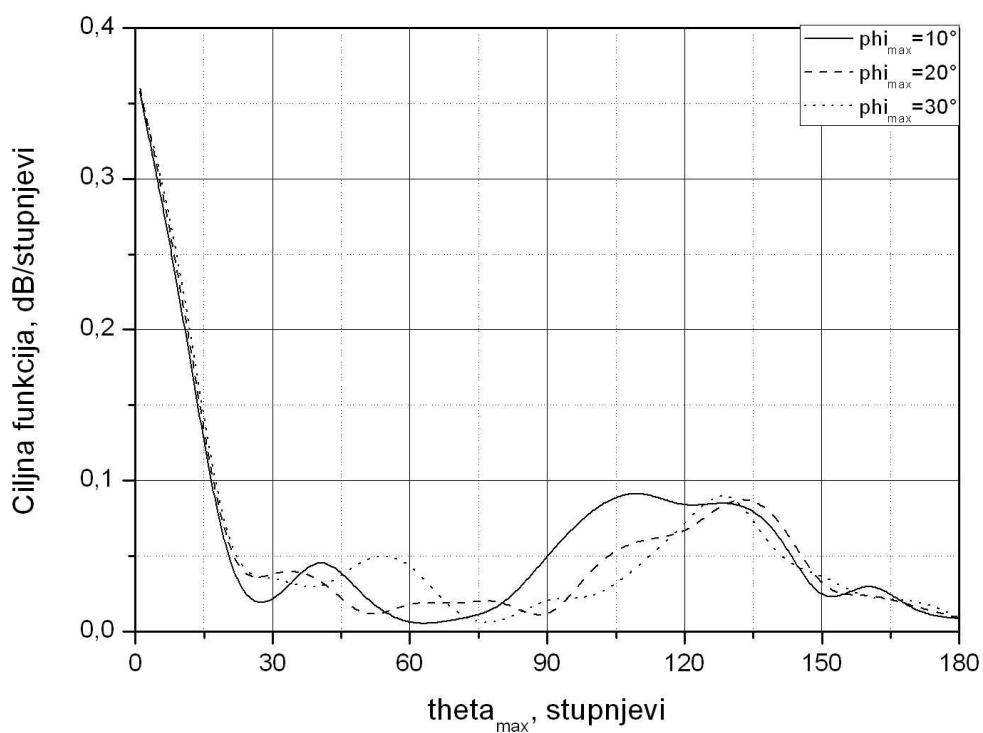


b)

Slika 5.35. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja ϕ_{\max} na promjenu ciljne funkcije, a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.



a)



b)

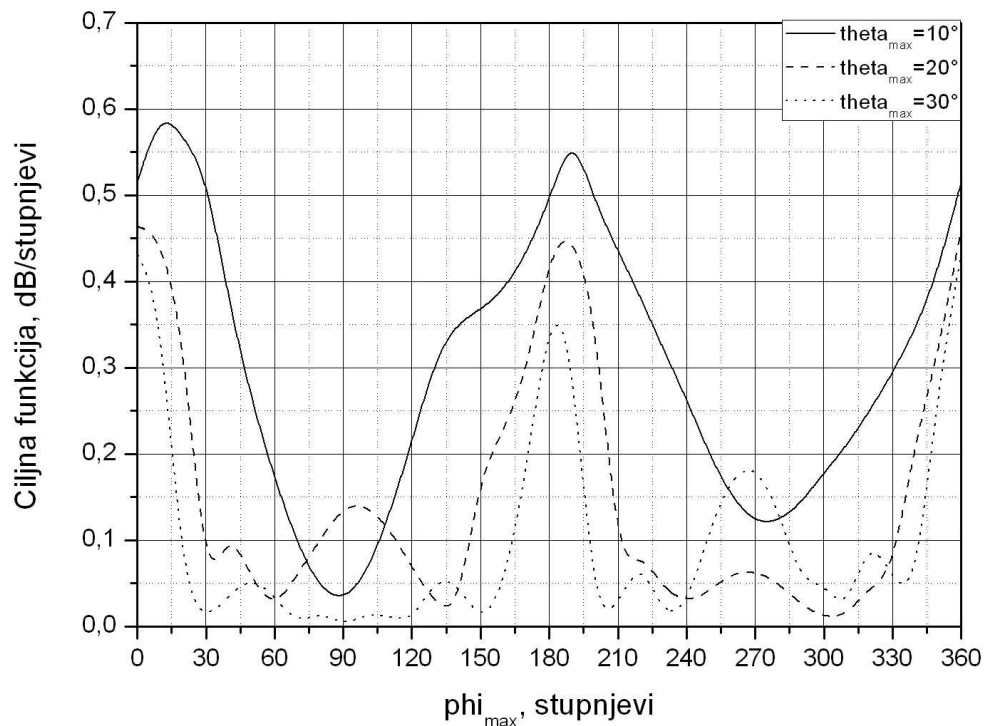
Slika 5.36. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja θ_{\max} na promjenu ciljne funkcije, a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm.

Gornje slike (slike 5.35. i 5.36) pokazuju očekivane rezultate, slične kao i u slučajevima prethodnih konfiguracija.

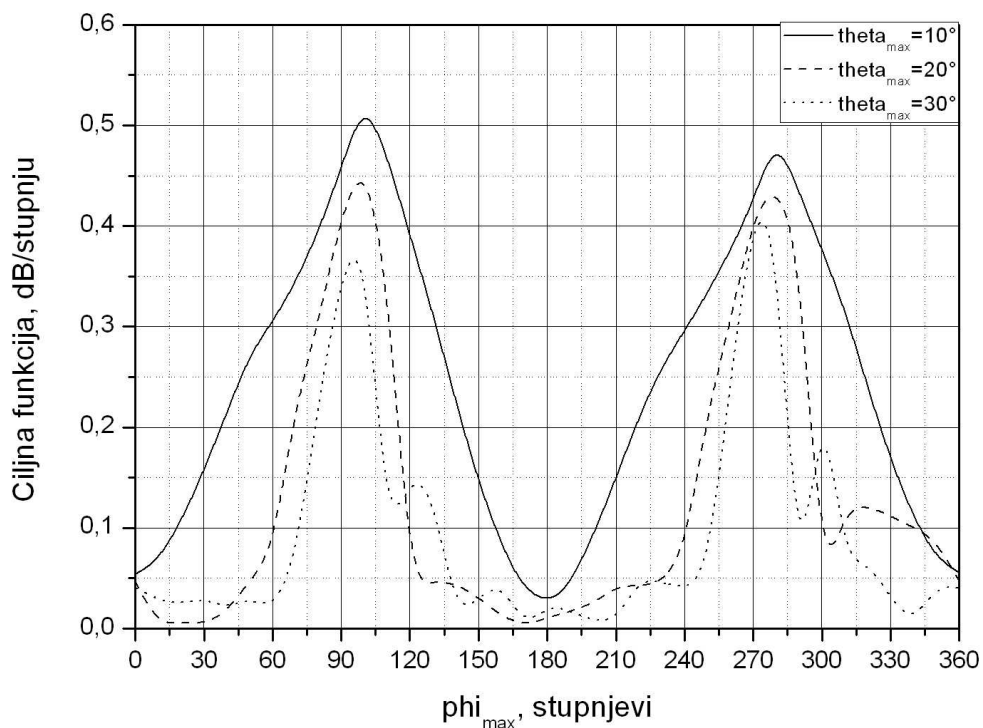
Istraživanje provedeno na sferi radijusa 30 cm daje sljedeće rezultate:

- ϕ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,4222 dB/stupnju ($\phi_{\max}=0^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,3618 dB/stupnju ($\phi_{\max}=160^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- ϕ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,3007 dB/stupnju ($\phi_{\max}=110^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,3154 dB/stupnju ($\phi_{\max}=280^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,4013 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=30^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,3598 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=20^\circ$).

Rezultati izračuna, za sferu radijusa 52,9 cm prikazani su na slikama 5.37. i 5.38.

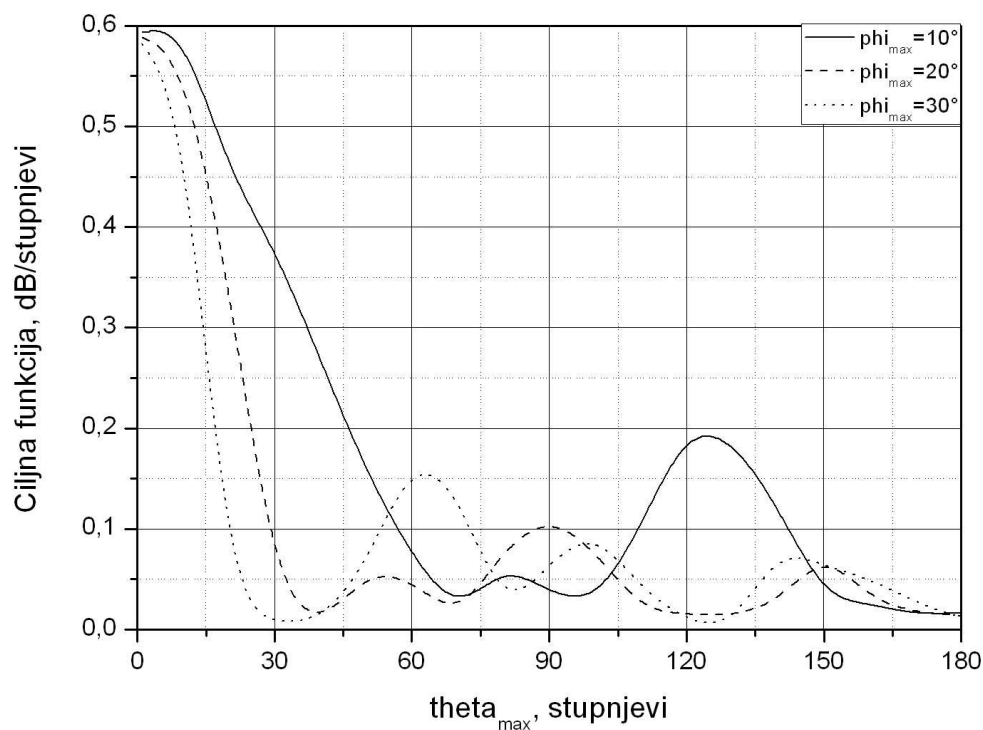


a)

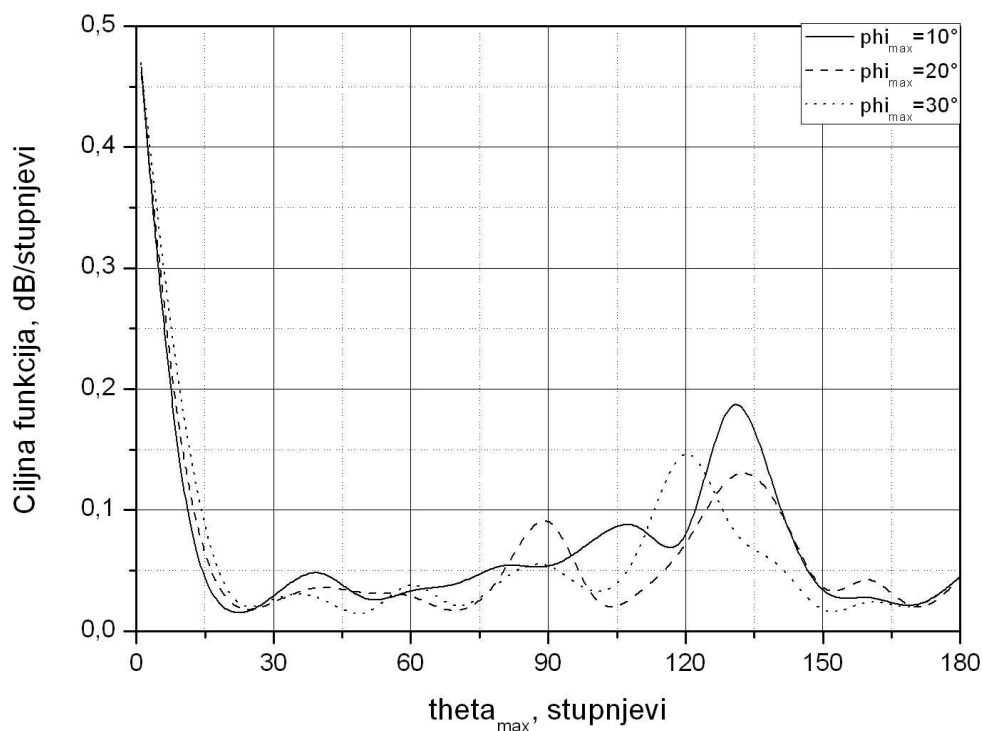


b)

Slika 5.37. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja ϕ_{\max} na promjenu ciljne funkcije CF_1 , a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.



a)



b)

Slika 5.38. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja θ_{\max} na promjenu ciljne funkcije CF_1 : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm.

Ispitivanje provedeno na sferi radijusa 52,9 cm daje sljedeće rezultate:

- ϕ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,5986 dB/stupnju ($\phi_{\max}=10^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,575 dB/stupnju ($\phi_{\max}=90^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- ϕ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,5279 dB/stupnju ($\phi_{\max}=100^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$) i 0,4911 dB/stupnju ($\phi_{\max}=280^\circ$, $\theta_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, E – ravnina \rightarrow 0,5986 dB/stupnju ($\theta_{\max}=10^\circ$, $\phi_{\max}=10^\circ$);
- θ_{\max} promjenjiv, H – ravnina \rightarrow 0,4697 dB/stupnju ($\theta_{\max}=0^\circ$, $\phi_{\max}=30^\circ$).

Rezultati utjecaja promjene kuteva maksimuma zračenja antenskih elemenata na sfernoj podlozi ne pokazuju značajan utjecaj na oblik dijagrama zračenja te se ovaj parametar pobude (kutevi maksimalnog zračenja) neće uzimati pri višeparametarskoj optimizaciji dijagrama zračenja sfernih nizova.

5.4. SKUPNA ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA GEOMETRIJE I POBUDE NA DIJAGRAM ZRAČENJA KORIŠTENJEM METODE DIREKTOG PRETRAŽIVANJA PROSTORA

Pojedini ispitivani parametri imaju različite utjecaje na oblik dijagrama zračenja antenskih nizova na sferi za različite konfiguracije. Potrebno je naglasiti da postupci istraživanja utjecaja pojedinih parametara na dijagram zračenja u ovom poglavlju ovise o nizu faktora. Najvažniji, ograničavajući faktor je procesorska i memorijska moć računala koja su na raspolaganju pri ovim izračunima. Stoga su istraživanja ograničena na one postupke koje je u realnom vremenu moguće izvesti korištenjem raspoložive opreme. Primjerice, istraživanje utjecaja polarizacije kao parametra izvedeno je korištenjem funkcijske ovisnosti polarizacije antena po prstenovima na kojima se nalaze, a mogućnosti promjene polarizacije pobude (kao što je npr. zasebna polarizacija svakog elementa) su znatno šire te je tako i njihov utjecaj na dijagram zračenja moguće veći. Ipak oni parametri čiji utjecaj nije istražen u potpunosti u direktnom pretraživanju prostora, a pokazuju neki pozitivni utjecaj na dijagram zračenja (pa i manje značajan) uključeni su u višeparametarsku optimizaciju u nastavku ovog rada. U tablici 5.3. prikazani su svi ispitivani parametri i njihov utjecaj na dijagram zračenja za različite ispitivane konfiguracije.

Tablica 5.3. Utjecaj parametara geometrije i pobude za različite konfiguracije antenskih elemenata na vodljivoj sfernoj podlozi.

| KONFIGURACIJA | | IKOSAEDARSKA | LEOPARDI | SPIRALNA |
|---------------|------------------------|--|---|---|
| PARAMETAR | | | | |
| GEOMETRIJSKI | Broj antena | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: Pn=4 ($r_s=52,9\text{cm}$) | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: 145 antena 90 za $r_s=30\text{ cm}$ 145 za $r_s=52,9\text{ cm}$ Raspon vrijednosti: | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: 139 antena 72 za $r_s=30\text{ cm}$ 139 za $r_s=52,9\text{ cm}$ Raspon vrijednosti: |
| | Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF ₁ Max: 0,592 za H rav | Vrsta: CF ₂ Max: 0,679 za 145 ant. | Vrsta: CF ₂ Max: 0,624 za 139 ant. |
| | Gustoća antena | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: EXP promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i Pn=4) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: EXP promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 145 ant) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 139 ant) Raspon vrijednosti: |
| | Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF ₁ Max: 0,679 za E rav 0,613 za H rav | Vrsta: CF ₁ Max: 0,784 za E rav 0,667 za H rav | Vrsta: CF ₁ Max: 0,634 za E rav 0,692 za H rav |

| | Radijus sfere | Najbolji: $r_s=52,9\text{cm}$ | Najbolji: $r_s=52,9\text{cm}$ | Najbolji: $r_s=52,9\text{cm}$ |
|---|--|---|---|--|
| POBUDNI | Amplituda pobude | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: EXP I LIN promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i $P_n=4$) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: LIN I EXP promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 145 ant) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 139 ant) Raspon vrijednosti: |
| | Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF_1 Max: 0,460 za E rav 0,623 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,605 za E rav 0,493 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,516 za E rav 0,526 za H rav |
| | Faza pobude | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE | Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE |
| | Ciljna funkcija | Nije zasebno istraživani. Ovaj parametar je uvijek korišten. | Nije zasebno istraživani. Ovaj parametar je uvijek korišten. | Nije zasebno istraživani. Ovaj parametar je uvijek korišten. |
| | Polarizacija antenskih elemenata | Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i $P_n=4$) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: LIN i OBR. EXP promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 145 ant) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: OBR. EXP promjena ($r_s=52,9\text{cm}$ i 139 ant) Raspon vrijednosti: |
| | Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF_1 Max: 0,439 za E rav 0,434 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,605 za E rav 0,504 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,545 za E rav 0,546 za H rav |
| Elevacijski kut maksimuma zračenja | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\theta_{\max}=0^\circ$ i $\varphi_{\max}=30^\circ$ ($r_s=52,9\text{cm}$ i $P_n=4$) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\theta_{\max}=10^\circ$ i $\varphi_{\max}=10^\circ$ (E rav); $\theta_{\max}=0^\circ$ i $\varphi_{\max}=30^\circ$ (H rav) | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\theta_{\max}=10^\circ$ i $\varphi_{\max}=10^\circ$ (E rav); $\theta_{\max}=0^\circ$ i $\varphi_{\max}=10^\circ$ (H rav) | |
| Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF_1 Max: 0,440 za E rav 0,524 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,599 za E rav 0,470 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,530 za E rav 0,499 za H rav | |
| Azimutalni kut maksimuma zračenja | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\varphi_{\max}=180^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$ (E rav); $\varphi_{\max}=90^\circ$ i 270° , $\theta_{\max}=10^\circ$ (H rav) ($r_s=52,9\text{cm}$ i $P_n=4$) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\varphi_{\max}=10^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$; $\varphi_{\max}=90^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$ (E rav); $\varphi_{\max}=10^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$; $\varphi_{\max}=280^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$ (H rav) ($r_s=52,9\text{cm}$ i 145 ant) Raspon vrijednosti: | Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: $\varphi_{\max}=0^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$; $\varphi_{\max}=220^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$ (E rav); $\varphi_{\max}=80^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$; $\varphi_{\max}=240^\circ$ i $\theta_{\max}=10^\circ$ (H rav) ($r_s=52,9\text{cm}$ i 139 ant) Raspon vrijednosti: | |
| Ciljna Funkcija (dB/°) | Vrsta: CF_1 Max: 0,568 za E rav 0,502 za H rav | Vrsta: CF_1 Max: 0,599 i 0,575 za Erav 0,528 i 0,491 za Hrav | Vrsta: CF_1 Max: 0,532 i 0,431 za Erav 0,422 i 0,410 za Hrav | |

Fazni kut pobude je parametar čiji je utjecaj na dijagram zračenja vrlo dobro poznat i detaljno istražen, tako da je u svakom od ovih istraživanja uzet kao ključan parametar oblikovanja dijagrama zračenja.

Monotono opadajuće krivulje koje opisuju ovisnost ciljne funkcije o nekom od parametra koji na nju utječe, ukazuje na činjenicu da taj parametar nema značajnog utjecaja (pri tome se podrazumjeva utjecaj koji treba povećavati vrijednost ciljne funkcije) na dijagram zračenja, a time i ciljnu funkciju.

Parametre kod kojih je krivulja ovisnosti ciljne funkcije monotono opadajuća neće se uzimati kao opcija pri višeparametarskoj optimizaciji dijagrama zračenja u nastavku ovog rada. Parametri kod kojih se pojavljuje porast vrijednosti ciljnih funkcija, a posebno oni kod kojih krivulja ovisnosti ciljnih funkcija o parametru koji se istražuje ima maksimum unutar područja vrijednosti parametra, predstavljaju značajne parametre i kao važni se uzimaju za višeparametarsku optimizaciju, a kasnije i za sintezu, dijagrama zračenja nizova na sfernoj podlozi.

Istraživanje utjecaja geometrijskih parametara na dijagrama zračenja u svim konfiguracijama prethodi istraživanju utjecaja pobudnih parametara. Vrijednosti tako dobivenih parametara geometrije ulazne su veličine za istraživanje utjecaja pobudnih parametara. Vrijednosti ciljnih funkcija u svim konfiguracijama pri uračunatim parametrima pobude niže su od vrijednosti dobivenih sa uračunatim parametrima geometrije, iz razloga ograničenja ukupnog broja antena niza (smanjenjem selekcijskog kuta konusa na 57°) na 31 antenu pri istraživanju utjecaja parametara pobude.

Prema podacima iz tablice 5.3. od svih ispitivanih parametara, samo kutevi maksimalnog zračenja u azimutalnom i elevacijskom smjeru, predstavljaju parametre čiji utjecaj na ciljnu funkciju nije značajan te stoga nisu uzeti u višeparametarskoj optimizaciji u sljedećem poglavlju rada.

6. OPTIMIZACIJA DIJAGRAMA ZRAČENJA ANTENSKIH NIZOVA NA SFERI KORIŠTENJEM PSO ALGORITMA

U drugom dijelu istraživanja izvedena je višeparameterska optimizacija različitih konfiguracija sfernih nizova uz upotrebu PSO algoritma. Pri tome je korišten Matlab R2009b.

Optimizacija se u ovom poglavlju izvodi na prethodne tri konfiguracije elemenata na sferi. Ono što se želi istražiti u ovom dijelu ispitivanja jest ponašanje dijagrama zračenja uz istovremenu promjenu više parametara antenskog niza. Osim toga, važno je odrediti optimalne vrijednosti različitih parametara koji se pojavljuju kao parametri za oblikovanje dijagrama zračenja sfernih nizova. Pri tome se pod optimalnim parametrima podrazumjevaju oni za koje ciljna funkcija postiže svoju maksimalnu vrijednost. U prvom slučaju mijenjaju se samo geometrijski parametri (radijus sfere, broj antena i položaj), dok se u drugom slučaju uz geometrijske dodaje promjena amplitude kao parametra pobude. Promjena faze (pobude) uvijek je primjenjena. Aktiviranje još jednog parametra pobude, polarizacije, ostavlja se za posljednji dio istraživanja (poglavlje 7.).

Sljedeća poglavlja donose promjenu dijagrama zračenja uz promjenu relevantnih parametara u opsegu svojih granica.

6.1. IKOSAEDARSKA KONFIGURACIJA

6.1.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Prva ispitana konfiguracija je ikosaedarska, a ono što ovaj dio istraživanja razlikuje od prethodnog jest istovremena promjena geometrijskih parametara: radijusa sfere r_s , broja elementarnih antena sfernog niza (predstavljen brojem podjela elementarnog trokuta ikosaedra - P_n), te rasporeda antenskih elemenata na sferi. Na kraju se izvodi zaključak o zajedničkom utjecaju ovih parametara na dijagram zračenja - ciljnu funkciju.

Gustoća antenskih elemenata mijenja se po eksponencijalnoj funkciji. Dakle, promjena položaja elevacijskog kuta prstena na kome se nalaze antenski elementi jest eksponencijalna funkcij dana s:

$$\alpha = a+c \cdot \exp[-b/(k/10)] \quad (6-1)$$

gdje je:

$$a = -1171,171,$$

$$c = 1229,168,$$

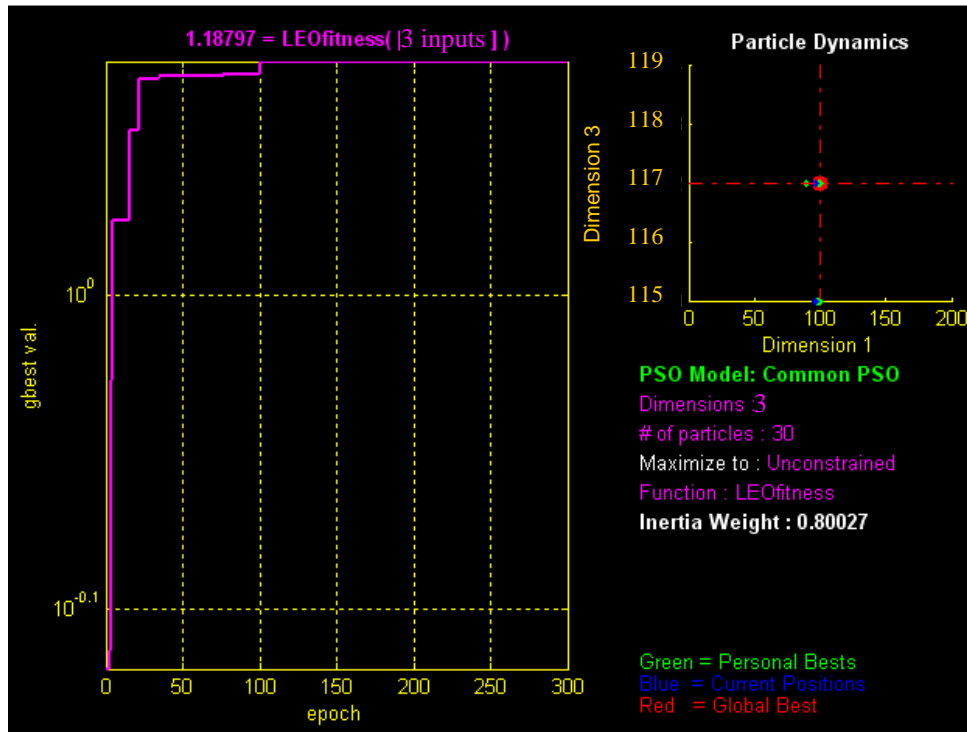
$$b \in [0:6],$$

$$k=k_g - \text{koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, } k_g \in [100:150].$$

Opseg promjena svakog od geometrijskih parametara utvrđeni su u poglavlju 5 i kreću se unutar sljedećih granica:

- radijus sfere: $r_s \in [30, 100]$;
- broj podjela elementarnog trokuta: $P_n \in [1, 5]$;
- koeficijent gustoće elemenata: $k_g \in [100, 150]$.

Broj čestica (*eng.* particle) koje predstavljaju zasebne konstelacije sfernog niza uz unaprijed definirane parametre optimizacije je 30. Ciljna funkcija dostiže krajnju vrijednost već nakon 100 iteracija, a krajni broj iteracija je 300. Poznavajući broj čestica i broj iteracija PSO algoritma, može se odrediti ukupni broj ispitivanih konstelacija kao produkt ove dvije vrijednosti (9000 konstelacija). Ove konstelacije se međusobno razlikuju po radijusu sfere r_s , broju podjela elementarnog trokuta P_n te po koeficijentu gustoće elemenata k_g .



Slika 6.1. Ciljna funkcija CF_2 dijagrama zračenja ikosaedarske strukture uz promjenu geometrijskih parametara izračunata uz pomoć PSO alata integriranog u Matlab2009b.

Selekcijski kut konusa postavljen je na $\alpha_{sel} = 90^\circ$ što uvjetuje razliku krajnje vrijednosti ciljne funkcije u odnosu na krajnju vrijednost ciljne funkcije uz pojedinačne promjene ovih parametara. Slika 6.1. prikazuje ovisnost vrijednosti ciljne funkcije o broju iteracija te (na dijagramu dinamike čestica (*eng.* Particle Dynamics)) dosegnute vrijednosti prvog i posljednjeg parametra optimizacije (radijusa sfere i koeficijenta rasporeda elemenata). Krajnje vrijednosti parametara postignutih optimizacijom prikazani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Vrijednosti parametara i ciljne funkcije pri optimizaciji dijagrama zračenja uz promjenu geometrijskih parametara.

| Parametar | Radijus sfere r_s (cm) | Broj antena na polusferi {Broj podjela Pn} | Koeficijent gustoće $k=k_g$ | Maksimalna vrijednost ciljne funkcije CF_2 (dB/stupnju) |
|--|--------------------------|--|-----------------------------|---|
| Vrijednost parametara optimiziranog dijagrama zračenja | 100 | 91 antena {4} | 117 | 1,188 |

Uz vrijednost ciljne funkcije, kao rezultati optimizacije su radijus sfere, broj antena, te koeficijent gustoće. Zadnji parametar definira optimalne pozicijske kuteve elevacije eksponencijalnog rasporeda antena ikosaedarske strukture za koje je ostvarena najveća vrijednost ciljne funkcije. Pozicijski kutevi elementarnih antena dane su u Tablici 6.2.

Tablica 6.2. Optimalan položaj 91 antene na sferi radijusa 100 cm (ikosaedarska konfiguracija).

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,10000 | 0,00000 |
| 2 | 6,57548 | 0,00000 |
| 2 | 6,57548 | 72,00000 |
| 2 | 6,57548 | 144,00000 |
| 2 | 6,57548 | 216,00000 |
| 2 | 6,57548 | 288,00000 |
| 3 | 16,68483 | 0,00000 |
| 3 | 16,68483 | 36,00000 |
| 3 | 16,68483 | 72,00000 |
| 3 | 16,68483 | 108,00000 |
| 3 | 16,68483 | 144,00000 |
| 3 | 16,68483 | 180,00000 |
| 3 | 16,68483 | 216,00000 |
| 3 | 16,68483 | 252,00000 |
| 3 | 16,68483 | 288,00000 |
| 3 | 16,68483 | 324,00000 |
| 4 | 26,88095 | 0,00000 |
| 4 | 26,88095 | 24,00000 |
| 4 | 26,88095 | 48,00000 |
| 4 | 26,88095 | 72,00000 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 4 | 26,88095 | 96,00000 |
| 4 | 26,88095 | 120,00000 |
| 4 | 26,88095 | 144,00000 |
| 4 | 26,88095 | 168,00000 |
| 4 | 26,88095 | 192,00000 |
| 4 | 26,88095 | 216,00000 |
| 4 | 26,88095 | 240,00000 |
| 4 | 26,88095 | 264,00000 |
| 4 | 26,88095 | 288,00000 |
| 4 | 26,88095 | 312,00000 |
| 4 | 26,88095 | 336,00000 |
| 5 | 37,16459 | 0,00000 |
| 5 | 37,16459 | 18,00000 |
| 5 | 37,16459 | 36,00000 |
| 5 | 37,16459 | 54,00000 |
| 5 | 37,16459 | 72,00000 |
| 5 | 37,16459 | 90,00000 |
| 5 | 37,16459 | 108,00000 |
| 5 | 37,16459 | 126,00000 |
| 5 | 37,16459 | 144,00000 |
| 5 | 37,16459 | 162,00000 |
| 5 | 37,16459 | 180,00000 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 5 | 37,16459 | 198,00000 |
| 5 | 37,16459 | 216,00000 |
| 5 | 37,16459 | 234,00000 |
| 5 | 37,16459 | 252,00000 |
| 5 | 37,16459 | 270,00000 |
| 5 | 37,16459 | 288,00000 |
| 5 | 37,16459 | 306,00000 |
| 5 | 37,16459 | 324,00000 |
| 5 | 37,16459 | 342,00000 |
| 6 | 47,53650 | 9,00000 |
| 6 | 47,53650 | 27,00000 |
| 6 | 47,53650 | 45,00000 |
| 6 | 47,53650 | 63,00000 |
| 6 | 47,53650 | 81,00000 |
| 6 | 47,53650 | 99,00000 |
| 6 | 47,53650 | 117,00000 |
| 6 | 47,53650 | 135,00000 |
| 6 | 47,53650 | 153,00000 |
| 6 | 47,53650 | 171,00000 |
| 6 | 47,53650 | 189,00000 |
| 6 | 47,53650 | 207,00000 |
| 6 | 47,53650 | 225,00000 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 6 | 47,53650 | 243,00000 |
| 6 | 47,53650 | 261,00000 |
| 6 | 47,53650 | 279,00000 |
| 6 | 47,53650 | 297,00000 |
| 6 | 47,53650 | 315,00000 |
| 6 | 47,53650 | 333,00000 |
| 6 | 47,53650 | 351,00000 |
| 7 | 57,99744 | 0,00000 |
| 7 | 57,99744 | 18,00000 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 7 | 57,99744 | 36,00000 |
| 7 | 57,99744 | 54,00000 |
| 7 | 57,99744 | 72,00000 |
| 7 | 57,99744 | 90,00000 |
| 7 | 57,99744 | 108,00000 |
| 7 | 57,99744 | 126,00000 |
| 7 | 57,99744 | 144,00000 |
| 7 | 57,99744 | 162,00000 |
| 7 | 57,99744 | 180,00000 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 7 | 57,99744 | 198,00000 |
| 7 | 57,99744 | 216,00000 |
| 7 | 57,99744 | 234,00000 |
| 7 | 57,99744 | 252,00000 |
| 7 | 57,99744 | 270,00000 |
| 7 | 57,99744 | 288,00000 |
| 7 | 57,99744 | 306,00000 |
| 7 | 57,99744 | 324,00000 |
| 7 | 57,99744 | 342,00000 |

Ciljna funkcija postiže veću vrijednost u odnosu na slučaj zasebne promjene ovih parametara, što ukazuje na činjenicu da se uz istovremenu promjenu više parametara, dijagram zračenja može poboljšati, tj. vrijednost ciljne funkcije raste povećanjem broja parametara optimizacije. Takav porast je očekivan. Valja naglasiti da se rezultati optimizacije geometrijskih parametara, u zavisnosti o namjeni niza, mogu iskoristiti prije i u fazi izrade samog antenskog niza, dok se rezultati optimizacije pobudnih parametara koriste u fazi korištenja antenskog niza.

6.1.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

U ovom se dijelu koriste se vrijednosti parametara optimizacije koji su postignuti u prethodnom poglavlju: $r_s = 100$ cm, $P_n = 4$ i $k_g = 117$.

Uz ove postavke geometrijskih parametara, ispituje se utjecaj promjene amplitude kao jednog od parametara pobude. Amplituda se mijenja po eksponencijalnoj funkciji ovisno o elevacijskom položaju antenskog elementa te koeficijentu amplitude prema relaciji:

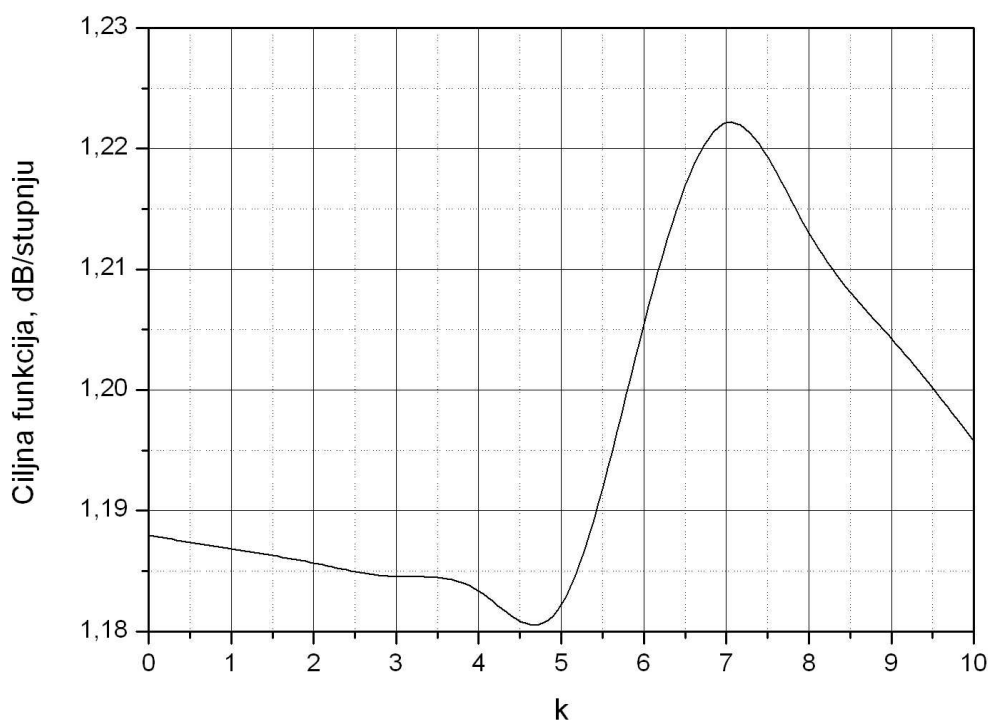
$$A = \exp(\alpha \cdot k \cdot 0.0007). \quad (6-2)$$

gdje je:

$k = k_a$ - koeficijent promjene amplitude koji se kreće u rasponu $[0, 10]$,

α - elevacijski kut pozicije antenskog elementa.

Slika 6.2. prikazuje promjenu vrijednosti ciljne funkcije CF_2 u ovisnosti o promjeni koeficijenta amplitude $k = k_a$. Važno je uočiti da je vrijednost ciljne funkcije na početku osi apscise (za $k = 0$) upravo ona vrijednost ciljne funkcije koja je postignuta u prethodnom poglavlju 6.1.1., dakle, pri optimizaciji dijagrama zračenja uz promjenu samo geometrijskih parametara.



Slika 6.2. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o promjeni koefcijenta $k=k_a$.

Iz slike 6.2. je vidljivo da ciljna funkcija postiže svoj maksimum od 1,222 dB/stupnju za $k=7$, što je veća vrijednost ciljne funkcije u odnosu na vrijednost ciljne funkcije uz promjenu samo geometrijskih parametara (1,188 dB/stupnju).

Tablica 6.3. Vrijednosti parametara i ciljne funkcije pri optimizaciji dijagrama zračenja uz promjenu geometrijskih i pobudnih (amplituda) parametara.

| Parametar | Radijus sfere r_s (cm) | Broj antena na polusferi {Broj podjela P_n } | Koeficijent amplitude $k=k_a$ | Maksimalna vrijednost ciljne funkcije CF_2 (dB/stupnju) |
|--|--------------------------|--|-------------------------------|---|
| Vrijednost parametara optimiranog dijagrama zračenja | 100 | 91 antena {4} | 7 | 1,222 |

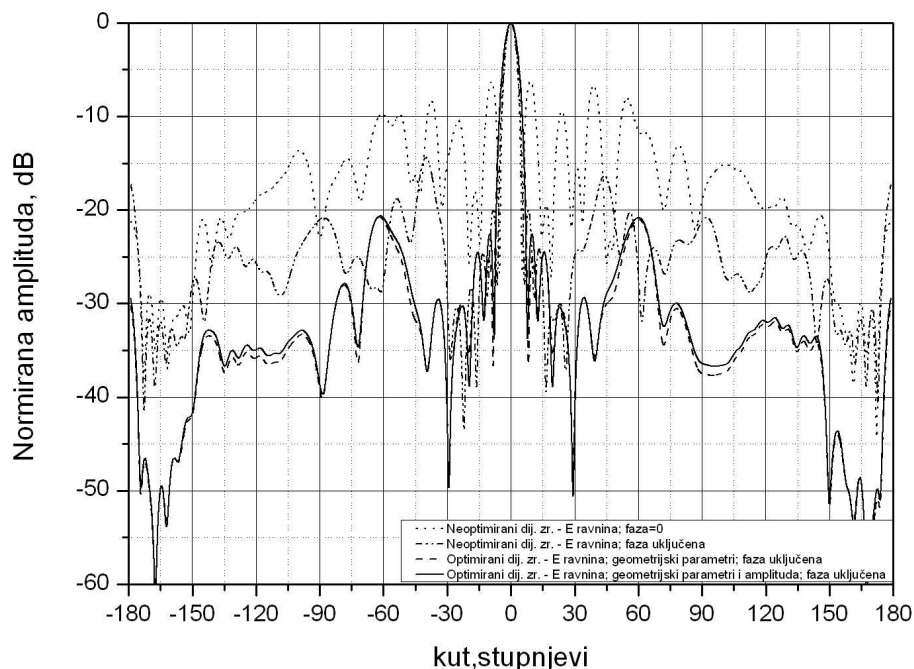
Ovaj porast vrijednosti ciljne funkcije postignut je za eksponencijalnu promjenu amplituda pobude antenskih elemenata po elevacijsko-pozicijskim kutevima. Promjena amplitude pobude na neki drukčiji način (ne po elevacijskim kutevima pozicije), možda može i poboljšati dijagram zračenja te povećati vrijednosti ciljne funkcije.

Vrijednosti u ovom dijelu stat će se na ovoj vrsti optimizacije uz prethodno spomenute parametre. Tablica 6.4. prikazuje promjenu amplitude uz promjenu koeficijenta k za različite položaje elemenata sferi.

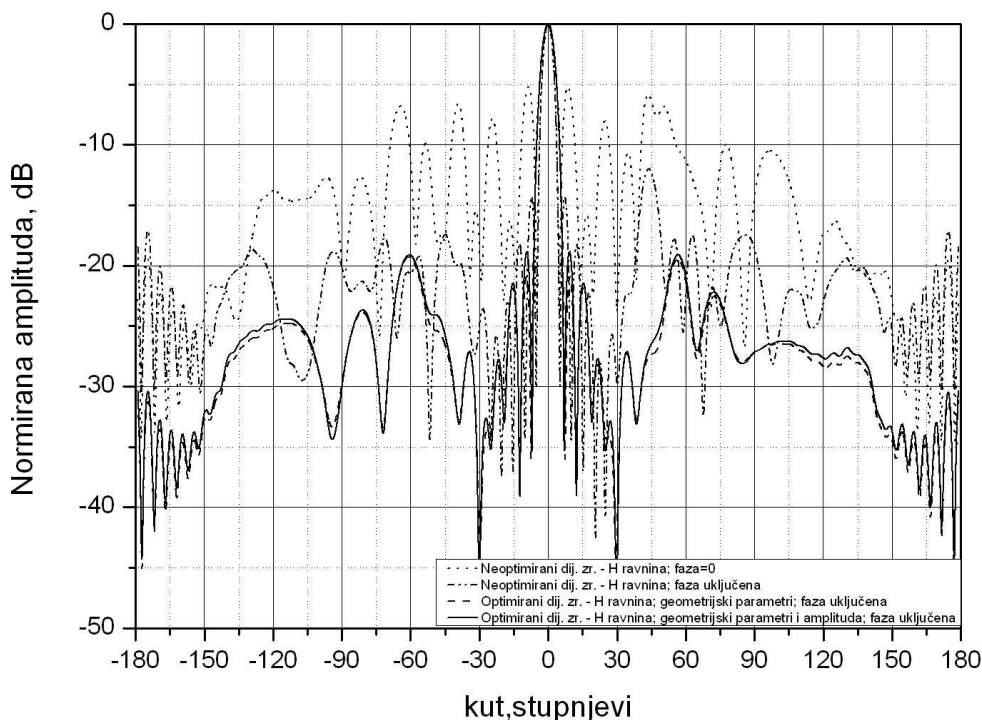
Tablica 6.4. Elevacijski kutevi i pripadajuće amplitude pri eksponencijalnoj promjeni amplitude antenskih elemenata za 91 antenu; na sferi radijusa 100 cm uz koeficijent amplitude $k_a=7$.

| R. br. prstena | Alfa, ° | $k=k_a$ | Amplituda |
|----------------|---------|---------|-----------|
| 1 | 0,1000 | 7 | 1,0005 |
| 2 | 6,5755 | 7 | 1,0327 |
| 3 | 16,6848 | 7 | 1,0852 |
| 4 | 26,8809 | 7 | 1,1408 |
| 5 | 37,1646 | 7 | 1,1997 |
| 6 | 47,5365 | 7 | 1,2623 |
| 7 | 57,9974 | 7 | 1,3287 |

Tablica 6.4. prikazuje promjenu amplitude za pojedini prsten na kome se nalaze antenski elementi. Kako bi se bolje dočarao utjecaj gore navedenih parametara geometrije i pobude, sljedećim slikama prikazani su dijagrami zračenja počevši od najlošijeg - neoptimirani dijagram zračenja, do najboljeg slučaja optimiranog dijagrama uz promjenu i geometrijskih i parametara pobude zajedno. Iz slika je vidljivo smanjenje razine bočnih latica ako je u optimizaciju istovremeno uključeno više parametara.



a)



b)

Slika 6.3. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije uz postupno dodavanje relevantnih parametara optimizacije: a) E ravnina, b) H ravnina.

Oblik dijagrama zračenja mijenja se s promjenom broja i vrste parametara koji su uključeni u optimizaciju. Promjena oblika dijagrama zračenja kreće se u smjeru povećanja vrijednosti ciljne funkcije CF_2 . To, prema relaciji kojom je opisana ciljna funkcija (5-2), znači da se glavna latica sužava dok se bočne latice smanjuju i to u obje ortogonalne ravnine (E i H ravini). Tablica 6.5. prikazuje vrijednost ciljne funkcije za pojedini slučaj ($f=1,7$ GHz, $r_s=100$ cm, $P_n=4$, $\alpha_{sel}=90^\circ$):

Tablica 6.5. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 ikosaedarske konfiguracije elemenata uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza.

| | Faza pobude = 0, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amplituda pobude =1, Promjena parametara geometrije | Promjena faze i amplitude pobude, Promjena parametara geometrije |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| Vrijednost ciljne funkcije CF_2 dB/stupnju | 0,455 | 0,994 | 1,188 | 1,222 |

6.2 LEOPARDI KONFIGURACIJA

6.2.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Leopardieva konfiguracija elemenata na sferi uvelike se razlikuje od ostalih uobičajeno korištenih konfiguracija. Kako je i prije spomenuto, uz konstantnu veličinu elementarne površine, broj prstenova na kojima se nalaze jednake površine s po jednim antenskim elementom unutar svake, proporcionalan je sa radijusom sfere (poglavlje 4.4.3.). Stoga se i broj antena niza mijenja s promjenom radijusa sfere, a time i konfiguracija niza. Zadrži li se broj antena konstantnim, pri porastu radijusa sfere, mijenja se međusobna udaljenost i raspored antena. Pri svakoj od ovih promjena međusobni pomak prstenova (koji sadrže antenske elemente) potrebno je optimirati. Raspored elementarnih antena nije „čvrsto“ zadan kao kod preostale dvije istraživane konfiguracije (ikosaedarska i spiralna) već se mijenja pri promjeni geometrije niza – radijusa podloge, broja antena te veličine elementarne površine. U nastavku rada odabrana su tri različita radijusa (koji su funkcija valne duljine λ) sa različitim brojem antena niza. Računalna rutina koristi Leopardiev algoritam za podijelu sfere na prstenove s antenskim elementima raspoređenim prema prethodno zadanoj logici. Frekvencija postavljena pri izračunu je 1,7 GHz, selekcijski kut $\alpha_{\text{sel}} = 180^\circ$ (obuhvaćena cijela sfera), a broj antena pri svakoj optimizaciji je fiksiran. Optimizacijom se određuje optimalni položaj antena (elevacijski i azimutalni kutevi pozicije elementarnih antena) za prethodno zadan radijus te broj antena. Nakon toga, optimira se nova konfiguracija za novi radijus i broj antena. Krajnji rezultat je optimalni položaj i broj antena za određeni radijus sferne podloge uz fiksnu frekvenciju i selekcijski kut. Podaci dobiveni ovom optimizacijom koriste se u nastavku optimizacije.

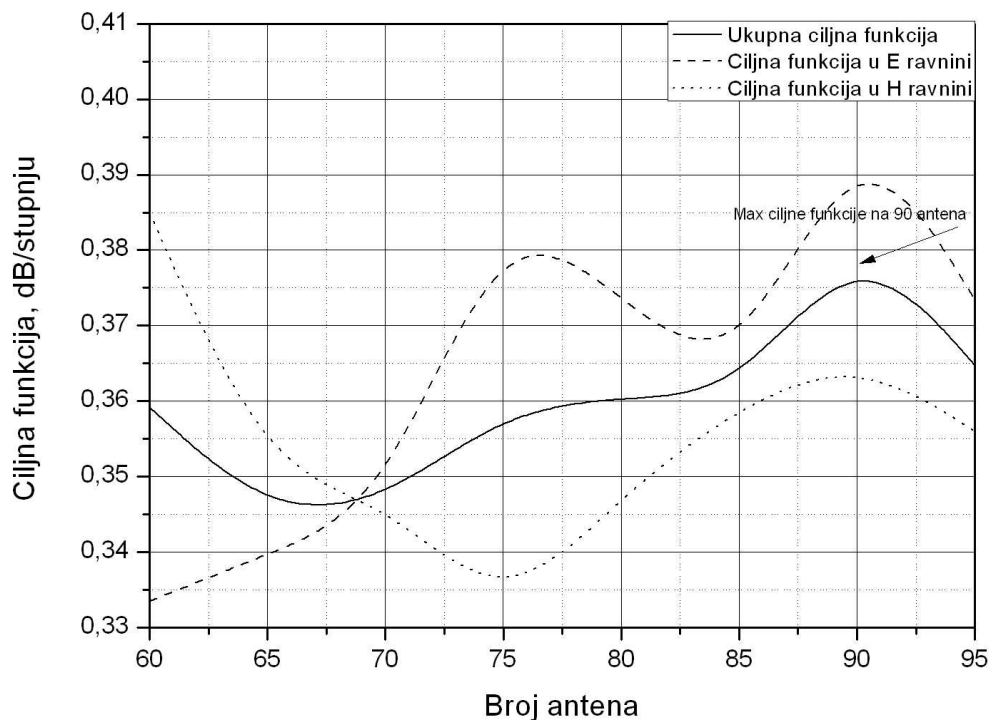
A) Optimizacija niza radijusa $r_s = 30 \text{ cm}$ ($1,7\lambda$)

Prvi obrađeni slučaj jest sfera radijusa 30 cm, a postavke izračuna su sljedeće:

- promjena faze pobude;
- broj antena u rasponu od 60 do 95;
- selekcijski kut konusa $\alpha_{\text{sel}} = 180^\circ$;
- jednomodni režim rada uz frekvenciju $f = 1,7 \text{ GHz}$.

Ove postavke vrijede za sve konfiguracije obrađene u ovom poglavlju osim opsega broja antena koji se mijenja pri promjeni radijusa sferne podloge.

Optimizacija daje vrijednosti ciljne funkcije CF_2 za svaki od navedenog broja antena, te njihov optimalni položaj. Na Slici 6.3. prikazana je ciljna funkcija u ovisnosti o broju antena na sferi, pri čemu su antene raspoređene po Leopardi algoritmu. Kao što je iz slike vidljivo, program računa pojedinačne (CF_1) te ukupnu ciljnu funkciju (CF_2) dijagrama zračenja, a dobiveni položaj antena uzima se u obzir za sljedeći korak optimizacije.



Slika 6.4. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=30$ cm.

Za sferu radijusa 30 cm, ciljna funkcija CF_2 je najveća na 90 antena i postiže vrijednost 0,377 dB/stupnju, a Tablicom 6.6. prikazan je postignut optimalan raspored elemenata na sferi radijusa 30 cm, selekcijskog kuta 180° .

Tablica 6.6. Optimalni pozicijski kutevi 90 antena na sferi radijusa 30 cm Leopardi konfiguracije.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 14,62385 | 165,96032 |
| 3 | 20,74343 | 40,52154 |
| 3 | 20,74343 | 220,52154 |
| 4 | 27,13354 | 124,13529 |
| 4 | 27,13354 | 304,13529 |
| 5 | 33,39817 | 31,50765 |

| | | |
|---|----------|-----------|
| 5 | 33,39817 | 151,50764 |
| 5 | 33,39817 | 271,50764 |
| 6 | 39,85166 | 79,57571 |
| 6 | 39,85166 | 199,57571 |
| 6 | 39,85166 | 319,57571 |
| 7 | 46,35470 | 77,09658 |
| 7 | 46,35470 | 167,09658 |
| 7 | 46,35470 | 257,09658 |
| 7 | 46,35470 | 347,09658 |

| | | |
|----|----------|-----------|
| 8 | 53,06349 | 60,00694 |
| 8 | 53,06349 | 150,00694 |
| 8 | 53,06349 | 240,00694 |
| 8 | 53,06349 | 330,00694 |
| 9 | 59,21644 | 18,07858 |
| 9 | 59,21644 | 108,07858 |
| 9 | 59,21644 | 198,07858 |
| 9 | 59,21644 | 288,07858 |
| 10 | 64,99288 | 70,34986 |

| | | |
|----|----------|-----------|
| 10 | 64,99288 | 160,34986 |
| 10 | 64,99288 | 250,34986 |
| 10 | 64,99288 | 340,34986 |
| 11 | 71,16894 | 51,41524 |
| 11 | 71,16894 | 123,41524 |
| 11 | 71,16894 | 195,41524 |
| 11 | 71,16894 | 267,41524 |
| 11 | 71,16894 | 339,41524 |
| 12 | 77,79249 | 18,14822 |
| 12 | 77,79249 | 90,14822 |
| 12 | 77,79249 | 162,14822 |
| 12 | 77,79249 | 234,14822 |
| 12 | 77,79249 | 306,14822 |
| 13 | 84,25183 | 46,04561 |
| 13 | 84,25183 | 118,04561 |
| 13 | 84,25183 | 190,04561 |
| 13 | 84,25183 | 262,04561 |
| 13 | 84,25183 | 334,04561 |
| 14 | 90,00000 | 17,53397 |
| 14 | 90,00000 | 107,53397 |
| 14 | 90,00000 | 197,53397 |
| 14 | 90,00000 | 287,53397 |

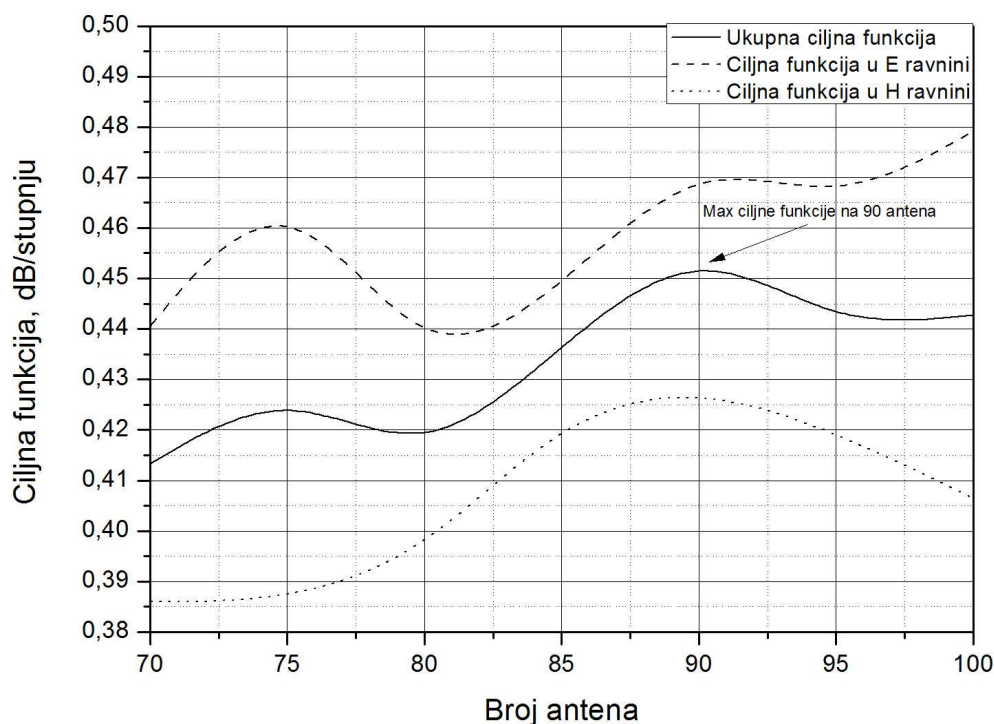
| | | |
|----|-----------|-----------|
| 15 | 95,74817 | 69,76161 |
| 15 | 95,74817 | 141,76161 |
| 15 | 95,74817 | 213,76161 |
| 15 | 95,74817 | 285,76161 |
| 15 | 95,74817 | 357,76161 |
| 16 | 102,20751 | 52,24406 |
| 16 | 102,20751 | 124,24407 |
| 16 | 102,20751 | 196,24407 |
| 16 | 102,20751 | 268,24406 |
| 16 | 102,20751 | 340,24406 |
| 17 | 108,83106 | 54,47169 |
| 17 | 108,83106 | 126,47169 |
| 17 | 108,83106 | 198,47169 |
| 17 | 108,83106 | 270,47169 |
| 17 | 108,83106 | 342,47169 |
| 18 | 115,00712 | 74,72793 |
| 18 | 115,00712 | 164,72793 |
| 18 | 115,00712 | 254,72793 |
| 18 | 115,00712 | 344,72793 |
| 19 | 120,78356 | 20,85302 |
| 19 | 120,78356 | 110,85302 |
| 19 | 120,78356 | 200,85302 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 19 | 120,78356 | 290,85302 |
| 20 | 126,93651 | 51,58520 |
| 20 | 126,93651 | 141,58520 |
| 20 | 126,93651 | 231,58520 |
| 20 | 126,93651 | 321,58520 |
| 21 | 133,64530 | 28,53120 |
| 21 | 133,64530 | 118,53120 |
| 21 | 133,64530 | 208,53120 |
| 21 | 133,64530 | 298,53120 |
| 22 | 140,14834 | 50,37307 |
| 22 | 140,14834 | 170,37307 |
| 22 | 140,14834 | 290,37307 |
| 23 | 146,60183 | 60,26119 |
| 23 | 146,60183 | 180,26119 |
| 23 | 146,60183 | 300,26119 |
| 24 | 152,86646 | 125,19809 |
| 24 | 152,86646 | 305,19809 |
| 25 | 159,25657 | 57,14440 |
| 25 | 159,25657 | 237,14441 |
| 26 | 165,37615 | 133,27561 |
| 27 | 180,00000 | 0,00000 |

B) Optimizacija niza radijusa $r_s = 35,3$ cm (2λ)

Drugi optimizacijski slučaj jest optimizacija sfere radijusa 35,3 cm (dvije valne duljine) uz raspon broja antena od 70 do 100. Postupak iz prethodnog poglavlja ponavlja se, što znači da se određuje optimalan broj antena za sferu ovog radijusa. Osim broja antena rezultat optimizacije jest i raspored (pozicijski kutjevi) optimalnog broja antena na sferi. Slika 6.4. prikazuje krivulju promjene ciljnih funkcija uz broj antena kao varijablu. Na ovoj krivulji važne veličine su maksimalna vrijednost ukupne ciljne funkcije CF_2 te broj antena za koji se dobije ta vrijednost. Za taj se broj antena u poglavlju 6.2.2. optimira dijagram zračenja uz zajednički utjecaj geometrijskih i pobudnih parametara.

Za sferu radijusa 35,3 cm ciljna funkcija je maksimalna na 90 antena te postiže vrijednost 0,452 dB/stupnju. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da ciljna funkcija direktno ovisi o radijusu sfere. Iako je isti broj elemenata u pitanju, vrijednost ciljne funkcije veća je nego za radijus 30 cm. Razlog leži u tome što se elementi mogu rasporediti na povoljniji način i tako dati bolji dijagram zračenja. Tablica 6.7. prikazuje raspored 90 elemenata na sferi radijusa 35,3 cm.



Slika 6.5. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=35,3$ cm.

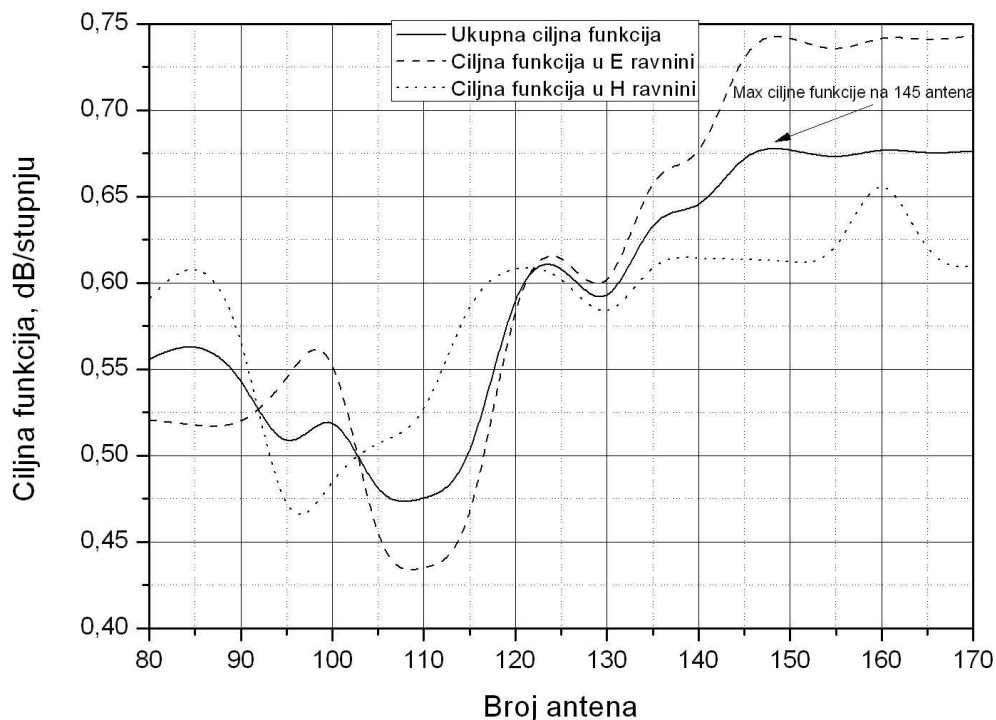
Tablica 6.7. Raspored 90 antena na sferi radijusa 35,3 cm Leopardi konfiguracije.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 16,57048 | 127,85650 |
| 2 | 16,57048 | 307,85650 |
| 3 | 24,15276 | 28,55215 |
| 3 | 24,15276 | 208,55215 |
| 4 | 30,97909 | 84,28175 |
| 4 | 30,97909 | 204,28175 |
| 4 | 30,97909 | 324,28175 |
| 5 | 37,80910 | 47,90467 |
| 5 | 37,80910 | 167,90466 |
| 5 | 37,80910 | 287,90466 |
| 6 | 45,40101 | 29,01951 |
| 6 | 45,40101 | 101,01951 |
| 6 | 45,40101 | 173,01951 |
| 6 | 45,40101 | 245,01951 |
| 6 | 45,40101 | 317,01951 |
| 7 | 53,06349 | 71,36153 |
| 7 | 53,06349 | 161,36153 |
| 7 | 53,06349 | 251,36153 |
| 7 | 53,06349 | 341,36153 |
| 8 | 59,93161 | 22,70572 |
| 8 | 59,93161 | 94,70572 |
| 8 | 59,93161 | 166,70572 |
| 8 | 59,93161 | 238,70572 |
| 8 | 59,93161 | 310,70572 |
| 9 | 67,74300 | 48,12211 |
| 9 | 67,74300 | 108,12211 |
| 9 | 67,74300 | 168,12211 |
| 9 | 67,74300 | 228,12211 |
| 9 | 67,74300 | 288,12211 |
| 9 | 67,74300 | 348,12211 |
| 10 | 75,16842 | 46,69918 |
| 10 | 75,16842 | 118,69918 |
| 10 | 75,16842 | 190,69918 |
| 10 | 75,16842 | 262,69918 |
| 10 | 75,16842 | 334,69918 |
| 11 | 82,32024 | 45,01218 |
| 11 | 82,32024 | 105,01218 |
| 11 | 82,32024 | 165,01218 |
| 11 | 82,32024 | 225,01218 |
| 11 | 82,32024 | 285,01218 |
| 11 | 82,32024 | 345,01218 |
| 12 | 90,00000 | 44,35338 |
| 12 | 90,00000 | 104,35338 |
| 12 | 90,00000 | 164,35338 |
| 12 | 90,00000 | 224,35338 |
| 12 | 90,00000 | 284,35338 |
| 12 | 90,00000 | 344,35338 |
| 13 | 97,67976 | 15,55785 |
| 13 | 97,67976 | 75,55785 |
| 13 | 97,67976 | 135,55785 |
| 13 | 97,67976 | 195,55785 |
| 13 | 97,67976 | 255,55785 |
| 13 | 97,67976 | 315,55785 |
| 14 | 104,83158 | 36,07029 |
| 14 | 104,83158 | 108,07029 |
| 14 | 104,83158 | 180,07029 |
| 14 | 104,83158 | 252,07029 |
| 14 | 104,83158 | 324,07029 |
| 15 | 112,25700 | 23,77927 |
| 15 | 112,25700 | 83,77927 |
| 15 | 112,25700 | 143,77927 |
| 15 | 112,25700 | 203,77927 |
| 15 | 112,25700 | 263,77927 |
| 15 | 112,25700 | 323,77927 |
| 16 | 120,06839 | 60,49060 |
| 16 | 120,06839 | 132,49060 |
| 16 | 120,06839 | 204,49060 |
| 16 | 120,06839 | 276,49060 |
| 16 | 120,06839 | 348,49060 |
| 17 | 126,93651 | 52,04897 |
| 17 | 126,93651 | 142,04897 |
| 17 | 126,93651 | 232,04897 |
| 17 | 126,93651 | 322,04897 |
| 18 | 134,59899 | 39,08645 |
| 18 | 134,59899 | 111,08645 |
| 18 | 134,59899 | 183,08645 |
| 18 | 134,59899 | 255,08645 |
| 18 | 134,59899 | 327,08645 |
| 19 | 142,19090 | 57,93745 |
| 19 | 142,19090 | 177,93745 |
| 19 | 142,19090 | 297,93745 |
| 20 | 149,02091 | 118,75857 |
| 20 | 149,02091 | 238,75857 |
| 20 | 149,02091 | 358,75857 |
| 21 | 155,84724 | 60,48828 |
| 21 | 155,84724 | 240,48828 |
| 22 | 163,42952 | 127,84323 |
| 22 | 163,42952 | 307,84323 |
| 23 | 180,00000 | 0,00000 |

C) Optimizacija niza radijusa $r_s = 52,9$ cm (3λ)

Posljednja od ispitivanih sfera jest sfera radijusa 52,9 cm (tri valne duljine) uz raspon broja antena od 80 do 170. Također se određuje optimalan broj antena na sferi, te njihov odgovarajući položaj. Za očekivati je da povećanje iznosa ciljne funkcije, jer je sada moguće rasporediti više elemenata na podlogu, naravno uz poštovanje minimalnog razmaka dvaju elemenata.

Slika 6.5. prikazuje porast ciljne funkcije uz porast broja antena na sferi.



Slika 6.6. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=52,9$ cm.

Kada je u pitanju sfera radijusa 52,9 cm ciljna funkcija postiže najveću vrijednost za 145 antena i iznosi 0,679 dB/stupnju. U Tablici 6.8. dani su pozicijski kutevi 145 antenskih elemenata Leopardi konfiguracije dobijeni kao rezultat optimizacije.

Iz dijagrama na slikama 6.3., 6.4. i 6.5. je vidljivo da vrijednost ciljne funkcije CF_2 raste s povećanjem radijusa sfere. Isto tako optimalan broj antena raste sa povećanjem broja antena. To znači da se povećanjem radijusa sfere, antenski elementi mogu rasporediti na takav način da je moguće postići bolji dijagram zračenja uz definiranu ciljnu funkciju.

Tablica 6.8. Pozicijski kutevi 145 antena na sferi radijusa 52,9 cm Leopardi konfiguracije.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° | | | | | | |
|----------------|----------|-----------|----|-----------|-----------|----|-----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 | 9 | 73,10793 | 218,53356 | 14 | 115,37867 | 188,64139 |
| 2 | 14,32426 | 74,51596 | 9 | 73,10793 | 251,26083 | 14 | 115,37867 | 228,64139 |
| 2 | 14,32426 | 194,51596 | 9 | 73,10793 | 283,98810 | 14 | 115,37867 | 268,64139 |
| 2 | 14,32426 | 314,51596 | 9 | 73,10793 | 316,71538 | 14 | 115,37867 | 308,64139 |
| 3 | 23,14564 | 77,53332 | 9 | 73,10793 | 349,44265 | 14 | 115,37867 | 348,64139 |
| 3 | 23,14564 | 167,53332 | 10 | 81,65226 | 12,50109 | 15 | 123,59110 | 27,20847 |
| 3 | 23,14564 | 257,53332 | 10 | 81,65226 | 48,50109 | 15 | 123,59110 | 67,20847 |
| 3 | 23,14564 | 347,53332 | 10 | 81,65226 | 84,50109 | 15 | 123,59110 | 107,20847 |
| 4 | 31,00808 | 40,75190 | 10 | 81,65226 | 120,50109 | 15 | 123,59110 | 147,20847 |
| 4 | 31,00808 | 112,75190 | 10 | 81,65226 | 156,50109 | 15 | 123,59110 | 187,20847 |
| 4 | 31,00808 | 184,75190 | 10 | 81,65226 | 192,50109 | 15 | 123,59110 | 227,20847 |
| 4 | 31,00808 | 256,75190 | 10 | 81,65226 | 228,50109 | 15 | 123,59110 | 267,20847 |
| 4 | 31,00808 | 328,75190 | 10 | 81,65226 | 264,50109 | 15 | 123,59110 | 307,20847 |
| 5 | 39,22446 | 24,79325 | 10 | 81,65226 | 300,50109 | 15 | 123,59110 | 347,20847 |
| 5 | 39,22446 | 76,22182 | 11 | 90,00000 | 23,12685 | 16 | 132,13073 | 42,54395 |
| 5 | 39,22446 | 127,65039 | 11 | 90,00000 | 55,85412 | 16 | 132,13073 | 87,54395 |
| 5 | 39,22446 | 179,07896 | 11 | 90,00000 | 88,58139 | 16 | 132,13073 | 132,54395 |
| 5 | 39,22446 | 230,50753 | 11 | 90,00000 | 121,30867 | 16 | 132,13073 | 177,54395 |
| 5 | 39,22446 | 281,93611 | 11 | 90,00000 | 154,03594 | 16 | 132,13073 | 222,54395 |
| 5 | 39,22446 | 333,36468 | 11 | 90,00000 | 186,76321 | 16 | 132,13073 | 267,54395 |
| 6 | 47,86927 | 39,02996 | 11 | 90,00000 | 219,49048 | 16 | 132,13073 | 312,54395 |
| 6 | 47,86927 | 84,02996 | 11 | 90,00000 | 252,21776 | 16 | 132,13073 | 357,54395 |
| 6 | 47,86927 | 129,02996 | 11 | 90,00000 | 284,94503 | 17 | 140,77554 | 22,89754 |
| 6 | 47,86927 | 174,02996 | 11 | 90,00000 | 317,67230 | 17 | 140,77554 | 74,32611 |
| 6 | 47,86927 | 219,02996 | 11 | 90,00000 | 350,39958 | 17 | 140,77554 | 125,75468 |
| 6 | 47,86927 | 264,02995 | 12 | 98,34774 | 24,44174 | 17 | 140,77554 | 177,18325 |
| 6 | 47,86927 | 309,02995 | 12 | 98,34774 | 60,44174 | 17 | 140,77554 | 228,61182 |
| 6 | 47,86927 | 354,02995 | 12 | 98,34774 | 96,44174 | 17 | 140,77554 | 280,04040 |
| 7 | 56,40890 | 31,87197 | 12 | 98,34774 | 132,44174 | 17 | 140,77554 | 331,46897 |
| 7 | 56,40890 | 71,87197 | 12 | 98,34774 | 168,44174 | 18 | 148,99192 | 46,10521 |
| 7 | 56,40890 | 111,87197 | 12 | 98,34774 | 204,44174 | 18 | 148,99192 | 118,10521 |
| 7 | 56,40890 | 151,87197 | 12 | 98,34774 | 240,44174 | 18 | 148,99192 | 190,10521 |
| 7 | 56,40890 | 191,87197 | 12 | 98,34774 | 276,44174 | 18 | 148,99192 | 262,10521 |
| 7 | 56,40890 | 231,87197 | 12 | 98,34774 | 312,44174 | 18 | 148,99192 | 334,10521 |
| 7 | 56,40890 | 271,87197 | 12 | 98,34774 | 348,44174 | 19 | 156,85436 | 47,83055 |
| 7 | 56,40890 | 311,87197 | 13 | 106,89207 | 10,81370 | 19 | 156,85436 | 137,83055 |
| 7 | 56,40890 | 351,87197 | 13 | 106,89207 | 43,54097 | 19 | 156,85436 | 227,83055 |
| 8 | 64,62133 | 12,80558 | 13 | 106,89207 | 76,26824 | 19 | 156,85436 | 317,83055 |
| 8 | 64,62133 | 52,80558 | 13 | 106,89207 | 108,99552 | 20 | 165,67574 | 34,21193 |
| 8 | 64,62133 | 92,80558 | 13 | 106,89207 | 141,72279 | 20 | 165,67574 | 154,21193 |
| 8 | 64,62133 | 132,80558 | 13 | 106,89207 | 174,45006 | 20 | 165,67574 | 274,21193 |
| 8 | 64,62133 | 172,80558 | 13 | 106,89207 | 207,17733 | 21 | 180,00000 | 0,00000 |
| 8 | 64,62133 | 212,80558 | 13 | 106,89207 | 239,90461 | | | |
| 8 | 64,62133 | 252,80558 | 13 | 106,89207 | 272,63188 | | | |
| 8 | 64,62133 | 292,80558 | 13 | 106,89207 | 305,35915 | | | |
| 8 | 64,62133 | 332,80558 | 13 | 106,89207 | 338,08643 | | | |
| 9 | 73,10793 | 22,16992 | 13 | 106,89207 | 370,81370 | | | |
| 9 | 73,10793 | 54,89720 | 14 | 115,37867 | 28,64139 | | | |
| 9 | 73,10793 | 87,62447 | 14 | 115,37867 | 68,64139 | | | |
| 9 | 73,10793 | 120,35174 | 14 | 115,37867 | 108,64139 | | | |
| 9 | 73,10793 | 153,07901 | 14 | 115,37867 | 148,64139 | | | |
| 9 | 73,10793 | 185,80629 | | | | | | |

U sljedećem poglavlju uz vrijednosti ovih parametara geometrije, u optimizaciju se uključuje i promjena amplitude pobude, te će se istražiti ukupni utjecaj na vrijednost ciljne funkcije.

6.2.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Uz prethodno ostvarene konfiguracije elemenata na sferi, program računa dijagram zračenja i njemu pripadajuću ciljnu funkciju uz utjecaj još jednog parametra – amplitude pobude. Ovakvo istraživanje radi se u svrhu ispitivanja zajedničkog utjecaja parametara na dijagram zračenja, a ono što se očekuje je veća vrijednost ciljne funkcije.

Amplituda se mijenja po sljedećoj funkciji (za sve slučajeve radijusa sfere):

$$A = 2 \cdot \exp(\alpha \cdot k \cdot 0.0007), \quad (6-3)$$

gdje je:

α - elevacijski položaj elementa;

k – koeficijent amplitude i kreće se u rasponu: $[0, 10]$.

Istraživanje se provode na sferama radijusa 30, 35,3 i 52,9 cm, kao i u prethodnom poglavlju.

A) Optimizacija niza radijusa $r_s = 30$ cm (1,7 λ)

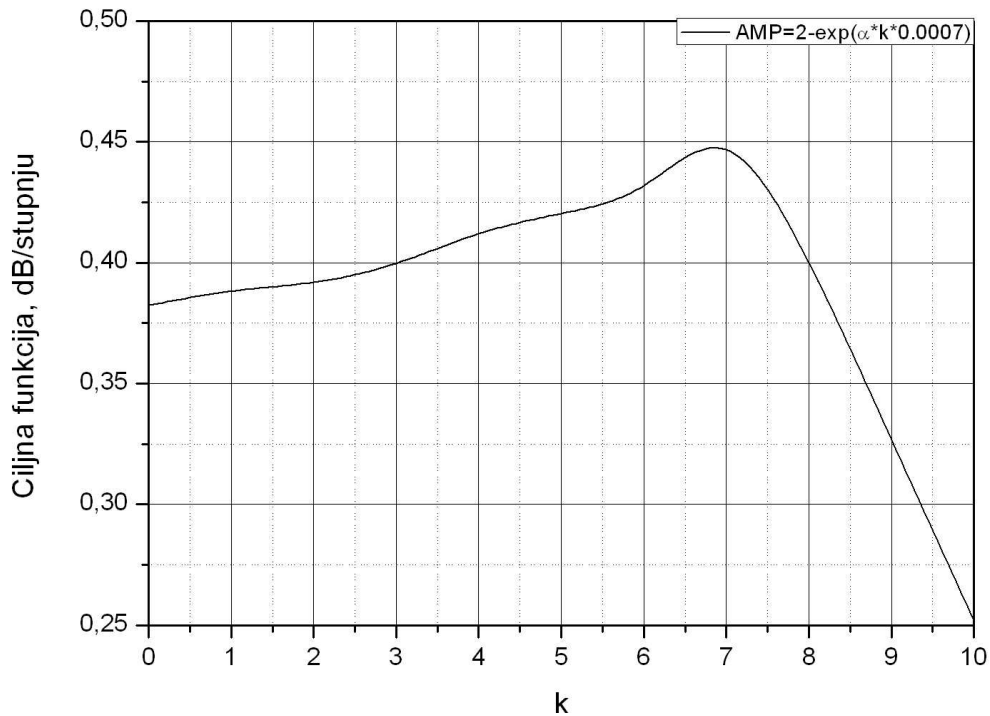
Postavke izračuna su slijedeće:

- promjena faze pobude;
- $r_s = 30$ cm;
- selekcijski kut konusa $\alpha_{\text{sel}} = 180^\circ$;
- jednomodni režim rada uz $f = 1,7$ GHz.

Ukupan utjecaj geometrijskih i pobudnih parametara na ciljnu funkciju ispitan je najprije na sferi radijusa 30 cm, a Slika 6.6. prikazuje promjenu vrijednosti ciljne funkcije CF_2 u ovisnosti o koeficijentu $k=k_a$.

Iz slike 6.6. vidljivo je da ciljna funkcija raste na vrijednost od 0,447 dB/stupnju (s 0,377 dB/stupnju – poglavlje 6.2.1.a)) za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude i koeficijent $k = 7$. Ovo povećanje potvrđuje prethodna istraživanja utjecaja amplitude pobude na dijagram zračenja. U ovom slučaju, ciljna funkcija može poprimiti veću vrijednost, ako na dijagram zračenja utječu geometrijski parametri i amplituda pobude kao pobudni parametar.

Tablica 6.9. prikazuje promjenu amplitude po prstenovima za optimalnu vrijednost koeficijenta amplitude $k=k_a=7$ po kojima se mijenja zadana funkcija amplitude kao parametra pobude.



Slika 6.7. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za $r_s = 30$ cm Leopardi konfiguracije.

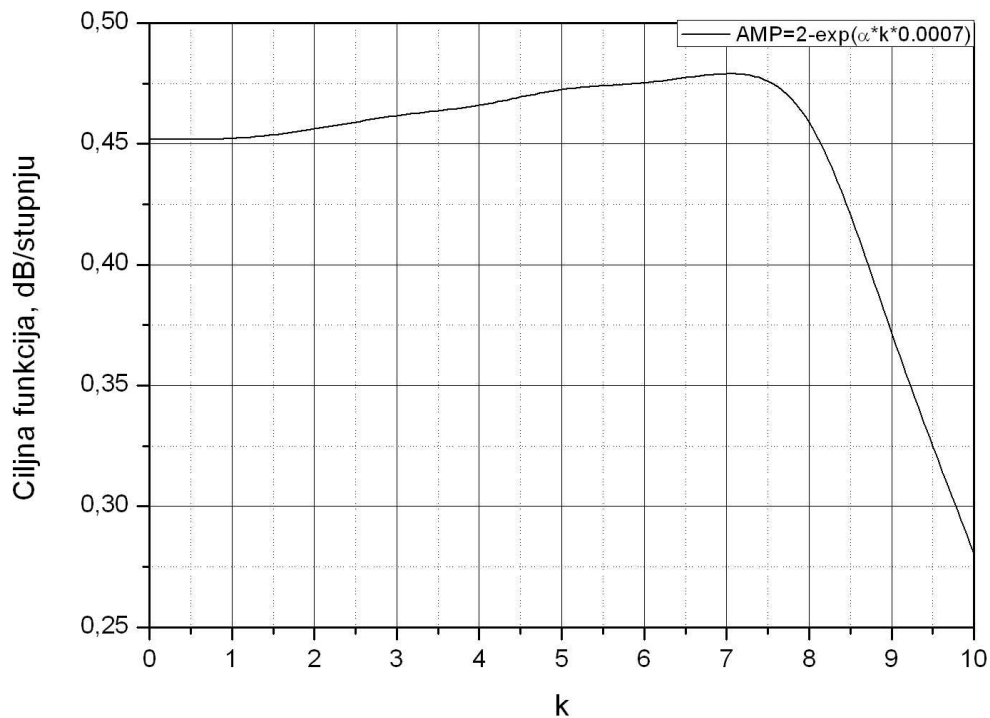
Tablica 6.9. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=7$ za sferu radijusa 30 cm Leopardi konfiguracije.

| R. br. prstena | Alfa, ° | k | Amplituda |
|----------------|----------|--------|-----------|
| 1 | 0,0000 | 7,0000 | 1,0000 |
| 2 | 14,6239 | 7,0000 | 0,9257 |
| 3 | 20,7434 | 7,0000 | 0,8930 |
| 4 | 27,1335 | 7,0000 | 0,8578 |
| 5 | 33,3982 | 7,0000 | 0,8222 |
| 6 | 39,8517 | 7,0000 | 0,7844 |
| 7 | 46,3547 | 7,0000 | 0,7450 |
| 8 | 53,0635 | 7,0000 | 0,7031 |
| 9 | 59,2164 | 7,0000 | 0,6634 |
| 10 | 64,9929 | 7,0000 | 0,6250 |
| 11 | 71,1689 | 7,0000 | 0,5827 |
| 12 | 77,7925 | 7,0000 | 0,5360 |
| 13 | 84,2518 | 7,0000 | 0,4889 |
| 14 | 90,0000 | 7,0000 | 0,4457 |
| 15 | 95,7482 | 7,0000 | 0,4013 |
| 16 | 102,2075 | 7,0000 | 0,3499 |
| 17 | 108,8311 | 7,0000 | 0,2955 |
| 18 | 115,0071 | 7,0000 | 0,2431 |
| 19 | 120,7836 | 7,0000 | 0,1927 |
| 20 | 126,9365 | 7,0000 | 0,1374 |
| 21 | 133,6453 | 7,0000 | 0,0751 |
| 22 | 140,1483 | 7,0000 | 0,0128 |
| 23 | 146,6018 | 7,0000 | -0,0510 |
| 24 | 152,8665 | 7,0000 | -0,1150 |
| 25 | 159,2566 | 7,0000 | -0,1823 |
| 26 | 165,3761 | 7,0000 | -0,2487 |
| 27 | 180,0000 | 7,0000 | -0,4157 |

B) Optimizacija niza radijusa $r_s = 35,3$ cm (2λ):

I u slučaju sfere radijusa 2λ , istražen je utjecaj geometrijskih i pobudnih parametara na dijagram zračenja. Geometrijski parametri postignuti u 6.2.1.b) poslužit će u ovom dijelu ispitivanja, amplituda se mijenja obrnuto eksponencijalno prema relaciji (6-3), a od postavki izračuna jedino se mijenja radijus sfere i iznosi $r_s = 35,3$ cm.

Slika 6.7. prikazuje ponašanje ciljne funkcije CF_2 uz promjenu koeficijenta po kojemu se mijenja amplituda pobude $k=k_a$.



Slika 6.8. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za $r_s = 35,3$ cm Leopardi konfiguracije.

Vrijednost ciljne funkcije maksimalna je za $k = 7$ i iznosi 0,479 dB/stupnju, što je porast vrijednosti u usporedbi s ciljnom funkcijom sfere istog radijusa, ali uz utjecaj isključivo geometrijskih parametara na dijagram zračenja (0,452 dB/stupnju).

Tablica 6.10. prikazuje promjenu amplitude pobude po prstenovima za optimalnu vrijednost koeficijenta amplitude i sferu radijusa 35,3 cm.

Tablica 6.10. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=7$ za sferu radijusa 35,3 cm Leopardi konfiguracije.

| R. br. prstena | Alfa, ° | $k=k_a$ | Amplituda |
|----------------|---------|---------|-----------|
| 1 | 0,0000 | 7,0000 | 1,0000 |
| 2 | 16,5705 | 7,0000 | 0,9154 |
| 3 | 24,1528 | 7,0000 | 0,8744 |
| 4 | 30,9791 | 7,0000 | 0,8361 |
| 5 | 37,8091 | 7,0000 | 0,7965 |
| 6 | 45,4010 | 7,0000 | 0,7508 |
| 7 | 53,0635 | 7,0000 | 0,7031 |
| 8 | 59,9316 | 7,0000 | 0,6587 |
| 9 | 67,7430 | 7,0000 | 0,6063 |
| 10 | 75,1684 | 7,0000 | 0,5547 |
| 11 | 82,3202 | 7,0000 | 0,5031 |

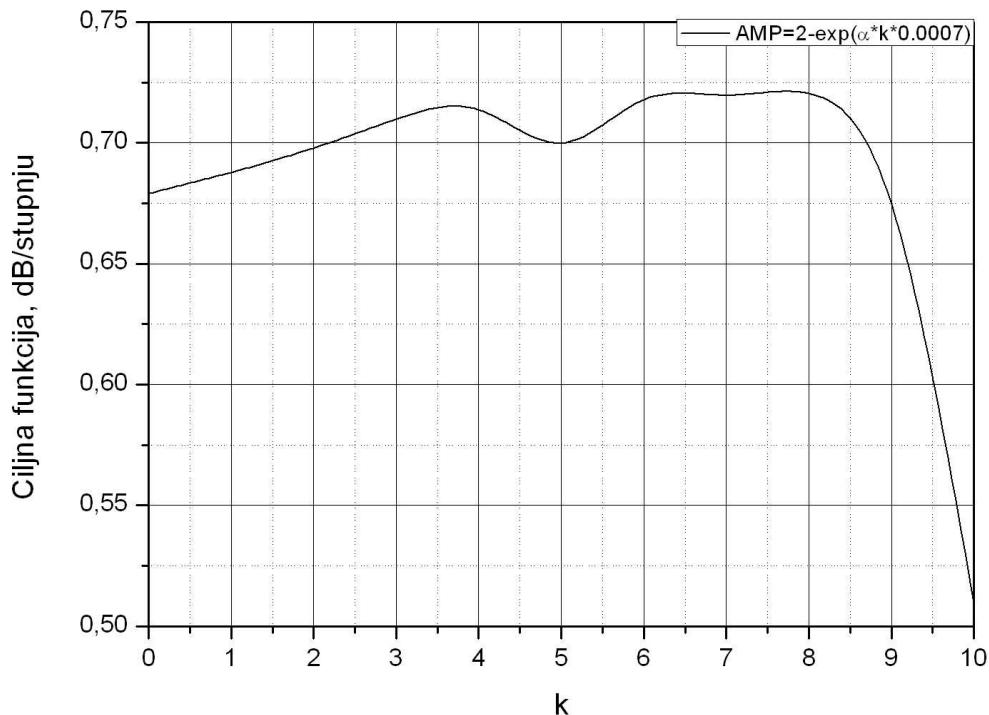
| | | | |
|----|----------|--------|---------|
| 12 | 90,0000 | 7,0000 | 0,4457 |
| 13 | 97,6798 | 7,0000 | 0,3861 |
| 14 | 104,8316 | 7,0000 | 0,3286 |
| 15 | 112,2570 | 7,0000 | 0,2666 |
| 16 | 120,0684 | 7,0000 | 0,1990 |
| 17 | 126,9365 | 7,0000 | 0,1374 |
| 18 | 134,5990 | 7,0000 | 0,0661 |
| 19 | 142,1909 | 7,0000 | -0,0072 |
| 20 | 149,0209 | 7,0000 | -0,0755 |
| 21 | 155,8472 | 7,0000 | -0,1461 |
| 22 | 163,4295 | 7,0000 | -0,2273 |
| 23 | 180,0000 | 7,0000 | -0,4157 |

Promjenom amplitude pobude elemenata niza uz promjenu geometrijskih parametara vrijednost ciljne funkcije CF_2 raste. Nadalje, povećanjem radijusa sfere uz utjecaj gore navedenih parametara ostvaruje se veća vrijednost ciljne funkcije CF_2 . Slijedi još ispitivanje ciljne funkcije dijagrama zračenja sfere radijusa 52,9 cm, a detaljan pregled dan je u 6.2.2.c).

C) Optimizacija niza radijusa $r_s = 52,9$ cm (3λ):

Posljednji sferni niz čiji su elementi raspoređeni po Leopardi algoritmu i njegov dijagram zračenja ispitani su za radijus sfere 52,9 cm.

Slika 6.8. prikazuje promjenu ciljne funkcije CF_2 uz promjenu koeficijenta po kojemu se mijenja amplituda pobude $k=k_a$.



Slika 6.9. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o koeficijentu $k=k_a$ za $r_s = 52,9$ cm Leopardi konfiguracije.

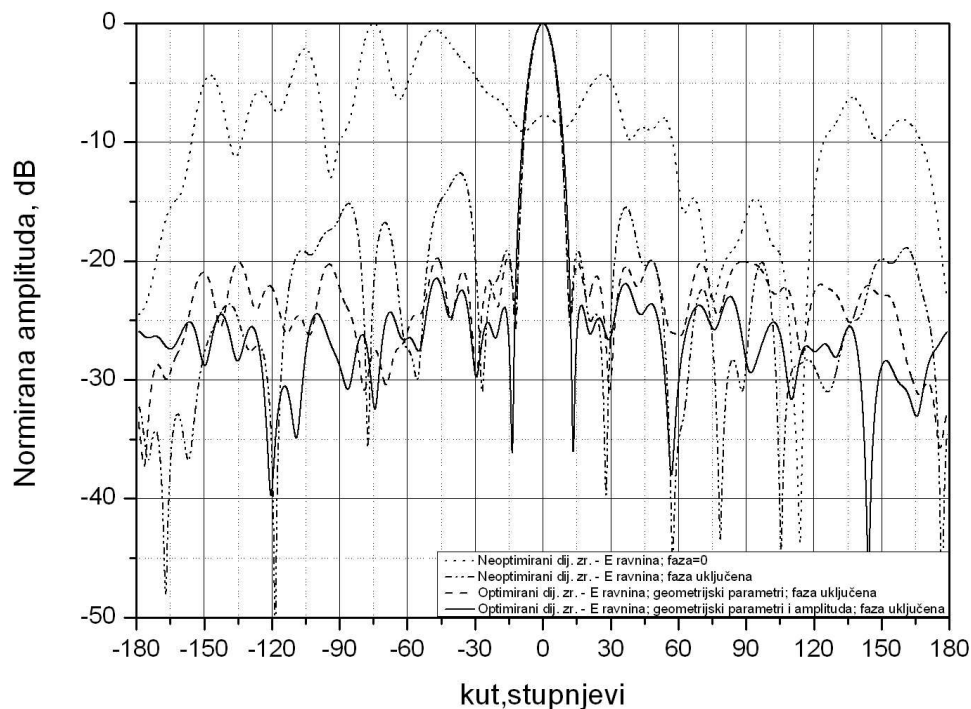
Uz promjenu koeficijenta $k=k_a$ mijenja se i iznos ciljne funkcije, te se u jednom trenutku postiže maksimalna vrijednost. Pri $k = 8$ ciljna funkcija je najveća i iznosi 0,720 dB/stupnju, što predstavlja izvjestan porast ciljne funkcije u odnosu na 0,679 dB/stupnju kada je amplituda pobude bila konstanta. Tablicom 6.11. prikazani su podaci o koeficijentu amplitude i amplitudi koja se mijenja po prstenovima na kojima se nalaze antenski elementi Leopardi konfiguracije.

Tablica 6.11. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=8$ za sferu radijusa 52,9 cm Leopardi konfiguracije.

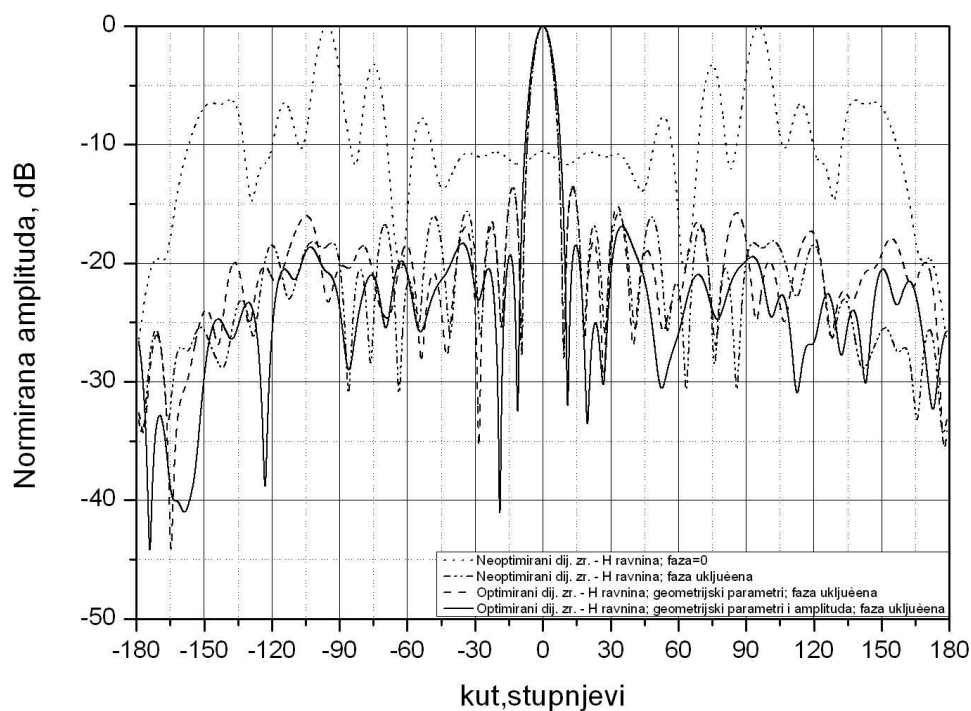
| R. br. prstena | Alfa, ° | $k=k_a$ | Amplituda |
|----------------|----------|---------|-----------|
| 1 | 0,0000 | 8,0000 | 1,0000 |
| 2 | 14,3243 | 8,0000 | 0,9165 |
| 3 | 23,1456 | 8,0000 | 0,8616 |
| 4 | 31,0081 | 8,0000 | 0,8104 |
| 5 | 39,2245 | 8,0000 | 0,7544 |
| 6 | 47,8693 | 8,0000 | 0,6926 |
| 7 | 56,4089 | 8,0000 | 0,6285 |
| 8 | 64,6213 | 8,0000 | 0,5640 |
| 9 | 73,1079 | 8,0000 | 0,4941 |
| 10 | 81,6523 | 8,0000 | 0,4203 |
| 11 | 90,0000 | 8,0000 | 0,3447 |
| 12 | 98,3477 | 8,0000 | 0,2655 |
| 13 | 106,8921 | 8,0000 | 0,1804 |
| 14 | 115,3787 | 8,0000 | 0,0919 |
| 15 | 123,5911 | 8,0000 | 0,0021 |
| 16 | 132,1307 | 8,0000 | -0,0958 |
| 17 | 140,7755 | 8,0000 | -0,1997 |
| 18 | 148,9919 | 8,0000 | -0,3033 |
| 19 | 156,8544 | 8,0000 | -0,4070 |
| 20 | 165,6757 | 8,0000 | -0,5289 |
| 22 | 180,0000 | 8,0000 | -0,7401 |

Rezultati istraživanja u poglavlju 6.2. potvrđuju tvrdnju da je vrijednost ciljne funkcije veća ukoliko se dijagramom zračenja upravlja promjenom više relevantnih parametara u isto vrijeme - parametri geometrije i pobude.

Za konfiguraciju po Leopardi algoritmu najveća vrijednosti ciljne funkcije CF_2 postiže se za sferu radijusa 52,9 cm na koju je moguće rasporediti maksimalno 145 antena. Za ovu konfiguraciju na slici 6.9. prikazani su dijagrami zračenja za različit broj parametara koji utječu na porast ciljne funkcije. Iz Slike 6.9. vidljivo je smanjenje razine bočnih latica uz optimizaciju dijagrama zračenja te utjecaj većeg broja parametara optimizacije. Dijagram zračenja sa najvećom vrijednošću ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 su oni kod kojih je optimizacija izvedena za geometrijske i pobudne parametre.



a)



b)

Slika 6.10. Dijagram zračenja Leopardi konfiguracije uz različit broj relevantnih parametara optimizacije za $r_s=52,9$ cm: a) E ravnina, b) H ravnina.

Tablica 6.12. prikazuje vrijednost ciljne funkcije za svaki pojedini slučaj ($f=1,7$ GHz, $r_s=52,9$ cm, $\alpha_{sel}=180^\circ$, br. antena= 145).

Tablica 6.12. Vrijednosti ciljne funkcije CF_2 Leopardi konfiguracije uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza.

| | Faza pobude = 0, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amplituda pobude =1, Promjena parametara geometrije | Promjena faze i amplitude pobude , Promjena parametara geometrije |
|---|-------------------------------------|---|--|---|
| Vrijednost ciljne funkcije CF_2 dB/stupnju | 0 | 0,542 | 0,679 | 0,720 |

6.3. SPIRALNA KONFIGURACIJA

Kao i prethodne dvije, spiralna je konfiguracija obrađena na isti način. Prvo se analizira utjecaj geometrijskih parametara na ciljnu funkciju dijagrama zračenja, a zatim utjecaj parametara geometrije i pobude zajedno. Najprije se određuje najbolji položaj antena na sferi za određeni radijus sfere, a nakon toga pobuda koja doprinosi dodatnom oblikovanju dijagrama zračenja te tako i najvećem iznosu ciljne funkcije. Poglavlje 6.3.1. i 6.3.2. daju detaljan pregled ovakve optimizacije spiralne konfiguracije elemenata.

6.3.1. Utjecaj promjene geometrijskih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

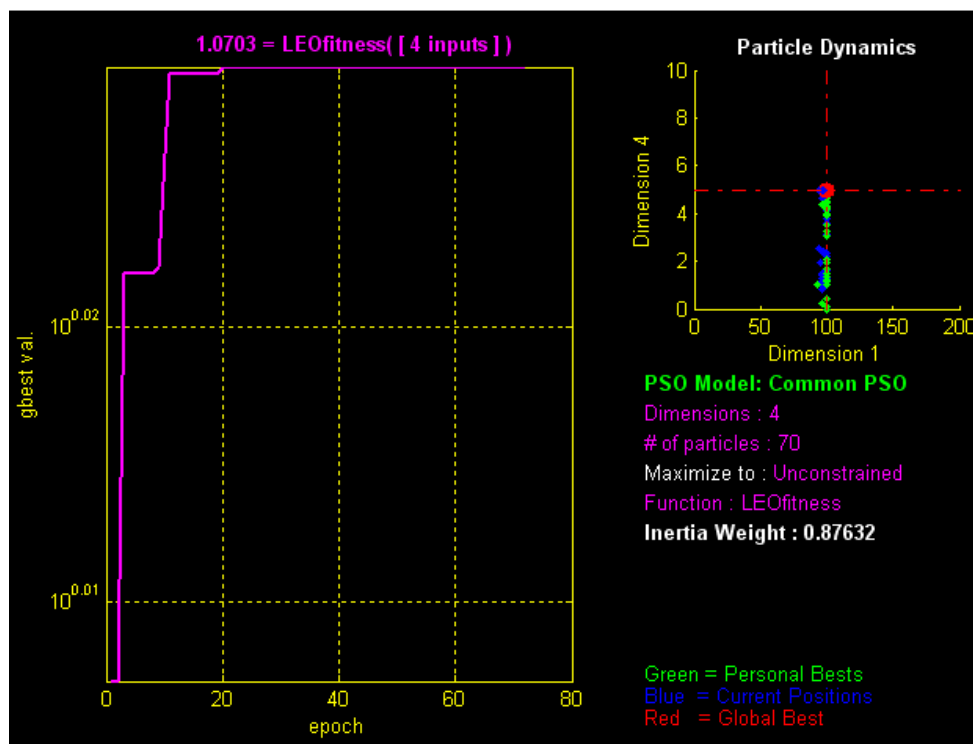
U geometrijske parametre koji se mijenjaju u ovom dijelu istraživanja spadaju radijus sfere r_s , broj antena, te položaj antena. Seleksijski kut α je 180° , a parametri se kreću u sljedećim granicama:

- radijus sfere $r_s \in [30, 100]$;
- broj antena $\in [40, 400]$;
- koeficijent promjene elevacijskog kuta $k_\alpha \in [0, 5]$;
- koeficijent promjene azimutalnog kuta $k_\beta \in [0, 5]$;
- promjena faze pobude;
- seleksijski kut konusa $\alpha_{sel} = 180^\circ$;
- jednomodni režim rada uz $f = 1,7$ GHz,

gdje su:

koeficijenti k_α i k_β su kutevi koji se superponiraju na postojeće, funkcijski određene vrijednosti azimutalnih i elevacijskih kuteva spiralne konfiguracije (poglavlje 4.4.2.). Promjena vrijednosti ovih koeficijenata omogućava promjenu gustoće spiralnog rasporeda antena. Računalna rutina ima ugrađen uvjet osiguranja minimalno dozvoljene udaljenosti dvaju elementa od $0,4\lambda$.

Slika 6.10. prikazuje promjenu ciljne funkcije CF_2 do postizanja maksimalne vrijednosti uz promjenu 4 geometrijska parametra (na slici 4 inputs).



Slika 6.11. Ciljna funkcija CF_2 dijagrama zračenja spiralne konfiguracije uz promjenu 4 geometrijska parametra izračunata uz pomoć PSO algoritma.

Najveća vrijednost ciljne funkcije je 1,070 dB/stupnju, a ostvarena je za sljedeće iznose parametara:

- radijus sfere $r_s = 100$ cm,
- broj antena = 284,
- koeficijent promjene elevacijskog kuta $k_\alpha = 0^\circ$,
- koeficijent promjene azimutalnog kuta $k_\beta = 5^\circ$.

Porast broja antena rezultira povećanjem vrijednosti ciljnih funkcija. Definiranom minimalnom udaljenošću antena na sferi, taj broj antena za određeni radijus je konačan i

prethodne vrijednosti optimalanog radijusa i broja antena za taj radijus uvjetovane su upravo ovom minimalnom udaljenošću.

Vrijednosti kuteva postignutih ovom optimizacijom prikazane su u tablici 6.13. U sljedećem poglavlju obrađen je zajednički utjecaj obje vrste parametara na iznos ciljne funkcije i dijagrama zračenja.

Tablica 6.13. Optimalan položaj 284 antene spiralne konfiguracije sfere radijusa 100 cm.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° | | | |
|----------------|---------|----------|-----|----------|----------|
| 1 | 0,0000 | 5,0000 | 57 | 52,8258 | 106,4428 |
| 2 | 6,8158 | 105,1544 | 58 | 53,3323 | 91,0819 |
| 3 | 9,6447 | 362,0214 | 59 | 53,8355 | 75,8228 |
| 4 | 11,8193 | 288,9657 | 60 | 54,3354 | 60,6621 |
| 5 | 13,6558 | 229,2095 | 61 | 54,8323 | 45,5970 |
| 6 | 15,2768 | 177,3665 | 62 | 55,3261 | 30,6245 |
| 7 | 16,7449 | 130,9134 | 63 | 55,8170 | 15,7418 |
| 8 | 18,0974 | 88,4312 | 64 | 56,3051 | 360,9463 |
| 9 | 19,3585 | 49,0291 | 65 | 56,7904 | 346,2354 |
| 10 | 20,5452 | 12,1049 | 66 | 57,2731 | 331,6065 |
| 11 | 21,6696 | 337,2290 | 67 | 57,7531 | 317,0574 |
| 12 | 22,7410 | 304,0822 | 68 | 58,2306 | 302,5856 |
| 13 | 23,7667 | 272,4200 | 69 | 58,7057 | 288,1891 |
| 14 | 24,7522 | 242,0498 | 70 | 59,1783 | 273,8656 |
| 15 | 25,7022 | 212,8171 | 71 | 59,6487 | 259,6131 |
| 16 | 26,6206 | 184,5955 | 72 | 60,1168 | 245,4296 |
| 17 | 27,5106 | 157,2800 | 73 | 60,5827 | 231,3132 |
| 18 | 28,3747 | 130,7824 | 74 | 61,0465 | 217,2619 |
| 19 | 29,2153 | 105,0276 | 75 | 61,5083 | 203,2741 |
| 20 | 30,0345 | 79,9513 | 76 | 61,9680 | 189,3478 |
| 21 | 30,8338 | 55,4977 | 77 | 62,4258 | 175,4815 |
| 22 | 31,6150 | 31,6180 | 78 | 62,8816 | 161,6736 |
| 23 | 32,3791 | 289852 | 79 | 63,3356 | 147,9223 |
| 24 | 33,1276 | 345,4138 | 80 | 63,7879 | 134,2261 |
| 25 | 33,8613 | 323,0177 | 81 | 64,2383 | 120,5836 |
| 26 | 34,5813 | 301,0509 | 82 | 64,6871 | 106,9933 |
| 27 | 35,2884 | 279,4863 | 83 | 65,1342 | 93,4538 |
| 28 | 35,9834 | 258,2993 | 84 | 65,5797 | 79,9636 |
| 29 | 36,6670 | 237,4678 | 85 | 66,0236 | 66,5215 |
| 30 | 37,3397 | 216,9716 | 86 | 66,4660 | 53,1261 |
| 31 | 38,0023 | 196,7923 | 87 | 66,9069 | 39,7761 |
| 32 | 38,6552 | 176,9129 | 88 | 67,3464 | 26,4703 |
| 33 | 39,2990 | 157,3181 | 89 | 67,7845 | 13,2075 |
| 34 | 39,9340 | 137,9935 | 90 | 68,2212 | 359,9865 |
| 35 | 40,5607 | 118,9259 | 91 | 68,6566 | 346,8062 |
| 36 | 41,1795 | 100,1032 | 92 | 69,0906 | 333,6654 |
| 37 | 41,7908 | 81,5139 | 93 | 69,5235 | 320,5630 |
| 38 | 42,3949 | 63,1476 | 94 | 69,9551 | 307,4979 |
| 39 | 42,9920 | 44,9943 | 95 | 70,3856 | 294,4691 |
| 40 | 43,5826 | 27,0450 | 96 | 70,8148 | 281,4756 |
| 41 | 44,1668 | 369505 | 97 | 71,2430 | 268,5163 |
| 42 | 44,7450 | 351,7244 | 98 | 71,6701 | 255,5902 |
| 43 | 45,3173 | 334,3375 | 99 | 72,0962 | 242,6964 |
| 44 | 45,8840 | 317,1232 | 100 | 72,5212 | 229,8340 |
| 45 | 46,4454 | 300,0748 | 101 | 72,9452 | 217,0020 |
| 46 | 47,0015 | 283,1861 | 102 | 73,3683 | 204,1994 |
| 47 | 47,5527 | 266,4510 | 103 | 73,7904 | 191,4254 |
| 48 | 48,0991 | 249,8640 | 104 | 74,2116 | 178,6792 |
| 49 | 48,6408 | 233,4196 | 105 | 74,6320 | 165,9597 |
| 50 | 49,1781 | 217,1128 | 106 | 75,0515 | 153,2663 |
| 51 | 49,7110 | 200,9389 | 107 | 75,4702 | 140,5980 |
| 52 | 50,2398 | 184,8931 | 108 | 75,8881 | 127,9541 |
| 53 | 50,7645 | 168,9713 | 109 | 76,3053 | 115,3336 |
| 54 | 51,2854 | 153,1692 | 110 | 76,7217 | 102,7359 |
| 55 | 51,8025 | 137,4829 | 111 | 77,1373 | 90,1601 |
| 56 | 52,3159 | 121,9086 | 112 | 77,5523 | 77,6055 |
| | | | 113 | 77,9667 | 65,0713 |
| | | | 114 | 78,3804 | 52,5568 |
| | | | 115 | 78,7935 | 40,0611 |
| | | | 116 | 79,2060 | 27,5837 |
| | | | 117 | 79,6179 | 15,1237 |
| | | | 118 | 80,0293 | 362,6804 |
| | | | 119 | 80,4402 | 350,2531 |
| | | | 120 | 80,8505 | 337,8412 |
| | | | 121 | 81,2604 | 325,4439 |
| | | | 122 | 81,6699 | 313,0605 |
| | | | 123 | 82,0789 | 300,6905 |
| | | | 124 | 82,4875 | 288,3330 |
| | | | 125 | 82,8958 | 275,9875 |
| | | | 126 | 83,3036 | 263,6532 |
| | | | 127 | 83,7112 | 251,3296 |
| | | | 128 | 84,1184 | 239,0159 |
| | | | 129 | 84,5253 | 226,7116 |
| | | | 130 | 84,9319 | 214,4159 |
| | | | 131 | 85,3383 | 202,1283 |
| | | | 132 | 85,7445 | 189,8481 |
| | | | 133 | 86,1504 | 177,5747 |
| | | | 134 | 86,5561 | 165,3075 |
| | | | 135 | 86,9617 | 153,0458 |
| | | | 136 | 87,3671 | 140,7890 |
| | | | 137 | 87,7724 | 128,5365 |
| | | | 138 | 88,1776 | 116,2877 |
| | | | 139 | 88,5826 | 104,0419 |
| | | | 140 | 88,9877 | 91,7986 |
| | | | 141 | 89,3926 | 79,5571 |
| | | | 142 | 89,7975 | 67,3169 |
| | | | 143 | 90,2025 | 55,0772 |
| | | | 144 | 90,6074 | 42,8376 |
| | | | 145 | 91,0123 | 30,5973 |
| | | | 146 | 91,4174 | 18,3559 |
| | | | 147 | 91,8224 | 6,1125 |
| | | | 148 | 92,2276 | 353,8668 |
| | | | 149 | 92,6329 | 341,6180 |
| | | | 150 | 93,0383 | 329,3655 |
| | | | 151 | 93,4439 | 317,1087 |
| | | | 152 | 93,8496 | 304,8470 |
| | | | 153 | 94,2555 | 292,5797 |
| | | | 154 | 94,6617 | 280,3063 |
| | | | 155 | 95,0681 | 268,0261 |
| | | | 156 | 95,4747 | 255,7385 |
| | | | 157 | 95,8816 | 243,4429 |
| | | | 158 | 96,2888 | 231,1385 |
| | | | 159 | 96,6964 | 218,8249 |
| | | | 160 | 97,1042 | 206,5012 |
| | | | 161 | 97,5125 | 194,1670 |
| | | | 162 | 97,9211 | 181,8215 |
| | | | 163 | 98,3301 | 169,4640 |
| | | | 164 | 98,7396 | 157,0939 |
| | | | 165 | 99,1495 | 144,7106 |
| | | | 166 | 99,5598 | 132,3133 |
| | | | 167 | 99,9707 | 119,9013 |
| | | | 168 | 100,3821 | 107,4741 |
| | | | 169 | 100,7940 | 95,0308 |
| | | | 170 | 101,2065 | 82,5708 |
| | | | 171 | 101,6196 | 70,0933 |
| | | | 172 | 102,0333 | 57,5976 |
| | | | 173 | 102,4477 | 45,0831 |
| | | | 174 | 102,8627 | 32,5489 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| 175 | 103,2783 | 19,9943 |
| 176 | 103,6947 | 834763 |
| 177 | 104,1119 | 354,8208 |
| 178 | 104,5298 | 342,2004 |
| 179 | 104,9485 | 329,5564 |
| 180 | 105,3680 | 316,8882 |
| 181 | 105,7884 | 304,1947 |
| 182 | 106,2096 | 291,4753 |
| 183 | 106,6317 | 278,7290 |
| 184 | 107,0548 | 265,9550 |
| 185 | 107,4788 | 253,1525 |
| 186 | 107,9038 | 240,3204 |
| 187 | 108,3299 | 227,4580 |
| 188 | 108,7570 | 214,5642 |
| 189 | 109,1852 | 201,6382 |
| 190 | 109,6144 | 188,6789 |
| 191 | 110,0449 | 175,6853 |
| 192 | 110,4765 | 162,6565 |
| 193 | 110,9094 | 149,5915 |
| 194 | 111,3434 | 136,4891 |
| 195 | 111,7788 | 123,3482 |
| 196 | 112,2155 | 110,1679 |
| 197 | 112,6536 | 96,9469 |
| 198 | 113,0931 | 83,6841 |
| 199 | 113,5340 | 70,3784 |
| 200 | 113,9764 | 57,0284 |
| 201 | 114,4203 | 43,6330 |
| 202 | 114,8658 | 30,1908 |
| 203 | 115,3129 | 16,7007 |
| 204 | 115,7617 | 363,1611 |
| 205 | 116,2121 | 349,5708 |
| 206 | 116,6644 | 335,9283 |
| 207 | 117,1184 | 322,2322 |
| 208 | 117,5742 | 308,4809 |
| 209 | 118,0320 | 294,6729 |
| 210 | 118,4917 | 280,8066 |
| 211 | 118,9535 | 266,8804 |
| 212 | 119,4173 | 252,8925 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| 213 | 119,8832 | 238,8413 |
| 214 | 120,3513 | 224,7248 |
| 215 | 120,8217 | 210,5413 |
| 216 | 121,2943 | 196,2888 |
| 217 | 121,7694 | 181,9653 |
| 218 | 122,2469 | 167,5688 |
| 219 | 122,7269 | 153,0971 |
| 220 | 123,2096 | 138,5479 |
| 221 | 123,6949 | 123,9191 |
| 222 | 124,1830 | 109,2081 |
| 223 | 124,6739 | 94,4126 |
| 224 | 125,1677 | 79,5299 |
| 225 | 125,6646 | 64,5574 |
| 226 | 126,1645 | 49,4923 |
| 227 | 126,6677 | 34,3317 |
| 228 | 127,1742 | 19,0725 |
| 229 | 127,6841 | 363,7117 |
| 230 | 128,1975 | 348,2458 |
| 231 | 128,7146 | 332,6715 |
| 232 | 129,2355 | 316,9852 |
| 233 | 129,7602 | 301,1831 |
| 234 | 130,2890 | 285,2613 |
| 235 | 130,8219 | 269,2156 |
| 236 | 131,3592 | 253,0416 |
| 237 | 131,9009 | 236,7348 |
| 238 | 132,4473 | 220,2905 |
| 239 | 132,9985 | 203,7034 |
| 240 | 133,5546 | 186,9683 |
| 241 | 134,1160 | 170,0796 |
| 242 | 134,6827 | 153,0312 |
| 243 | 135,2550 | 135,8170 |
| 244 | 135,8332 | 118,4300 |
| 245 | 136,4174 | 100,8634 |
| 246 | 137,0080 | 83,1094 |
| 247 | 137,6051 | 65,1601 |
| 248 | 138,2092 | 47,0069 |
| 249 | 138,8205 | 28,6405 |
| 250 | 139,4393 | 10,0513 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| 251 | 140,0660 | 351,2285 |
| 252 | 140,7010 | 332,1609 |
| 253 | 141,3448 | 312,8363 |
| 254 | 141,9977 | 293,2415 |
| 255 | 142,6603 | 273,3622 |
| 256 | 143,3330 | 253,1829 |
| 257 | 144,0166 | 232,6867 |
| 258 | 144,7116 | 211,8552 |
| 259 | 145,4187 | 190,6682 |
| 260 | 146,1387 | 169,1035 |
| 261 | 146,8724 | 147,1367 |
| 262 | 147,6209 | 124,7406 |
| 263 | 148,3850 | 101,8851 |
| 264 | 149,1662 | 78,5365 |
| 265 | 149,9655 | 54,6567 |
| 266 | 150,7847 | 30,2031 |
| 267 | 151,6253 | 5,1268 |
| 268 | 152,4894 | 339,3721 |
| 269 | 153,3794 | 312,8745 |
| 270 | 154,2978 | 285,5589 |
| 271 | 155,2478 | 257,3373 |
| 272 | 156,2333 | 228,1046 |
| 273 | 157,2590 | 197,7345 |
| 274 | 158,3304 | 166,0722 |
| 275 | 159,4548 | 132,9255 |
| 276 | 160,6415 | 98,0495 |
| 277 | 161,9026 | 61,1253 |
| 278 | 163,2551 | 21,7233 |
| 279 | 164,7232 | 339,2411 |
| 280 | 166,3442 | 292,7880 |
| 281 | 168,1807 | 240,9449 |
| 282 | 170,3553 | 181,1888 |
| 283 | 173,1842 | 108,1330 |
| 284 | 180,0000 | 5,0000 |

6.3.2. Utjecaj promjene geometrijskih i pobudnih parametara niza na dijagram zračenja - ciljnu funkciju

Uz prethodne, optimizacijom određene vrijednosti geometrijskih parametara optimizacije, u svrhu dodatnog povećanja iznosa ciljne funkcije, na zračenje sfernog niza utjecat će još amplituda pobude. Amplitude pobude mijenja se prema eksponencijalnoj funkciji definiranoj relacijom :

$$A = \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0.01). \quad (6-6)$$

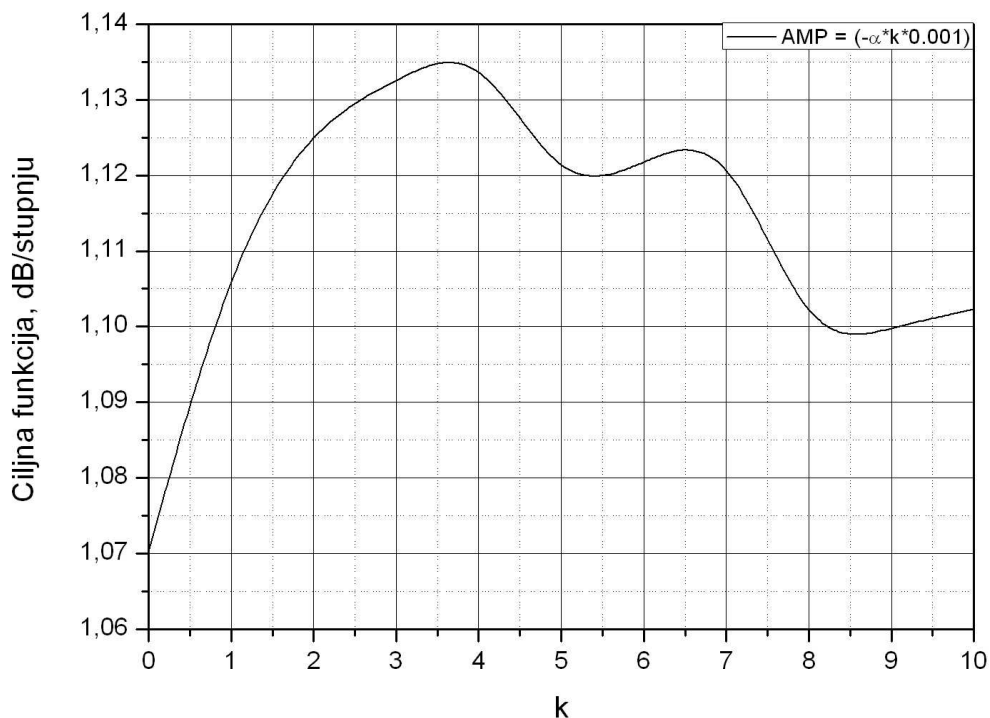
gdje α predstavlja eleveacijski kut položaja svakog elementa, a k_a koeficijent po kojemu se amplituda pobude eksponencijalno mijenja u rasponu $k_a \in [0,10]$.

Preostali geometrijski i pobudni parametri uključeni u optimizaciju poprimaju vrijednosti dobijene optimizacijom u prethodnom poglavlju 6.3.1. i iznose:

- radijus sfere $r_s = 100$ cm,
- broj antena = 284,

- koeficijent promjene elevacijskog kuta $k_\alpha = 0^\circ$,
- koeficijent promjene azimutalnog kuta $k_\beta = 5^\circ$,
- promjena faze pobude;
- selekcijski kut konusa $\alpha_{\text{sel}} = 180^\circ$,
- jednomodni režim rada: $f = 1,7$ GHz,

Ciljna funkcija postiže svoj maksimum na $k_a = 4$ i iznosi 1,135 dB/stupnju. Sljedeća slika prikazuje promjenu ciljne funkcije u ovisnosti o koeficijentu k_a po kojem se mijenja amplituda pobude.



Slika 6.12. Ciljna funkcija CF_2 u ovisnosti o promjeni koeficijenta amplitude $k=k_a$.

U prethodnoj optimizaciji geometrijskih parametara (vidi 6.3.1.) za radijus sfere 100 cm, na frekvenciji 1,7 GHz, pri selekcijskom kutu $\alpha_{\text{sel}} = 180^\circ$ i za broj antena 284, postignuta je najveća vrijednost ciljne funkcije. Uz takav optimalan raspored antenskih elemenata na sferi te uz dodatan pomak azimutalnog kuta u odnosu na originalni raspored ($k_\alpha = 0^\circ$, $k_\beta = 5^\circ$), postiže se najveći iznos ciljne funkcije. Optimizacija spiralnog niza korištenjem geometrijskih parametara je ovim završena.

Nakon toga, optimizacija dijagrama zračenja nastavlja se uz upotrebu jednog dodatnog parametra pobude (uz fazu pobude) – amplitude pobude. Funkcija po kojoj se mijenja amplituda pobude je eksponencijalna (relacija (6-6)) s parametrima α i $k=k_a$. Kako k raste, raste i iznos ciljne funkcije, te u jednom trenutku postiže svoj maksimum koji iznosi 1,135

dB/stupnju. Ta vrijednost je veća od vrijednosti postignute pri optimizaciji korištenjem samo geometrijskih parametara (u poglavlju 6.3.1.) koja iznosi 1,070 dB/stupnju.

Tablicom 6.14. dana je promjena amplitude po svakom pojedinom elementu na sferi, a obuhvaćeno je 284 elemenata ($\alpha_{sel}=180^\circ$).

Slika 6.12. prikazuje dijagrame zračenja sfernog antenskog niza spiralnog rasporeda od najlošijeg slučaja - neoptimiranog dijagrama, pa sve do najboljeg - kada se dijagram zračenja optimira po prethodno navedenim geometrijskim i pobudnim parametrima.

Tablica 6.14. Vrijednosti parametara dobivenih optimizacijom dijagrama zračenja sfernog niza spiralnog rasporeda radijus sfere $r_s = 100$ cm, za koeficijent amplitude $k_a=4$.

| R. br. prstena | Alfa, ° | k | Amplituda |
|----------------|---------|--------|-----------|
| 1 | 0,0000 | 4,0000 | 1,0000 |
| 2 | 2285841 | 4,0000 | 0,7614 |
| 3 | 1661003 | 4,0000 | 0,6799 |
| 4 | 2298778 | 4,0000 | 0,6233 |
| 5 | 13,6558 | 4,0000 | 0,5791 |
| 6 | 15,2768 | 4,0000 | 0,5428 |
| 7 | 16,7449 | 4,0000 | 0,5118 |
| 8 | 18,0974 | 4,0000 | 0,4849 |
| 9 | 19,3585 | 4,0000 | 0,4610 |
| 10 | 20,5452 | 4,0000 | 0,4396 |
| 11 | 21,6696 | 4,0000 | 0,4203 |
| 12 | 22,7410 | 4,0000 | 0,4027 |
| 13 | 23,7667 | 4,0000 | 0,3865 |
| 14 | 24,7522 | 4,0000 | 0,3715 |
| 15 | 25,7022 | 4,0000 | 0,3577 |
| 16 | 26,6206 | 4,0000 | 0,3448 |
| 17 | 27,5106 | 4,0000 | 0,3327 |
| 18 | 28,3747 | 4,0000 | 0,3214 |
| 19 | 29,2153 | 4,0000 | 0,3108 |
| 20 | 30,0345 | 4,0000 | 0,3008 |
| 21 | 30,8338 | 4,0000 | 0,2913 |
| 22 | 31,6150 | 4,0000 | 0,2824 |
| 23 | 32,3791 | 4,0000 | 0,2739 |
| 24 | 33,1276 | 4,0000 | 0,2658 |
| 25 | 33,8613 | 4,0000 | 0,2581 |
| 26 | 34,5813 | 4,0000 | 0,2508 |
| 27 | 35,2884 | 4,0000 | 0,2438 |
| 28 | 35,9834 | 4,0000 | 0,2371 |
| 29 | 36,6670 | 4,0000 | 0,2307 |
| 30 | 37,3397 | 4,0000 | 0,2246 |
| 31 | 38,0023 | 4,0000 | 0,2187 |
| 32 | 38,6552 | 4,0000 | 0,2131 |
| 33 | 39,2990 | 4,0000 | 0,2076 |
| 34 | 39,9340 | 4,0000 | 0,2024 |
| 35 | 40,5607 | 4,0000 | 0,1974 |
| 36 | 41,1795 | 4,0000 | 0,1926 |
| 37 | 41,7908 | 4,0000 | 0,1879 |
| 38 | 42,3949 | 4,0000 | 0,1835 |
| 39 | 42,9920 | 4,0000 | 0,1791 |
| 40 | 43,5826 | 4,0000 | 0,1749 |
| 41 | 44,1668 | 4,0000 | 0,1709 |
| 42 | 44,7450 | 4,0000 | 0,1670 |
| 43 | 45,3173 | 4,0000 | 0,1632 |
| 44 | 45,8840 | 4,0000 | 0,1596 |
| 45 | 46,4454 | 4,0000 | 0,1560 |
| 46 | 47,0015 | 4,0000 | 0,1526 |
| 47 | 47,5527 | 4,0000 | 0,1493 |
| 48 | 48,0991 | 4,0000 | 0,1460 |
| 49 | 48,6408 | 4,0000 | 0,1429 |
| 50 | 49,1781 | 4,0000 | 0,1399 |
| 51 | 49,7110 | 4,0000 | 0,1369 |
| 52 | 50,2398 | 4,0000 | 0,1340 |
| 53 | 50,7645 | 4,0000 | 0,1313 |
| 54 | 51,2854 | 4,0000 | 0,1286 |
| 55 | 51,8025 | 4,0000 | 0,1259 |
| 56 | 52,3159 | 4,0000 | 0,1234 |
| 57 | 52,8258 | 4,0000 | 0,1209 |
| 58 | 53,3323 | 4,0000 | 0,1184 |
| 59 | 53,8355 | 4,0000 | 0,1161 |
| 60 | 54,3354 | 4,0000 | 0,1138 |
| 61 | 54,8323 | 4,0000 | 0,1115 |
| 62 | 55,3261 | 4,0000 | 0,1094 |
| 63 | 55,8170 | 4,0000 | 0,1072 |
| 64 | 56,3051 | 4,0000 | 0,1052 |
| 65 | 56,7904 | 4,0000 | 0,1031 |
| 66 | 57,2731 | 4,0000 | 0,1012 |
| 67 | 57,7531 | 4,0000 | 0,0992 |
| 68 | 58,2306 | 4,0000 | 0,0974 |
| 69 | 58,7057 | 4,0000 | 0,0955 |
| 70 | 59,1783 | 4,0000 | 0,0937 |
| 71 | 59,6487 | 4,0000 | 0,0920 |
| 72 | 60,1168 | 4,0000 | 0,0903 |
| 73 | 60,5827 | 4,0000 | 0,0886 |
| 74 | 61,0465 | 4,0000 | 0,0870 |
| 75 | 61,5083 | 4,0000 | 0,0854 |
| 76 | 61,9680 | 4,0000 | 0,0839 |
| 77 | 62,4258 | 4,0000 | 0,0823 |
| 78 | 62,8816 | 4,0000 | 0,0808 |
| 79 | 63,3356 | 4,0000 | 0,0794 |
| 80 | 63,7879 | 4,0000 | 0,0780 |
| 81 | 64,2383 | 4,0000 | 0,0766 |
| 82 | 64,6871 | 4,0000 | 0,0752 |
| 83 | 65,1342 | 4,0000 | 0,0739 |
| 84 | 65,5797 | 4,0000 | 0,0726 |
| 85 | 66,0236 | 4,0000 | 0,0713 |
| 86 | 66,4660 | 4,0000 | 0,0700 |
| 87 | 66,9069 | 4,0000 | 0,0688 |
| 88 | 67,3464 | 4,0000 | 0,0676 |
| 89 | 67,7845 | 4,0000 | 0,0664 |
| 90 | 68,2212 | 4,0000 | 0,0653 |
| 91 | 68,6566 | 4,0000 | 0,0642 |
| 92 | 69,0906 | 4,0000 | 0,0631 |
| 93 | 69,5235 | 4,0000 | 0,0620 |
| 94 | 69,9551 | 4,0000 | 0,0609 |
| 95 | 70,3856 | 4,0000 | 0,0599 |
| 96 | 70,8148 | 4,0000 | 0,0589 |
| 97 | 71,2430 | 4,0000 | 0,0579 |
| 98 | 71,6701 | 4,0000 | 0,0569 |
| 99 | 72,0962 | 4,0000 | 0,0559 |

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

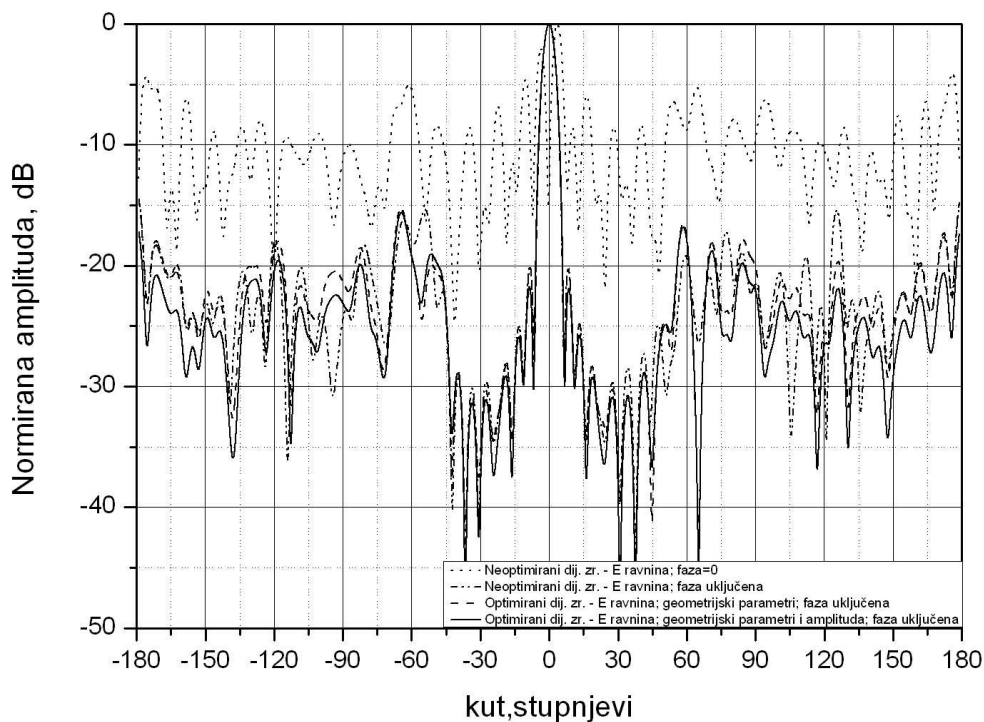
| | | | |
|-----|----------|--------|--------|
| 100 | 72,5212 | 4,0000 | 0,0550 |
| 101 | 72,9452 | 4,0000 | 0,0541 |
| 102 | 73,3683 | 4,0000 | 0,0531 |
| 103 | 73,7904 | 4,0000 | 0,0523 |
| 104 | 74,2116 | 4,0000 | 0,0514 |
| 105 | 74,6320 | 4,0000 | 0,0505 |
| 106 | 75,0515 | 4,0000 | 0,0497 |
| 107 | 75,4702 | 4,0000 | 0,0489 |
| 108 | 75,8881 | 4,0000 | 0,0480 |
| 109 | 76,3053 | 4,0000 | 0,0473 |
| 110 | 76,7217 | 4,0000 | 0,0465 |
| 111 | 77,1373 | 4,0000 | 0,0457 |
| 112 | 77,5523 | 4,0000 | 0,0450 |
| 113 | 77,9667 | 4,0000 | 0,0442 |
| 114 | 78,3804 | 4,0000 | 0,0435 |
| 115 | 78,7935 | 4,0000 | 0,0428 |
| 116 | 79,2060 | 4,0000 | 0,0421 |
| 117 | 79,6179 | 4,0000 | 0,0414 |
| 118 | 80,0293 | 4,0000 | 0,0407 |
| 119 | 80,4402 | 4,0000 | 0,0401 |
| 120 | 80,8505 | 4,0000 | 0,0394 |
| 121 | 81,2604 | 4,0000 | 0,0388 |
| 122 | 81,6699 | 4,0000 | 0,0381 |
| 123 | 82,0789 | 4,0000 | 0,0375 |
| 124 | 82,4875 | 4,0000 | 0,0369 |
| 125 | 82,8958 | 4,0000 | 0,0363 |
| 126 | 83,3036 | 4,0000 | 0,0357 |
| 127 | 83,7112 | 4,0000 | 0,0351 |
| 128 | 84,1184 | 4,0000 | 0,0346 |
| 129 | 84,5253 | 4,0000 | 0,0340 |
| 130 | 84,9319 | 4,0000 | 0,0335 |
| 131 | 85,3383 | 4,0000 | 0,0329 |
| 132 | 85,7445 | 4,0000 | 0,0324 |
| 133 | 86,1504 | 4,0000 | 0,0319 |
| 134 | 86,5561 | 4,0000 | 0,0314 |
| 135 | 86,9617 | 4,0000 | 0,0309 |
| 136 | 87,3671 | 4,0000 | 0,0304 |
| 137 | 87,7724 | 4,0000 | 0,0299 |
| 138 | 88,1776 | 4,0000 | 0,0294 |
| 139 | 88,5826 | 4,0000 | 0,0289 |
| 140 | 88,9877 | 4,0000 | 0,0285 |
| 141 | 89,3926 | 4,0000 | 0,0280 |
| 142 | 89,7975 | 4,0000 | 0,0275 |
| 143 | 90,2025 | 4,0000 | 0,0271 |
| 144 | 90,6074 | 4,0000 | 0,0267 |
| 145 | 91,0123 | 4,0000 | 0,0262 |
| 146 | 91,4174 | 4,0000 | 0,0258 |
| 147 | 91,8224 | 4,0000 | 0,0254 |
| 148 | 92,2276 | 4,0000 | 0,0250 |
| 149 | 92,6329 | 4,0000 | 0,0246 |
| 150 | 93,0383 | 4,0000 | 0,0242 |
| 151 | 93,4439 | 4,0000 | 0,0238 |
| 152 | 93,8496 | 4,0000 | 0,0234 |
| 153 | 94,2555 | 4,0000 | 0,0230 |
| 154 | 94,6617 | 4,0000 | 0,0227 |
| 155 | 95,0681 | 4,0000 | 0,0223 |
| 156 | 95,4747 | 4,0000 | 0,0219 |
| 157 | 95,8816 | 4,0000 | 0,0216 |
| 158 | 96,2888 | 4,0000 | 0,0212 |
| 159 | 96,6964 | 4,0000 | 0,0209 |
| 160 | 97,1042 | 4,0000 | 0,0206 |
| 161 | 97,5125 | 4,0000 | 0,0202 |
| 162 | 97,9211 | 4,0000 | 0,0199 |
| 163 | 98,3301 | 4,0000 | 0,0196 |
| 164 | 98,7396 | 4,0000 | 0,0193 |
| 165 | 99,1495 | 4,0000 | 0,0189 |
| 166 | 99,5598 | 4,0000 | 0,0186 |
| 167 | 99,9707 | 4,0000 | 0,0183 |
| 168 | 100,3821 | 4,0000 | 0,0180 |
| 169 | 100,7940 | 4,0000 | 0,0177 |
| 170 | 101,2065 | 4,0000 | 0,0175 |
| 171 | 101,6196 | 4,0000 | 0,0172 |

| | | | |
|-----|----------|--------|--------|
| 172 | 102,0333 | 4,0000 | 0,0169 |
| 173 | 102,4477 | 4,0000 | 0,0166 |
| 174 | 102,8627 | 4,0000 | 0,0163 |
| 175 | 103,2783 | 4,0000 | 0,0161 |
| 176 | 103,6947 | 4,0000 | 0,0158 |
| 177 | 104,1119 | 4,0000 | 0,0155 |
| 178 | 104,5298 | 4,0000 | 0,0153 |
| 179 | 104,9485 | 4,0000 | 0,0150 |
| 180 | 105,3680 | 4,0000 | 0,0148 |
| 181 | 105,7884 | 4,0000 | 0,0145 |
| 182 | 106,2096 | 4,0000 | 0,0143 |
| 183 | 106,6317 | 4,0000 | 0,0140 |
| 184 | 107,0548 | 4,0000 | 0,0138 |
| 185 | 107,4788 | 4,0000 | 0,0136 |
| 186 | 107,9038 | 4,0000 | 0,0134 |
| 187 | 108,3299 | 4,0000 | 0,0131 |
| 188 | 108,7570 | 4,0000 | 0,0129 |
| 189 | 109,1852 | 4,0000 | 0,0127 |
| 190 | 109,6144 | 4,0000 | 0,0125 |
| 191 | 110,0449 | 4,0000 | 0,0123 |
| 192 | 110,4765 | 4,0000 | 0,0120 |
| 193 | 110,9094 | 4,0000 | 0,0118 |
| 194 | 111,3434 | 4,0000 | 0,0116 |
| 195 | 111,7788 | 4,0000 | 0,0114 |
| 196 | 112,2155 | 4,0000 | 0,0112 |
| 197 | 112,6536 | 4,0000 | 0,0110 |
| 198 | 113,0931 | 4,0000 | 0,0108 |
| 199 | 113,5340 | 4,0000 | 0,0107 |
| 200 | 113,9764 | 4,0000 | 0,0105 |
| 201 | 114,4203 | 4,0000 | 0,0103 |
| 202 | 114,8658 | 4,0000 | 0,0101 |
| 203 | 115,3129 | 4,0000 | 0,0099 |
| 204 | 115,7617 | 4,0000 | 0,0098 |
| 205 | 116,2121 | 4,0000 | 0,0096 |
| 206 | 116,6644 | 4,0000 | 0,0094 |
| 207 | 117,1184 | 4,0000 | 0,0092 |
| 208 | 117,5742 | 4,0000 | 0,0091 |
| 209 | 118,0320 | 4,0000 | 0,0089 |
| 210 | 118,4917 | 4,0000 | 0,0087 |
| 211 | 118,9535 | 4,0000 | 0,0086 |
| 212 | 119,4173 | 4,0000 | 0,0084 |
| 213 | 119,8832 | 4,0000 | 0,0083 |
| 214 | 120,3513 | 4,0000 | 0,0081 |
| 215 | 120,8217 | 4,0000 | 0,0080 |
| 216 | 121,2943 | 4,0000 | 0,0078 |
| 217 | 121,7694 | 4,0000 | 0,0077 |
| 218 | 122,2469 | 4,0000 | 0,0075 |
| 219 | 122,7269 | 4,0000 | 0,0074 |
| 220 | 123,2096 | 4,0000 | 0,0072 |
| 221 | 123,6949 | 4,0000 | 0,0071 |
| 222 | 124,1830 | 4,0000 | 0,0070 |
| 223 | 124,6739 | 4,0000 | 0,0068 |
| 224 | 125,1677 | 4,0000 | 0,0067 |
| 225 | 125,6646 | 4,0000 | 0,0066 |
| 226 | 126,1645 | 4,0000 | 0,0064 |
| 227 | 126,6677 | 4,0000 | 0,0063 |
| 228 | 127,1742 | 4,0000 | 0,0062 |
| 229 | 127,6841 | 4,0000 | 0,0061 |
| 230 | 128,1975 | 4,0000 | 0,0059 |
| 231 | 128,7146 | 4,0000 | 0,0058 |
| 232 | 129,2355 | 4,0000 | 0,0057 |
| 233 | 129,7602 | 4,0000 | 0,0056 |
| 234 | 130,2890 | 4,0000 | 0,0055 |
| 235 | 130,8219 | 4,0000 | 0,0053 |
| 236 | 131,3592 | 4,0000 | 0,0052 |
| 237 | 131,9009 | 4,0000 | 0,0051 |
| 238 | 132,4473 | 4,0000 | 0,0050 |
| 239 | 132,9985 | 4,0000 | 0,0049 |
| 240 | 133,5546 | 4,0000 | 0,0048 |
| 241 | 134,1160 | 4,0000 | 0,0047 |
| 242 | 134,6827 | 4,0000 | 0,0046 |
| 243 | 135,2550 | 4,0000 | 0,0045 |

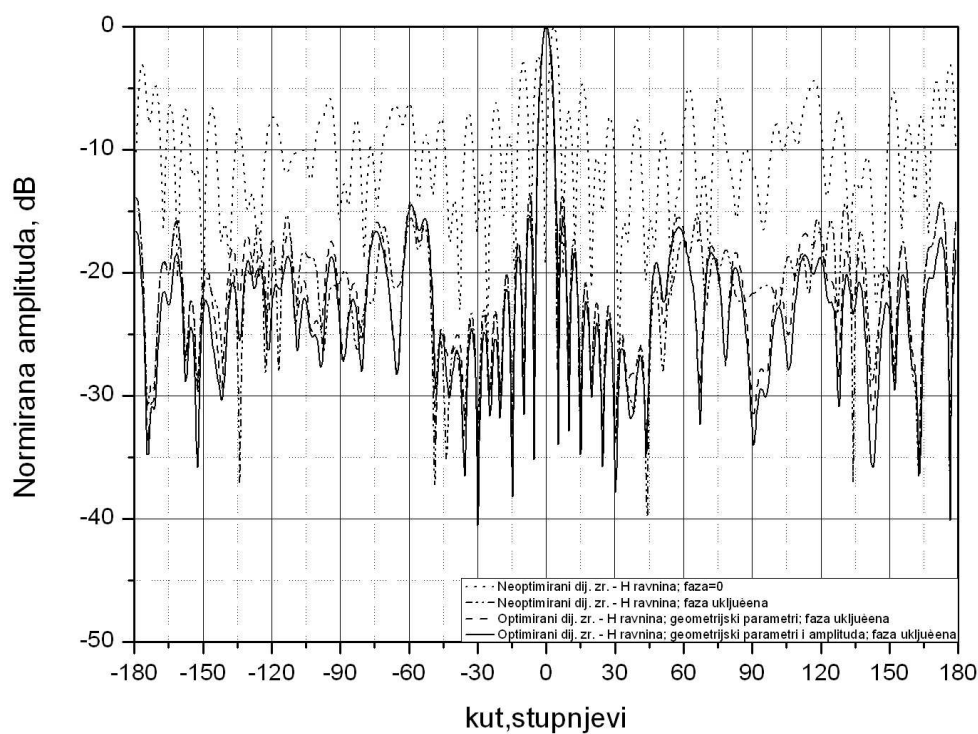
| | | | |
|-----|----------|--------|--------|
| 244 | 135,8332 | 4,0000 | 0,0044 |
| 245 | 136,4174 | 4,0000 | 0,0043 |
| 246 | 137,0080 | 4,0000 | 0,0042 |
| 247 | 137,6051 | 4,0000 | 0,0041 |
| 248 | 138,2092 | 4,0000 | 0,0040 |
| 249 | 138,8205 | 4,0000 | 0,0039 |
| 250 | 139,4393 | 4,0000 | 0,0038 |
| 251 | 140,0660 | 4,0000 | 0,0037 |
| 252 | 140,7010 | 4,0000 | 0,0036 |
| 253 | 141,3448 | 4,0000 | 0,0035 |
| 254 | 141,9977 | 4,0000 | 0,0034 |
| 255 | 142,6603 | 4,0000 | 0,0033 |
| 256 | 143,3330 | 4,0000 | 0,0032 |
| 257 | 144,0166 | 4,0000 | 0,0031 |
| 258 | 144,7116 | 4,0000 | 0,0031 |
| 259 | 145,4187 | 4,0000 | 0,0030 |
| 260 | 146,1387 | 4,0000 | 0,0029 |
| 261 | 146,8724 | 4,0000 | 0,0028 |
| 262 | 147,6209 | 4,0000 | 0,0027 |
| 263 | 148,3850 | 4,0000 | 0,0026 |
| 264 | 149,1662 | 4,0000 | 0,0026 |

| | | | |
|-----|----------|--------|--------|
| 265 | 149,9655 | 4,0000 | 0,0025 |
| 266 | 150,7847 | 4,0000 | 0,0024 |
| 267 | 151,6253 | 4,0000 | 0,0023 |
| 268 | 152,4894 | 4,0000 | 0,0022 |
| 269 | 153,3794 | 4,0000 | 0,0022 |
| 270 | 154,2978 | 4,0000 | 0,0021 |
| 271 | 155,2478 | 4,0000 | 0,0020 |
| 272 | 156,2333 | 4,0000 | 0,0019 |
| 273 | 157,2590 | 4,0000 | 0,0019 |
| 274 | 158,3304 | 4,0000 | 0,0018 |
| 275 | 159,4548 | 4,0000 | 0,0017 |
| 276 | 160,6415 | 4,0000 | 0,0016 |
| 277 | 161,9026 | 4,0000 | 0,0015 |
| 278 | 163,2551 | 4,0000 | 0,0015 |
| 279 | 164,7232 | 4,0000 | 0,0014 |
| 280 | 166,3442 | 4,0000 | 0,0013 |
| 281 | 168,1807 | 4,0000 | 0,0012 |
| 282 | 170,3553 | 4,0000 | 0,0011 |
| 283 | 173,1842 | 4,0000 | 0,0010 |
| 284 | 180,0000 | 4,0000 | 0,0007 |

Na slici 6.12. a) i b) prikazana su četiri dijagrama zračenja sfernog niza spiralnog rasporeda u dvije ortogonalne ravnine. Prvi dijagram zračenja je dijagram (označen kao neoptimiran) niza koji nije optimiran niti po jednom parametru optimizacije. Pri tome se ne primjenjuje niti promjena faze pobude radi istofaznosti dolaska EM valova emitiranih od svakog od elemenata niza na mjestu prijema, a radi protežiranja odgovarajućeg smjera zračenja. Taj dijagram zračenja je dijagram sa najvišim bočnim laticama (SLL= 4,92 dB) te tako i najlošijom ciljnom funkcijom. Nakon njega slijedi dijagram zračenja niza s promjenom faze pobude, što rezultira značajnom promjenom dijagrama zračenja: smanjenje bočnih latica (SLL=14,88 dB) te suženjem glavne laticice. Nakon toga slijede dva dijagrama: prvi sa optimizacijom uz korištenje geometrijski parametara (radijus sfere, broj antena, raspored antena) i drugi sa optimizacijom geometrijskih i dodatnog pobudnog parametra – amplitude pobude.



a)



b)

Slika 6.13. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije za različit broj parametara optimizacije:
a) E ravnina, b) H ravnina.

Posljedni optimirani dijagram zračenja s optimizacijom geometrijskih i pobudnih parametara daje najveći iznos ciljne funkcije CF_2 .

Tablica 6.15. prikazuje porast vrijednosti ciljne funkcije kako se povećava broj parametara optimizacije ($f=1,7$ GHz, $r_s=52,9$ cm, $\alpha_{sel}=180^\circ$, br. antena= 284).

Tablica 6.15. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 spiralne konfiguracije uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza.

| | Faza pobude = 0, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amp. pobude = 1 | Promjena faze pobude, Amplituda pobude =1, Promjena parametara geometrije | Promjena faze i amplitude pobude , Promjena parametara geometrije |
|---|-------------------------------------|---|--|---|
| Vrijednost ciljne funkcije CF_2 dB/stupnju | 0,150 | 1,067 | 1,070 | 1,135 |

U poglavlju 6. dan je detaljan pregled optimizacije sfernih nizova čije se konfiguracije temelje na ikosaedarskom, spiralnom i Leopardi rasporedu anteskih elemenata na sferi. Za svaki od slučajeva posebno je analiziran utjecaj geometrijskih parametara (radijus sfere, položaj i broj antena), te je postignut optimalni dijagram zračenja. Nakon toga, uz spomenute parametre, na dijagram zračenja niza svake konfiguracije uključuje se još jedan parametar, a to je amplituda pobude. Fazni kut pobude je uzet kao parametar u svim optimizacijama koje su izvedene. Svi rezultati ciljnih funkcija predstavljeni su Tablicama 6.9, 6.10. i 6.11.

Dijagram zračenja se, u ovisnosti o namjeni, može oblikovati korištenjem parametara geometrije i parametara pobude. Upravljanje smjerom glavne latice ili usmjeravanje dijagram zračenja moguće je uglavnom promjenom parametara pobude. Ipak, usmjeravanju dijagrama zračenja mora prethoditi optimizacija dijagrama zračenja koja rezultira pronalaženjem optimalnih vrijednosti parametara geometrije sfernog niza. Na oblikovanje dijagrama zračenja podjednako utječu parametri geometrije i parametri pobude, ali treba izdvojiti fazu pobude kao ključan parametar pobude koji mora biti optimiran za svaki konformni antenski niz. Vrijednost ciljne funkcije je veličina kojom su utvrđeni doprinosi svakog od parametara optimizacije. Za kraj 6. poglavlja dana je Tablica 6.16. koja na sustavan način prikazuje utjecaj relevantnih parametara na ciljnu funkciju pojedine konfiguracije.

Tablica 6.16. Utjecaj geometrijskih i pobudnih parametara na vrijednost ciljne funkcije ikosaedarske, spiralne i Leopardi konfiguracije elemenata.

| Parametar | Konfiguracija | Ikosaedarska | Spiralna | Leopardi | |
|------------------------|---------------|--|---|---|--|
| Geometrijski | | $\alpha_{sel} = 90^\circ$ $r_s = 100$ cm Pn = 4 ? 91 ant. $k_g = 117$ | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 100$ cm Br. antena = 284 $k_\alpha=0$ i $k_\beta=5$ | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 30$ cm Br. antena = 90 | |
| | | CF₂ = 1,188 | CF₂ = 1,070 | CF₂ = 0,382 | |
| | | | | | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 35,3$ cm Br. antena = 90 |
| | | | | | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 52,9$ cm Br. antena = 145 |
| | | CF₂ = 0,679 | | | |
| Geometrijski i pobudni | | $\alpha_{sel} = 90^\circ$ $r_s = 100$ cm Pn = 4 ? 91 ant. $k_g = 117$ i $k_a = 7$ | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 100$ cm Br. antena = 284 $k_\alpha=0, k_\beta=5$ i $k_a = 4$ | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 30$ cm Br. antena = 90 $k_a = 7$ | |
| | | CF₂ = 1,222 | CF₂ = 1,135 | CF₂ = 0,447 | |
| | | | | | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 35,3$ cm Br. antena = 90 $k_a = 7$ |
| | | | | | $\alpha_{sel} = 180^\circ$ $r_s = 52,9$ cm Br. antena = 145 $k_a = 8$ |
| | | CF₂ = 0,720 | | | |

7. SINTEZA DIJAGRAMA ZRAČENJA SLOBODNE KONFIGURACIJE ANTENSKIH ELEMENATA KORIŠTENJEM PSO ALGORITMA

Prethodna istraživanja obrađena u poglavljima 5. i 6. pokazuju da ikosaedarska, spiralna i Leopardi konfiguracija nisu optimalne, već se promjenom različitih parametara geometrije ustanovilo da takve konfiguracije mogu dati bolji dijagram zračenja od izvornih konfiguracija.

Sada se nameće ideja o postizanju potpuno novog niza koji bi bio sposoban proizvesti kvalitetniji dijagram zračenja čija bi vrijednost ciljne funkcije bila veća od vrijednosti ciljnih funkcija postojećih konfiguracija.

Takvo razmišljanje dovodi do pojma sinteze dijagrama zračenja kojom bi se mogao postići željeni izgled dijagrama i ostvariti dobra vrijednost ciljne funkcije. Sinteza podrazumijeva postizanje optimalne konfiguracije sustava, gdje se unaprijed ne znaju postavke geometrijskih i pobudnih parametara, a ono što se zna su granice karakterističnih veličina jednog takvog dijagrama kao i željena ciljna funkcija. U sljedećim je potpoglavljima detaljno opisan postupak sinteze dijagrama zračenja slobodne konfiguracije uz postupno povećanje broja parametara optimizacije.

Postavke okvira sinteze dijagrama zračenja definiraju maksimalno dozvoljene vrijednosti širine glavne latice (*eng.* beamwidth) te minimalno dozvoljenu vrijednost razlike nivoa glavne latice i najveće bočne latice (*eng.* side lobe level - SLL).

U potpoglavljima 7.1., 7.2. i 7.3. granice karakterističnih veličina dijagrama zračenja iznose:

- $BW_{-3dB} = 30^\circ$

- $BW_{-10dB} = 30^\circ$

- $SLL = A = 15 \text{ dB}$.

To znači da širina glavne latice ne smije biti veća od 30° na mjestu gdje maksimalna vrijednost amplitude pada za 3 ili 10 dB, a razina najviše bočne latice ne smije prerasti -15 dB. Nakon definiranja okvira sinteze dijagrama zračenja (u dostupnoj literaturi taj se pojam naziva još maska), korištenjem PSO algoritma određuje se optimalan položaj antena, amplituda i polarizacija pobude, dijagram zračenja i pripadajuća ciljna funkcija.

Važno je i u ovom poglavlju napomenuti da je fazna pobuda po elevacijskom kutu antenskih elemenata kao pobudni parametar, primjenjena u svakom od nizova za koje se radi sinteza.

7.1. SINTEZA NIZA UZ PROMJENU GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NIZA

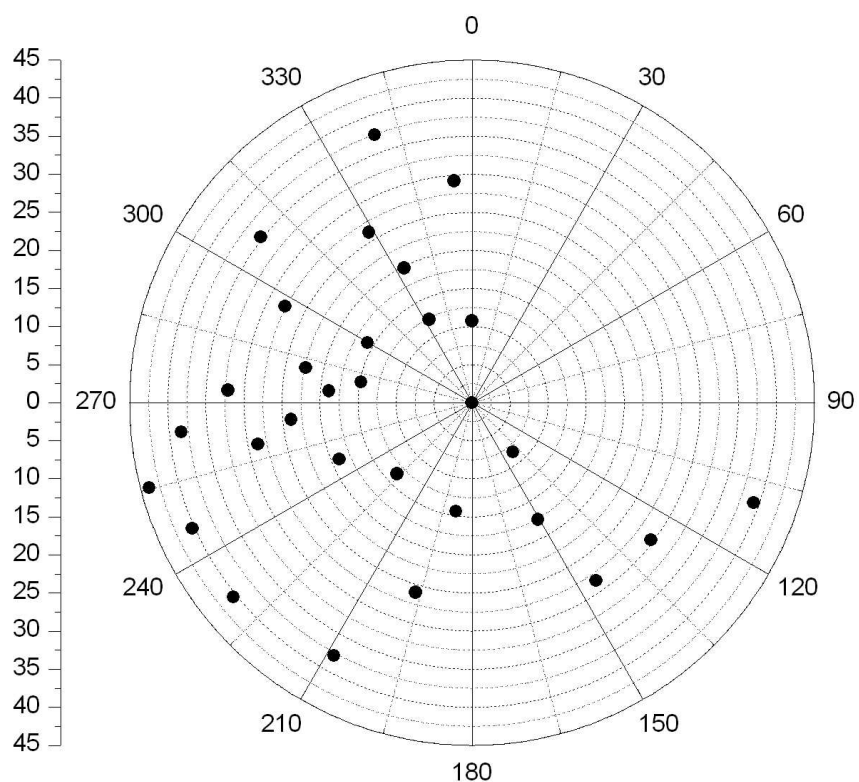
Prvi dio istraživanja slobodne konfiguracije odnosi se na ispitivanje utjecaja geometrijskih parametara na dijagram zračenja. U kontekstu geometrijskih parametara - mijenja se radijus sfere, te elevacijski i azimutalni položaj elemenata. Postavljene su granice unutar kojih se kreću vrijednosti geometrijskih parametara, te se kao rezultat optimizacije postignu najbolji iznosi svakog od parametara. Tako dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 7.1. Slike 7.1. i 7.2. prikazuju postignutu konfiguraciji te porast vrijednosti ciljne funkcije s promjenom broja iteracija.

Parametri simulacije su radijus sfere r_s , te kutevi položaja elemenata (30 elevacijskih i azimutalnih koordinata elemenata). Prvi element je fiksni i smješten je u sjeverni pol sfere (koordinate: $0^\circ, 0^\circ$) (ukupno 31 antenski element na podlozi).

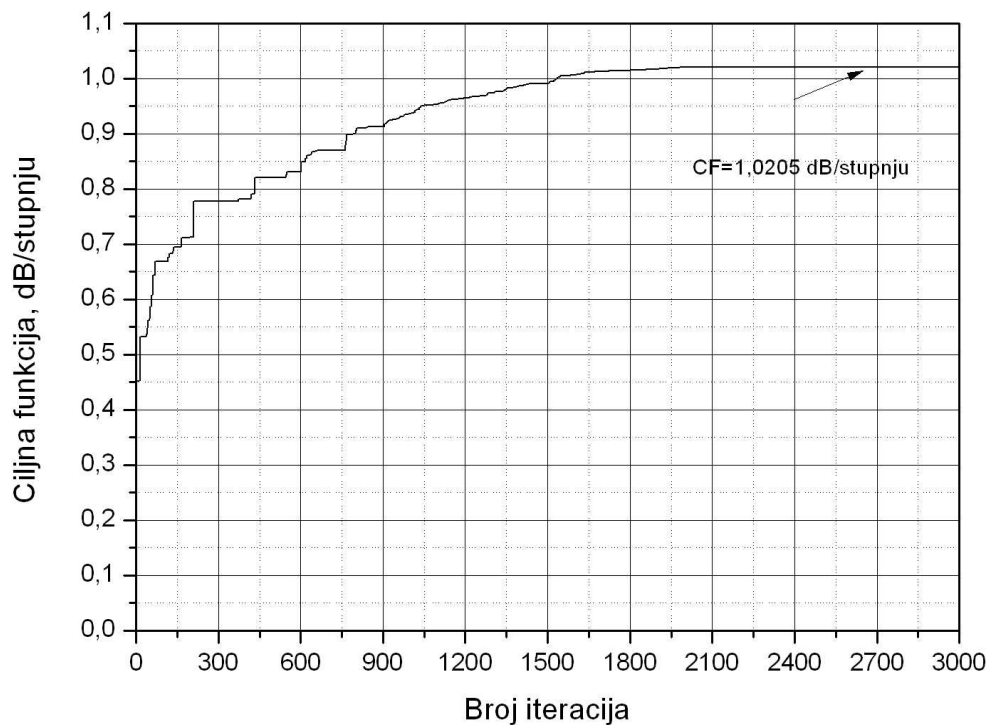
Granice unutar kojih se kreću vrijednosti svih parametara su:

- radijus sfere $r_s \in [30\text{cm}, 100\text{cm}]$;
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in [0^\circ, 45^\circ]$;
- azimutalni kut pozicije $\beta \in [0^\circ, 360^\circ]$.

To znači da radijus sfere ne smije biti manji od 30, a veći od 100 cm. Na sferu se postavlja 30 elemenata, s tim da su raspoređeni do maksimalno 45° elevacijski, a po azimutu, svaki se element može nalaziti unutar 360° .



Slika 7.1. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz sljedeće parametre: radijus sfere i pozicija elemenata.



Slika 7.2. Vrijednost ciljane funkcije CF₂ slobodne konfiguracije elemenata postignuta PSO optimizacijom (uz masku) geometrijskih parametara – radijusa sfere i položaja elemenata.

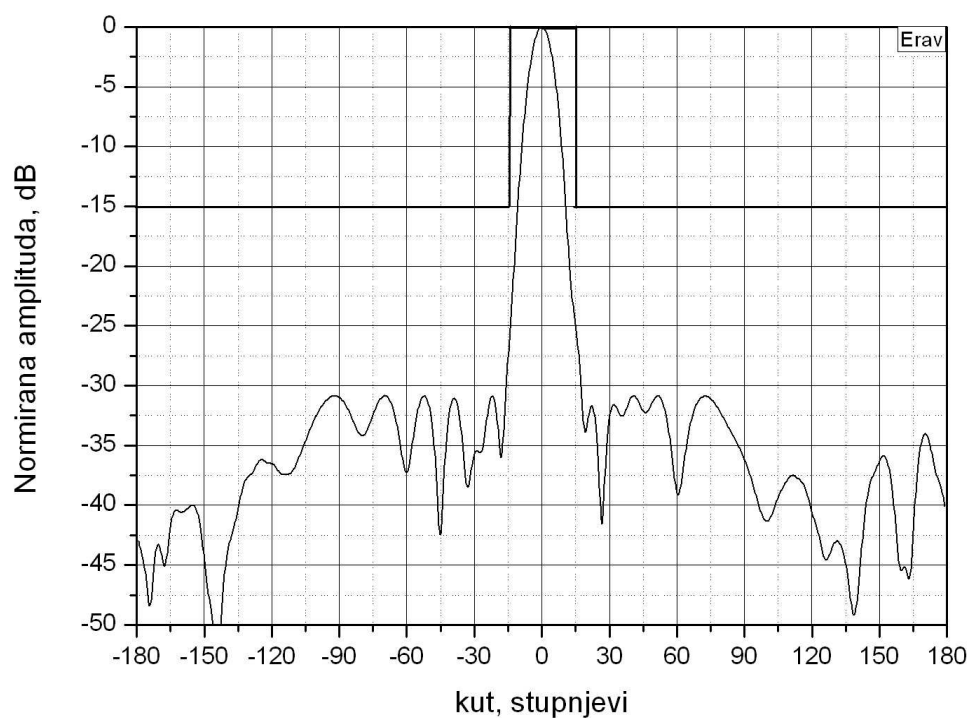
Iz Slike 7.2. može se vidjeti da je najveća vrijednost ciljne funkcije 1,020 dB/stupnju uz koju je postignuta optimalna konfiguracija elemenata na sferi (Slika 7.1.) koja daje optimalni dijagram zračenja. U Tablici 7.1. dani su podaci o optimalnom položaju antena na sferi uz prethodno zadane uvjete.

Tablica 7.1. Optimalni radijus sfere i pripadajući položaj 31 antene slobodne konfiguracije niza.

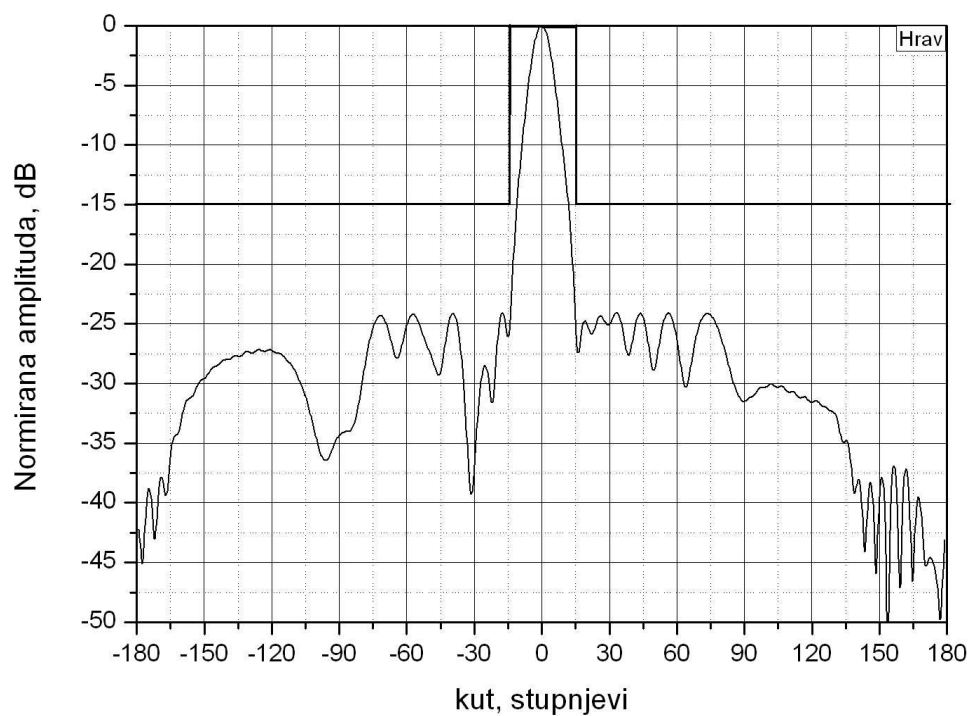
| | r_{s2} cm | Alfa, ° | Beta, ° |
|-----|---------------|---------------|----------------|
| 1. | 99,9797309212 | 0,00 | 0,00 |
| 2. | | 37,4007659973 | 339,9964607877 |
| 3. | | 25,9862860321 | 196,4993872402 |
| 4. | | 19,7786917646 | 333,2101030787 |
| 5. | | 29,1958761999 | 355,3814759107 |
| 6. | | 13,5674352442 | 226,3559427977 |
| 7. | | 29,6249125942 | 127,4110327252 |
| 8. | | 17,6239332416 | 150,6158486363 |
| 9. | | 37,8628862392 | 208,6289358039 |
| 10. | | 8,4282153803 | 140,1974819600 |
| 11. | | 32,1269803202 | 272,9269165910 |
| 12. | | 40,2719346315 | 245,8066788626 |
| 13. | | 15,8110201225 | 299,7446324350 |
| 14. | | 12,2815900876 | 332,7269672114 |
| 15. | | 43,8702959812 | 255,2548815631 |
| 16. | | 10,7250891270 | 359,9211297101 |
| 17. | | 22,3305339400 | 281,8869495490 |
| 18. | | 38,3846344012 | 264,2406186680 |
| 19. | | 49,1776267781 | 283,1443167769 |
| 20. | | 27,6498916150 | 297,2827808914 |
| 21. | | 40,4378536246 | 230,8798700585 |
| 22. | | 26,1352446296 | 328,7512618552 |
| 23. | | 35,2787642693 | 308,1056399570 |
| 24. | | 28,4923033046 | 145,0333227941 |
| 25. | | 39,2540604734 | 109,5400642460 |
| 26. | | 18,9323193369 | 246,8934510165 |
| 27. | | 14,4166782618 | 188,3738070154 |
| 28. | | 28,6724576879 | 259,0350132479 |
| 29. | | 14,8114569770 | 280,4962696721 |
| 30. | | 18,8633869425 | 274,6145813172 |
| 31. | | 23,8840250545 | 264,6293784661 |

Uz prethodno postignute vrijednosti kuteva položaja antena i radijusa sfere (Tablica 7.1.), dijagrami zračenja u E i H ravnini zadovoljavaju prethodno definirane kriterije, odnosno sve vrijednosti jakosti polja nalaze se unutar okvira sinteze (maske).

Slika 7.3. prikazuje dijagrame zračenja ovakve konfiguracije u E i H ravnini na kojima je ucrtan okvir sinteze.



a)



b)

Slika 7.3. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz promjenu geometrijskih parametara (radijus sfere i položaj antena): a) E ravnina, b) H ravnina.

U sljedećem poglavlju ide se korak dalje na sličan način kao i u prethodnim primjerima uz dodatni parametar optimizacije – amplituda pobude.

7.2. SINTEZA NIZA UZ PROMJENU GEOMETRIJSKIH I POBUDNIH PARAMETARA NIZA

7.2.1. Promjena geometrijskih parametara, te amplitude kao parametra pobude

U ovom će se potpoglavlju sinteza izvedena u prethodnom potpoglavlju proširiti uključivanjem jednog pobudnog parametra niza - amplitude pobude. Time se nastoji postići bolja vrijednost ciljne funkcije CF_2 slobodne konfiguracije.

Uz položaj antena i radijus sfere mijenja se i amplituda pobude, što predstavlja promjenu ukupno 62 parametara (radijus sfere, 30 elevacijskih i 30 azimutalnih kuteva, te koeficijent po kojemu se mijenja amplituda). Prvi antenski element je fiksne pozicije u sjevernom polu sfere ($0^\circ, 0^\circ$).

Amplituda pobude predstavljena je eksponencijalnom funkcijom, a njen je oblik:

$$AMP = 2 \cdot \exp(\alpha \cdot k \cdot 0,0007), \quad (7-1)$$

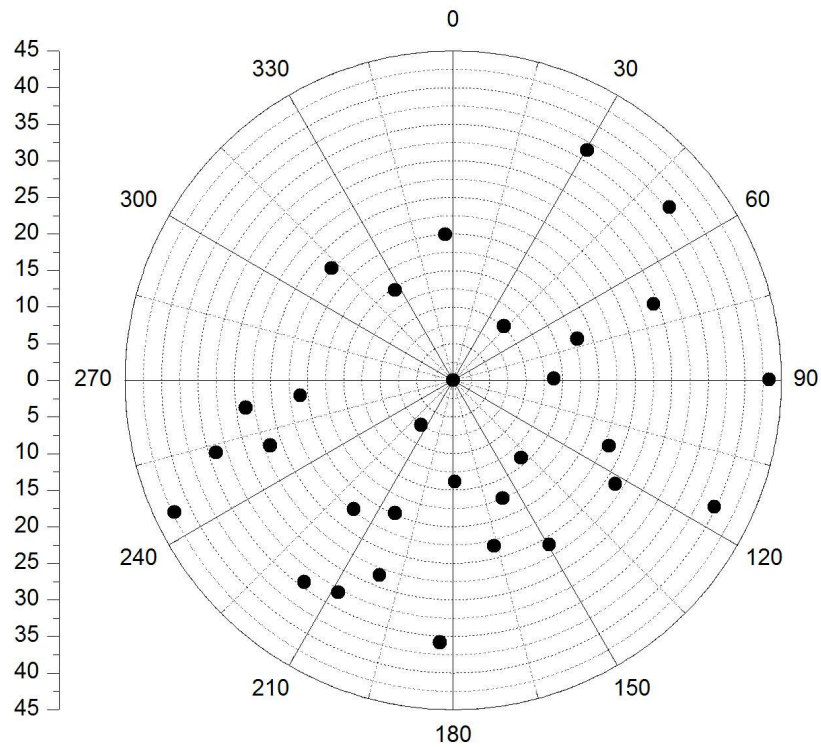
gdje su:

- $k=k_a$ - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $[-10;10]$,
- α – elevacijski kut prstena na kojemu su smješteni antenski elementi.

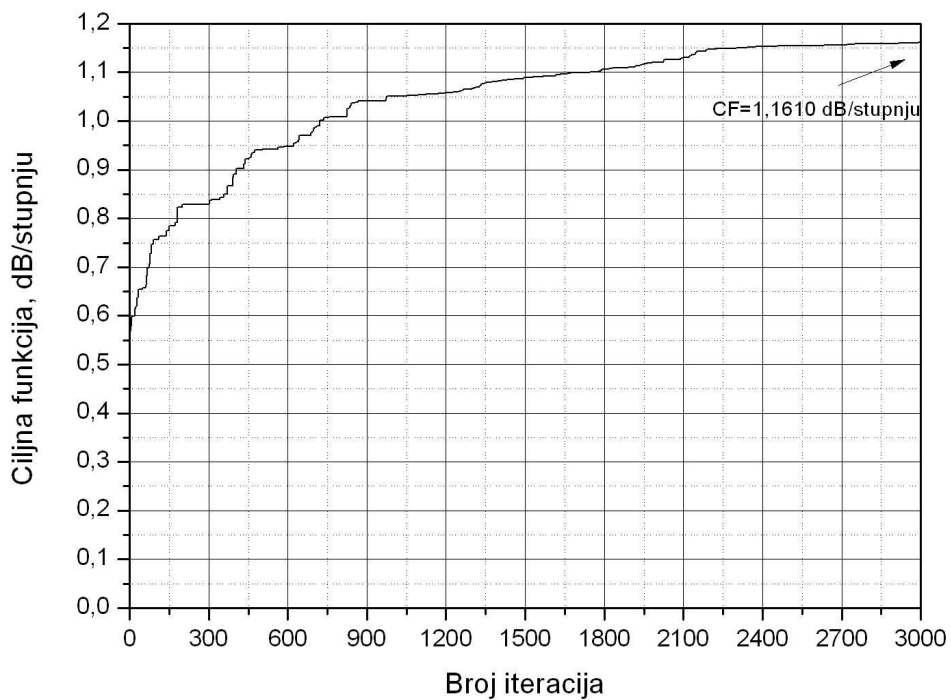
Vrijednosti parametri kreću se u sljedećim granicama:

- radijus sfere $r_s \in [30\text{cm}, 100\text{cm}]$;
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in [0^\circ, 45^\circ]$;
- azimutalni kut pozicije $\beta \in [0^\circ, 360^\circ]$;
- koeficijent amplitude $k_a \in [-10,10]$.

Sinteza rezultira novom slobodnom konfiguracijom niza i ciljnom funkcijom CF_2 većeg iznosa nego u potpoglavlju 7.1. Rezultati sinteze su prikazani na slikama 7.4. i 7.5.



Slika 7.4. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz sljedeće parametre: radijus sfere, pozicija elemenata, te amplituda pobude.



Slika 7.5. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 slobodne konfiguracije elemenata postignuta PSO optimizacijom (uz masku) geometrijskih parametara – geometrijskih parametara i amplitude pobude.

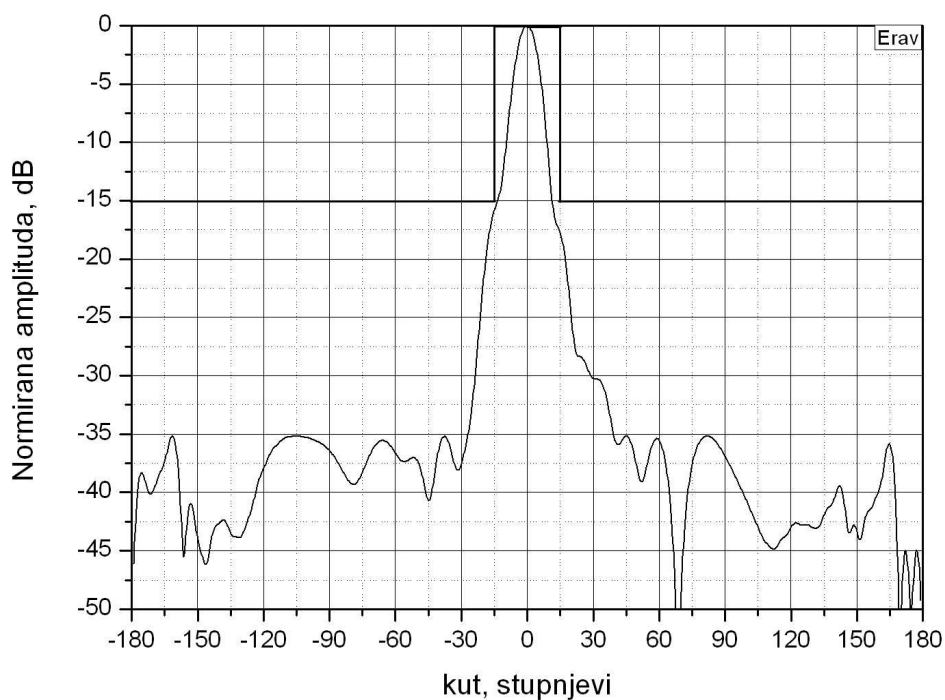
Maksimalna je vrijednost ciljne funkcije 1,161 dB/stupnju. U Tablici 7.2. prva kolona predstavlja radijus sfere za koji se postiže optimalni dijagram zračenja, a aktivni elementi koji to omogućuju smješteni su na pozicijama prikazanih u drugoj i trećoj koloni. Posljednja kolona rezervirana je za iznos amplitude pobude svakog elementa, a optimalna vrijednost koeficijenta amplitude je 3,13.

Tablica 7.2. Optimalni radijus sfere, položaj 31 antene, te iznos amplitude pobude slobodne konfiguracije niza.

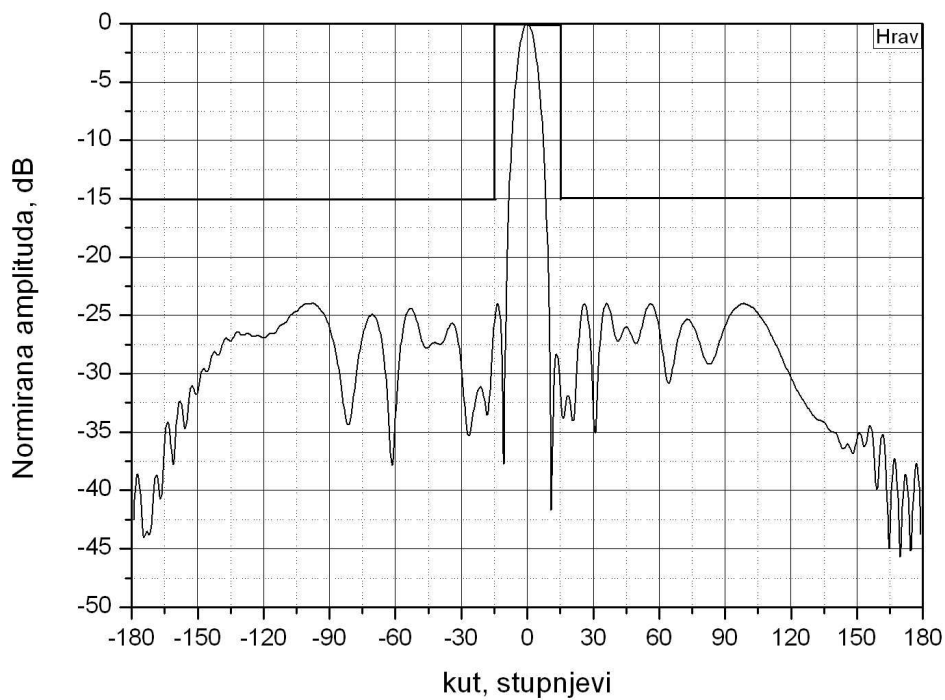
| | r_s , cm | Alfa, ° | Beta, ° | AMP($k_a=3,13$) |
|-----|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| 1. | 98,9325255665 | 0,00 | 0,00 | 1,0000 |
| 2. | | 33,9492140395 | 253,1134863863 | 0,9229 |
| 3. | | 17,4697861457 | 157,0977272336 | 0,9610 |
| 4. | | 22,5696209241 | 312,6047168466 | 0,9494 |
| 5. | | 22,2557816896 | 217,6633710785 | 0,9501 |
| 6. | | 19,7951464712 | 203,5717685359 | 0,9557 |
| 7. | | 29,3961453510 | 69,3079796271 | 0,9335 |
| 8. | | 14,1102635900 | 138,5962667762 | 0,9686 |
| 9. | | 36,4327489125 | 30,3656262084 | 0,9170 |
| 10. | | 13,8187783351 | 88,9290540750 | 0,9693 |
| 11. | | 28,6707726014 | 262,4820011613 | 0,9352 |
| 12. | | 34,3020256555 | 216,4807003812 | 0,9220 |
| 13. | | 13,8543528660 | 178,9602659386 | 0,9692 |
| 14. | | 14,6280448022 | 327,1601714841 | 0,9675 |
| 15. | | 35,8678667509 | 182,8881361339 | 0,9183 |
| 16. | | 19,9479618107 | 356,9037468664 | 0,9554 |
| 17. | | 23,3030614843 | 166,0687323318 | 0,9477 |
| 18. | | 43,3281712890 | 89,8900710417 | 0,9005 |
| 19. | | 42,2278414633 | 244,7511920104 | 0,9032 |
| 20. | | 26,5792631262 | 250,4283379559 | 0,9401 |
| 21. | | 39,7720604932 | 115,8014595777 | 0,9091 |
| 22. | | 26,3800890468 | 122,4317455364 | 0,9406 |
| 23. | | 32,9793334920 | 208,5145279223 | 0,9252 |
| 24. | | 23,2052760094 | 112,7354013247 | 0,9479 |
| 25. | | 37,9348766839 | 51,4461606307 | 0,9134 |
| 26. | | 26,0667313377 | 149,5692650065 | 0,9413 |
| 27. | | 17,9449618616 | 71,6539559996 | 0,9599 |
| 28. | | 28,4552286330 | 200,6749565546 | 0,9357 |
| 29. | | 7,5042356024 | 215,7219971211 | 0,9834 |
| 30. | | 10,1392439037 | 43,5119630106 | 0,9776 |
| 31. | | 21,0577786224 | 264,3130589821 | 0,9528 |

Postignuta ciljna funkcija od 1,161 dB/stupnju veća je od ciljne funkcije u prethodnom poglavlju (1,020 dB/stupnju), što znači da je postignut cilj s početka ovog poglavlja.

Dijagram zračenja slobodne konfiguracije prikazan je slikom 7.6.



a)



b)

Slika 7.6. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz optimiranje geometrijskih parametara i amplitude kao parametra pobude: a) E ravnina, b) H ravnina.

7.2.2. Promjena geometrijskih parametara, te amplitude i polarizacije kao parametara pobude

Posljednje istraživanje odnosi se na ispitivanje ponašanja ciljne funkcije CF_2 , ako se uz sve prethodne parametre uključi i polarizacija kao još jedan parametar po kojemu se optimira niz.

Funkcija po kojoj se mijenja amplituda ostaje ista, a njen je oblik:

$$AMP = 2 \cdot \exp(\alpha \cdot k_a \cdot 0,0007), \quad (7-2)$$

gdje su:

k_a - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu $k_a \in [-10:10]$,

α – elevacijski kut prstena na kojemu su smješteni antenski elementi.

Funkcija po kojoj se mijenja kut polarizacije antenskog elementa je linearna:

$$\Phi = a + k_{POL} \cdot |b - c| \cdot 0,01, \quad (7-3)$$

gdje su:

k_{POL} - koeficijent po kojemu se mijenja polarizacija, $k_{POL} \in [-10:10]$,

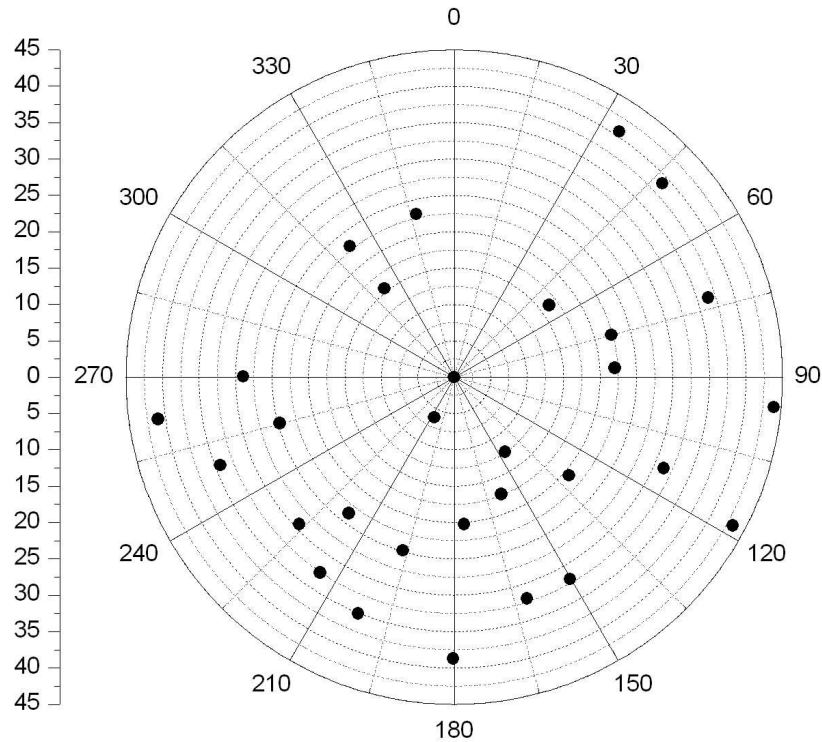
a – azimutalni (phi) kut u lokalnom koordinatnom sustavu,

b – brojač po elementima, $b \in [c:1]$,

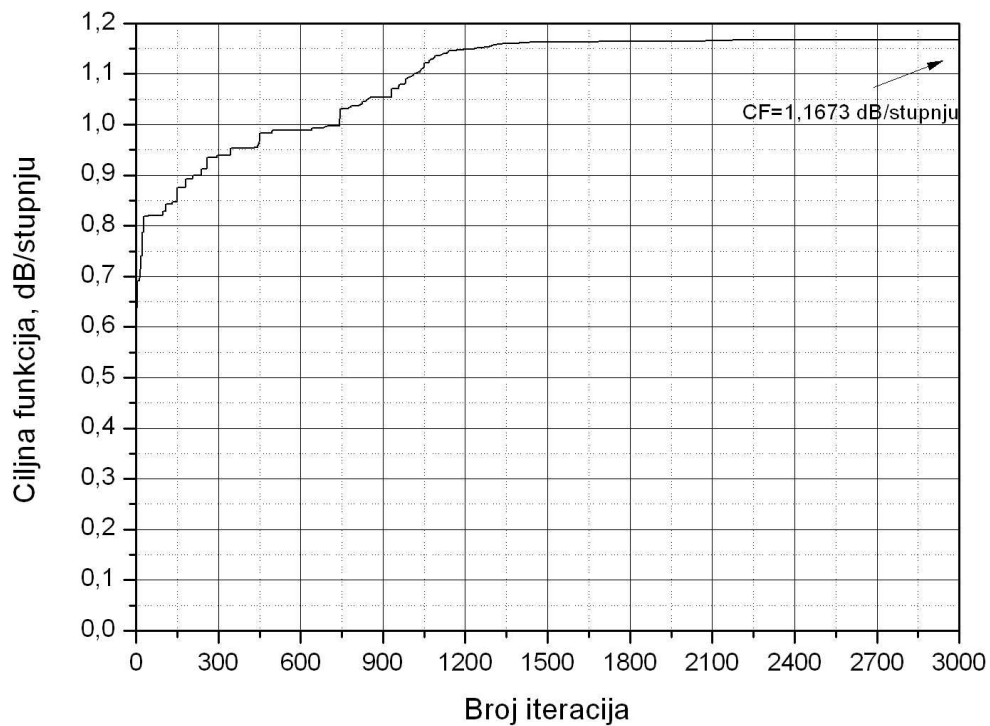
c – ukupni broj elemenata + centralni

Slikom 7.7. prikazana je konfiguracija 31 elementa na sferi, a Slika 7.8. prikazuje ciljnu funkciju maksimalne vrijednosti 1,167 dB/stupnju. Granične vrijednosti ulaznih parametara su:

- radijus sfere $r_s \in [30\text{cm}, 100\text{cm}]$;
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in [0^\circ, 45^\circ]$;
- azimutalni kut pozicije $\beta \in [0^\circ, 360^\circ]$;
- koeficijent amplitude $k_a \in [-10, 10]$;
- koeficijent polarizacije $k_{POL} \in [-10, 10]$.



Slika 7.7. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz slijedeće parametre: radijus sfere, pozicija elemenata, te amplituda i polarizacija pobude.



Slika 7.8. Ciljna funkcija slobodne konfiguracije dobivena promjenom geometrijskih i pobudnih parametara uz upotrebu PSO algoritma optimizacije.

Promjena polarizacije dodatno je utjecala na porast ciljne funkcije, što je i vidljivo iz Slike 7.7., a maksimum iznosi 1,167 dB/stupnju. U svakom slučaju postignuta je veća vrijednost ciljne funkcije CF_2 u odnosu na prethodnu situaciju, ili u kontekstu optimizacije dijagrama zračenja slobodne konfiguracije promjenom samo geometrijskih parametara.

Tablica 7.3. prikazuje vrijednosti parametara pri kojima je ostvaren posljednji maksimum.

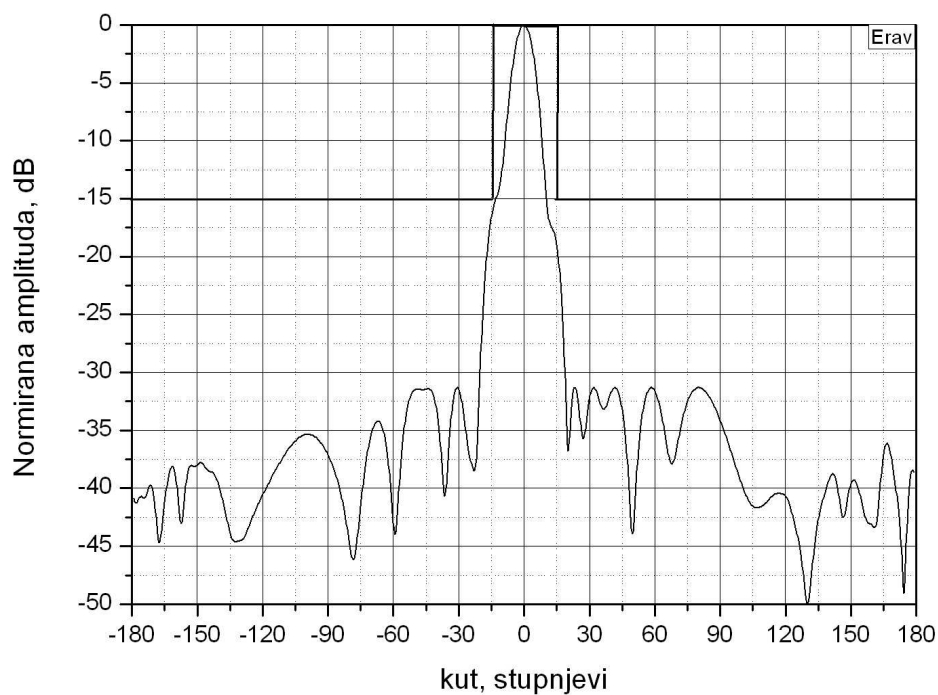
Tablica 7.3. Optimalni radijus sfere, položaj 31 antene, te iznos amplitude i polarizacije pobude slobodne konfiguracije niza.

| | r_s, cm | Alfa, ° | Beta, ° | AMP($k_z=3,04$) | POL ($k_{pol}=0,14$) |
|-----|------------------|---------------|----------------|-------------------|------------------------|
| 1. | 97,9158037873 | 0,00 | 0,00 | 1,0000 | 0,0000 |
| 2. | | 40,9970937964 | 261,8707494755 | 0,9088 | 0,0798 |
| 3. | | 17,3685694212 | 158,0814085738 | 0,9623 | 0,1597 |
| 4. | | 22,9768604574 | 321,5983662010 | 0,9499 | 0,2395 |
| 5. | | 23,6441926068 | 217,6468946762 | 0,9484 | 0,3194 |
| 6. | | 24,8694681044 | 196,4649969754 | 0,9456 | 0,3992 |
| 7. | | 36,4677435410 | 72,5446674062 | 0,9193 | 0,4791 |
| 8. | | 12,4427054897 | 145,7748625038 | 0,9732 | 0,5589 |
| 9. | | 40,6418179458 | 33,8220681354 | 0,9097 | 0,6387 |
| 10. | | 22,0532495370 | 86,6782094682 | 0,9519 | 0,7186 |
| 11. | | 24,7477232053 | 255,1647387606 | 0,9459 | 0,7984 |
| 12. | | 29,3273487784 | 226,4253997483 | 0,9356 | 0,8783 |
| 13. | | 20,2459047298 | 176,2346861377 | 0,9560 | 0,9581 |
| 14. | | 15,4945296174 | 321,9160369024 | 0,9665 | 1,0379 |
| 15. | | 38,7122920125 | 180,2354941682 | 0,9141 | 1,1178 |
| 16. | | 23,0059293542 | 346,9037468664 | 0,9498 | 1,1976 |
| 17. | | 32,0545716496 | 161,8481150002 | 0,9294 | 1,2775 |
| 18. | | 43,9950913038 | 95,4265863687 | 0,9018 | 1,3573 |
| 19. | | 47,7083442660 | 248,9962095048 | 0,8931 | 1,4372 |
| 20. | | 34,2906656135 | 249,2909660110 | 0,9243 | 1,5170 |
| 21. | | 43,3096554875 | 118,0858382402 | 0,9034 | 1,5968 |
| 22. | | 20,7645091111 | 130,6969609946 | 0,9548 | 1,6767 |
| 23. | | 32,5917310428 | 214,3587553485 | 0,9282 | 1,7565 |
| 24. | | 31,3691330073 | 113,5769365888 | 0,9310 | 1,8364 |
| 25. | | 39,0548397142 | 46,9923940762 | 0,9133 | 1,9162 |
| 26. | | 31,9828849138 | 150,2108928893 | 0,9296 | 1,9960 |
| 27. | | 22,3313338274 | 74,8833230820 | 0,9513 | 2,0759 |
| 28. | | 35,0841258445 | 202,0177250384 | 0,9225 | 2,1557 |
| 29. | | 6,1717736153 | 206,0394754809 | 0,9868 | 2,2356 |
| 30. | | 16,3471733267 | 52,7275817626 | 0,9646 | 2,3154 |
| 31. | | 28,9148740863 | 270,1461654762 | 0,9365 | 2,3953 |

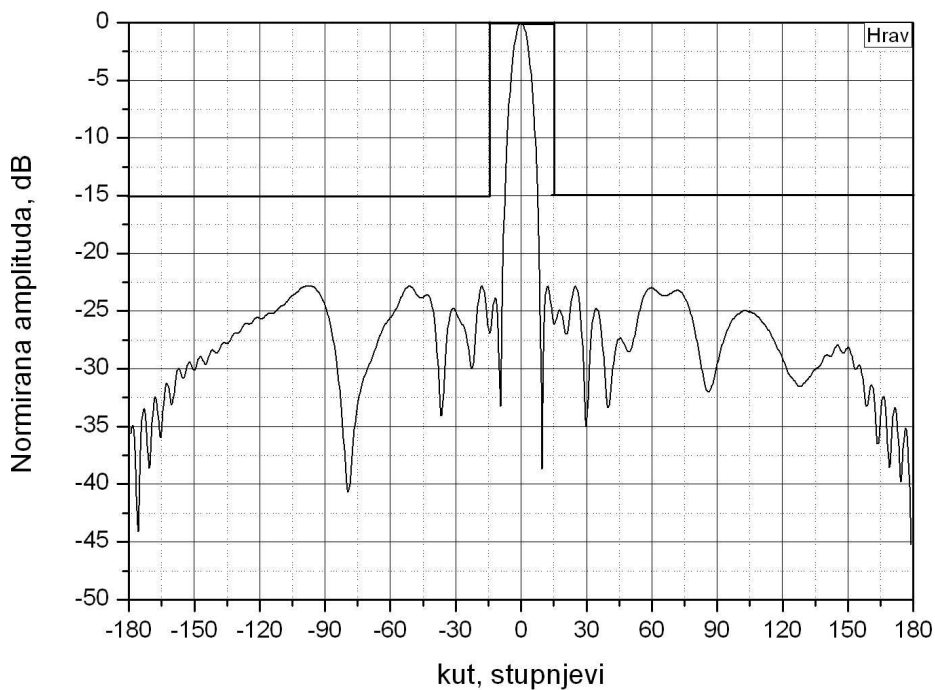
Maska koja je postavljena na karakteristične veličine dijagrama zračenja iznosi: $A_{\max} = -15$ dB, $BW_{-3\text{dB}} \max = 30^\circ$ i $BW_{-10\text{dB}} \max = 30^\circ$, ispostavilo se da je dobar izbor jer uz optimiranje ovih parametara mogao se postići željeni dijagram zračenja.

Uz uključenje polarizacije pobude u optimizaciju, postigla se najveća vrijednost ciljne funkcije (u kontekstu slobodne konfiguracije). Rezultati su pokazali iznos ciljne funkcije od 1,167 dB/stupnju, čime je krajnji cilj postignut. Dijagram zračenja u E i H ravnini dan je Slikom 7.9.

Za sam kraj sedmog poglavlja ostavljena je Tablica 7.4. u kojoj se nalaze svi rezultati optimizacije iz 7.1., 7.2. i 7.3.



a)



b)

Slika 7.9. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz istovremeno optimiranje geometrijskih i pobudnih parametara: a) E ravnina, b) H ravnina.

Tablica 7.4. Sustavan prikaz optimizacije slobodne konfiguracije niza po svim relevantnim parametrima geometrije i pobude.

| | r_s , cm | Alfa, ° | Beta, ° | AMP | POL | Ciljna funkcija, dB/stupnju |
|--|---------------|----------------|----------------|---------------------|-----|-----------------------------|
| G E O M E T R I J A | 99,9797309212 | 0,00 | 0,00 | | | 1,020 |
| | | 37,4007659973 | 339,9964607877 | | | |
| | | 25,9862860321 | 196,4993872402 | | | |
| | | 19,7786917646 | 333,2101030787 | | | |
| | | 29,1958761999 | 355,3814759107 | | | |
| | | 13,5674352442 | 226,3559427977 | | | |
| | | 29,6249125942 | 127,4110327252 | | | |
| | | 17,6239332416 | 150,6158486363 | | | |
| | | 37,8628862392 | 208,6289358039 | | | |
| | | 8,4282153803 | 140,1974819600 | | | |
| | | 32,1269803202 | 272,9269165910 | | | |
| | | 40,2719346315 | 245,8066788626 | | | |
| | | 15,8110201225 | 299,7446324350 | | | |
| | | 12,2815900876 | 332,7269672114 | | | |
| | | 43,8702959812 | 255,2548815631 | | | |
| | | 10,7250891270 | 359,9211297101 | | | |
| | | 22,3305339400 | 281,8869495490 | | | |
| | | 38,3846344012 | 264,2406186680 | | | |
| | | 49,1776267781 | 283,1443167769 | | | |
| | | 27,6498916150 | 297,2827808914 | | | |
| | 40,4378536246 | 230,8798700585 | | | | |
| | 26,1352446296 | 328,7512618552 | | | | |
| | 35,2787642693 | 308,1056399570 | | | | |
| | 28,4923033046 | 145,0333227941 | | | | |
| | 39,2540604734 | 109,5400642460 | | | | |
| | 18,9323193369 | 246,8934510165 | | | | |
| | 14,4166782618 | 188,3738070154 | | | | |
| | 28,6724576879 | 259,0350132479 | | | | |
| | 14,8114569770 | 280,4962696721 | | | | |
| | 18,8633869425 | 274,6145813172 | | | | |
| | 23,8840250545 | 264,6293784661 | | | | |
| G E O M E T R I J A + A M P L I T U D A | 98,9325255665 | 0,00 | 0,00 | 1,00 ($k_a=3,13$) | | 1,161 |
| | | 33,9492140395 | 253,1134863863 | 0,9229 | | |
| | | 17,4697861457 | 157,0977272336 | 0,9610 | | |
| | | 22,5696209241 | 312,6047168466 | 0,9494 | | |
| | | 22,2557816896 | 217,6633710785 | 0,9501 | | |
| | | 19,7951464712 | 203,5717685359 | 0,9557 | | |
| | | 29,3961453510 | 69,3079796271 | 0,9335 | | |
| | | 14,1102635900 | 138,5962667762 | 0,9686 | | |
| | | 36,4327489125 | 30,3656262084 | 0,9170 | | |
| | | 13,8187783351 | 88,9290540750 | 0,9693 | | |
| | | 28,6707726014 | 262,4820011613 | 0,9352 | | |
| | | 34,3020256555 | 216,4807003812 | 0,9220 | | |
| | | 13,8543528660 | 178,9602659386 | 0,9692 | | |
| | | 14,6280448022 | 327,1601714841 | 0,9675 | | |
| | | 35,8678667509 | 182,8881361339 | 0,9183 | | |
| | | 19,9479618107 | 356,9037468664 | 0,9554 | | |
| | | 23,3030614843 | 166,0687323318 | 0,9477 | | |
| | | 43,3281712890 | 89,8900710417 | 0,9005 | | |
| | | 42,2278414633 | 244,7511920104 | 0,9032 | | |
| | | 26,5792631262 | 250,4283379559 | 0,9401 | | |
| | 39,7720604932 | 115,8014595777 | 0,9091 | | | |
| | 26,3800890468 | 122,4317455364 | 0,9406 | | | |
| | 32,9793334920 | 208,5145279223 | 0,9252 | | | |
| | 23,2052760094 | 112,7354013247 | 0,9479 | | | |
| | 37,9348766839 | 51,4461606307 | 0,9134 | | | |
| | 26,0667313377 | 149,5692650065 | 0,9413 | | | |
| | 17,9449618616 | 71,6539559996 | 0,9599 | | | |
| | 28,4552286330 | 200,6749565546 | 0,9357 | | | |
| | 7,5042356024 | 215,7219971211 | 0,9834 | | | |

Vanja Mandrić: Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi

| | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------------|-------------------------|-------|
| | 10,1392439037 | 43,5119630106 | 0,9776 | | |
| | 21,0577786224 | 264,3130589821 | 0,9528 | | |
| 97,9158037873 | 0,00 | 0,00 | 1,00 ($k_a=3,04$) | 0,00 ($k_{pol}=0,14$) | 1,167 |
| | 40,9970937964 | 261,8707494755 | 0,9088 | 0,0798 | |
| | 17,3685694212 | 158,0814085738 | 0,9623 | 0,1597 | |
| | 22,9768604574 | 321,5983662010 | 0,9499 | 0,2395 | |
| | 23,6441926068 | 217,6468946762 | 0,9484 | 0,3194 | |
| | 24,8694681044 | 196,4649969754 | 0,9456 | 0,3992 | |
| | 36,4677435410 | 72,5446674062 | 0,9193 | 0,4791 | |
| | 12,4427054897 | 145,7748625038 | 0,9732 | 0,5589 | |
| | 40,6418179458 | 33,8220681354 | 0,9097 | 0,6387 | |
| | 22,0532495370 | 86,6782094682 | 0,9519 | 0,7186 | |
| | 24,7477232053 | 255,1647387606 | 0,9459 | 0,7984 | |
| | 29,3273487784 | 226,4253997483 | 0,9356 | 0,8783 | |
| | 20,2459047298 | 176,2346861377 | 0,9560 | 0,9581 | |
| | 15,4945296174 | 321,9160369024 | 0,9665 | 1,0379 | |
| | 38,7122920125 | 180,2354941682 | 0,9141 | 1,1178 | |
| | 23,0059293542 | 346,9037468664 | 0,9498 | 1,1976 | |
| | 32,0545716496 | 161,8481150002 | 0,9294 | 1,2775 | |
| | 43,9950913038 | 95,4265863687 | 0,9018 | 1,3573 | |
| | 47,7083442660 | 248,9962095048 | 0,8931 | 1,4372 | |
| | 34,2906656135 | 249,2909660110 | 0,9243 | 1,5170 | |
| | 43,3096554875 | 118,0858382402 | 0,9034 | 1,5968 | |
| | 20,7645091111 | 130,6969609946 | 0,9548 | 1,6767 | |
| | 32,5917310428 | 214,3587553485 | 0,9282 | 1,7565 | |
| | 31,3691330073 | 113,5769365888 | 0,9310 | 1,8364 | |
| | 39,0548397142 | 46,9923940762 | 0,9133 | 1,9162 | |
| | 31,9828849138 | 150,2108928893 | 0,9296 | 1,9960 | |
| | 22,3313338274 | 74,8833230820 | 0,9513 | 2,0759 | |
| | 35,0841258445 | 202,0177250384 | 0,9225 | 2,1557 | |
| | 6,1717736153 | 206,0394754809 | 0,9868 | 2,2356 | |
| | 16,3471733267 | 52,7275817626 | 0,9646 | 2,3154 | |
| | 28,9148740863 | 270,1461654762 | 0,9365 | 2,3953 | |

G
E
O
M
+
A
M
P
+
O
L

8. VERIFIKACIJA TEORIJSKOG MODELA EKSPERIMENTALNIM MJERENJIMA

U ovom poglavlju obrađuje se nekoliko različitih antenskih nizova realiziranih laboratorijskim modelima, a eksperimentalnim mjerenjima verificira se svaki odabrani model sfernog niza. U pitanju su sferne antene različitih radijusa, različitog broja antena u nizu, te različitog rasporeda elemenata.

Svrha ovog istraživanja i verifikacije jest potvrda ispravnosti rezultata dobivenih izračunom za prethodno ispitivane konfiguracije niza. Ograničenja prostora i opreme, uvjetovala su i ograničenja u opsegu i vrstama mjerenja koja su izvedena na razvijenim i izrađenim modelima antenskih nizova. Tako je promjena faze pobude ograničena samo na dvije promjenjive faze, a broj pobuđenih antena ograničen je na šest. U svrhu verifikacije izrađena su dva modela sfernih nizova i to jedan ikosaedarske s 45 mikrotrakastih antena, a drugi spiralne konfiguracije s po 40 mikrotrakastih antena. Uz njih mjerenja su obuhvatila i dva već postojeća modela i to jedan s po dvije valovodne antene na sfernom odsječku radijusa sfere od 69 cm i jedan sa 6 valovodnih antena na polusferi radijusa 30 cm.

Eksperimentalni dio mjerenja odrađen je korištenjem sljedeće opreme:

- spektralni analizator: model ANRITSU MS271D,
- generator signala: model AGILENT 8648B.

Uređaj za pomak faze izveden je i testiran na Elektrothničkom fakultetu u Osijeku, a zasnovan je na naponski kontroliranom LGA zakretaču faze tipa PS196-315 tvrtke Skyworks.

Sva eksperimentalna mjerenja odrađena su u Laboratoriju za Visokofrekvencijska mjerenja Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku, u prostoru s elektromagnetskim odjekom.

a) Sferni niz načinjen od dvije valovodom napajane otvor antene:

Prvi od izmjerenih nizova jest niz kojeg čine dvije valovodne antene smještene na uzemljenoj sfernoj podlozi. Ovaj niz je prethodno bio izveden, ali su sustavna mjerenja dijagrama zračenja načinjena u sklopu ove disertacije te objavljena u literaturi [57].

Parametri mjerenja su sljedeći:

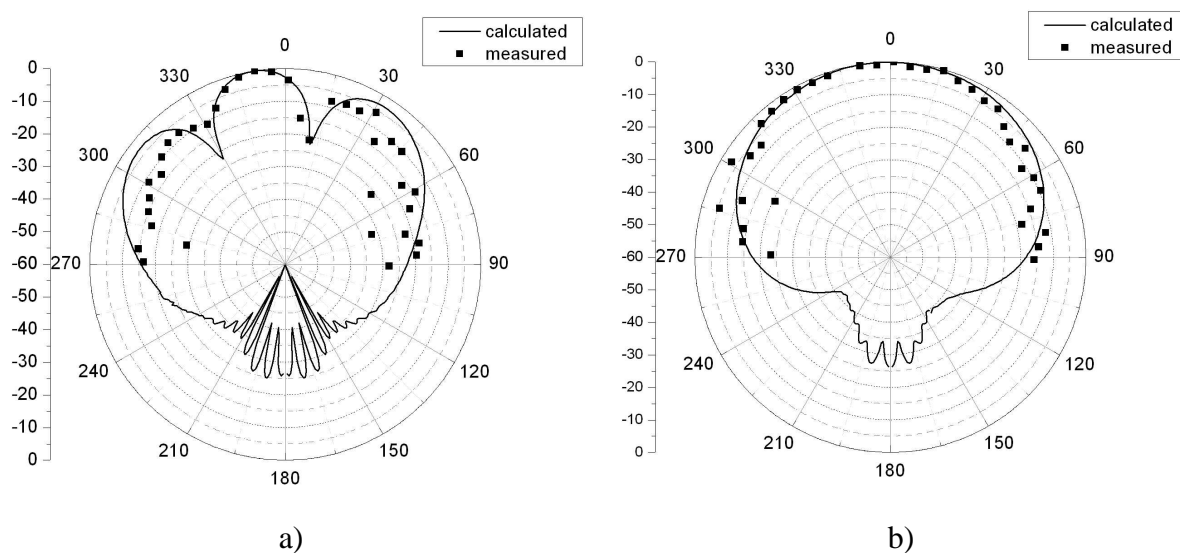
- radijus sfere $r_s=69$ cm,
- radijus valovoda $r_w=6$ cm,
- položaj antena: $\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=18^\circ$, $\beta_{21}=90^\circ$,
- frekvencija $f=1,75$ GHz,

- amplituda pobude je konstantna,
- fazna kompenzacija pobude je uključena, a Slika 8.1. prikazuje odabrani model niza.

Ispitivanje ovog niza išlo je u tom smjeru da je nakon izračuna normiranog dijagrama zračenja u VF laboratoriju izmjeren dijagram zračenja istog niza.



Slika 8.1. Sferni eksperimentalni model predstavljen s dva valovoda (radijus valovoda $r_w=6\text{cm}$) na sferi radijusa $r_s=69\text{cm}$ ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=18^\circ$, $\beta_{21}=90^\circ$) [57].



Slika 8.2. Normirani dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=18^\circ$, $\beta_{21}=90^\circ$) [57].

Oba valovoda pobuđena su signalom konstantne amplitude na frekvenciji 1,75 GHz, te se na udaljenosti od 2 m detektiralo polje čiji su dijagrami zračenja u E i H ravnini dani Slikom 8.2. Kako je i bilo za očekivati, maksimum dijagrama zračenja, tj. najveća vrijednost glavne latice nalazi se na polovici vrijednosti položaja dva valovoda, točnije -9° . Slika 8.2. prikazuje usporedbu izračunatih i izmjerenih rezultata zračenja dvaju valovoda [57], a rezultati su dani polarnim dijagramima.

Iz prethodne je slike vidljivo poklapanje teorijskih i eksperimentalnih podataka, što ukazuje na ispravnost laboratorijskog modela niza te računalne rutine.

b) Sferni niz načinjen od šest valovodom napajanih otvor antena:

Sljedeći ispitivani sferni antenski niz je niz od šest valovoda koji mogu formirati različite podnizove.

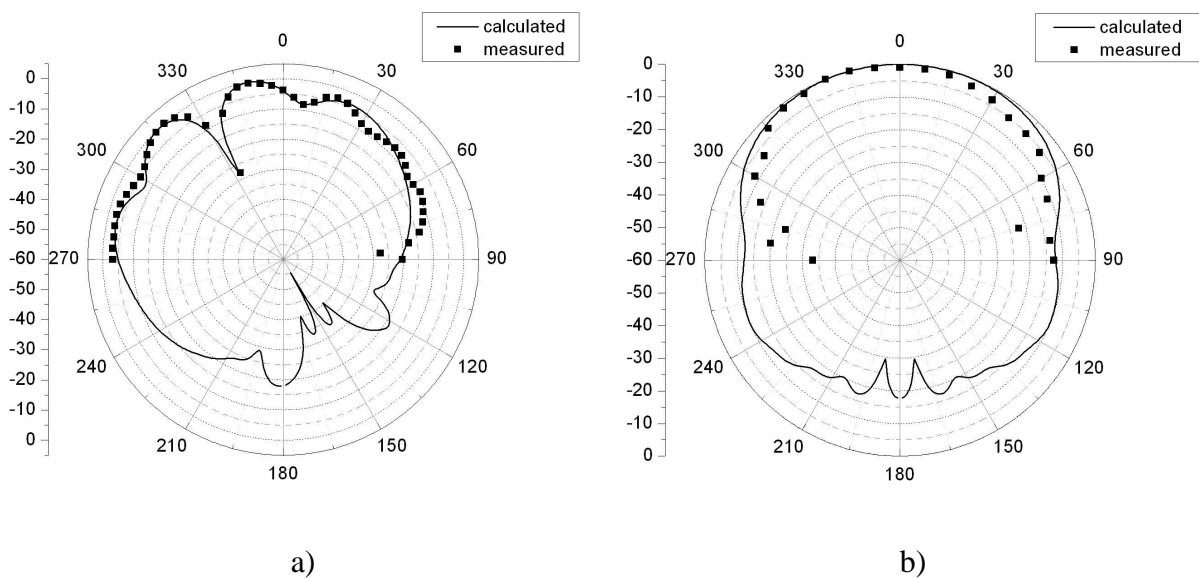
Parametri mjerenja:

- radijus sfere $r_s=30$ cm,
- radijus valovoda $r_w=6$ cm,
- položaj antena: $\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ; \alpha_2=56^\circ, \beta_{21}=36^\circ, \beta_{22}=108^\circ, \beta_{23}=180^\circ, \beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$,
- frekvencija $f=1,75$ GHz,
- amplituda pobude je konstantna,
- fazna kompenzacija pobude je uključena, a Slika 8.3. prikazuje odabrani model niza.



Slika 8.3. Sforni eksperimentalni model kojeg predstavljaju šest valovoda (radijus valovoda $r_w=6\text{cm}$) na sferi radijusa $r_s=30\text{cm}$ ($\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ; \alpha_2=56^\circ, \beta_{21}=36^\circ, \beta_{22}=108^\circ, \beta_{23}=180^\circ, \beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$) [57].

U prvom od sljedeća tri ispitivanja odabrana su dva valovoda na mjestima $\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ; \alpha_2=56^\circ, \beta_{21}=180^\circ$, a mjereno je i izračunato diferencijalno dijagram zračenja prikazano Slikom 8.4.

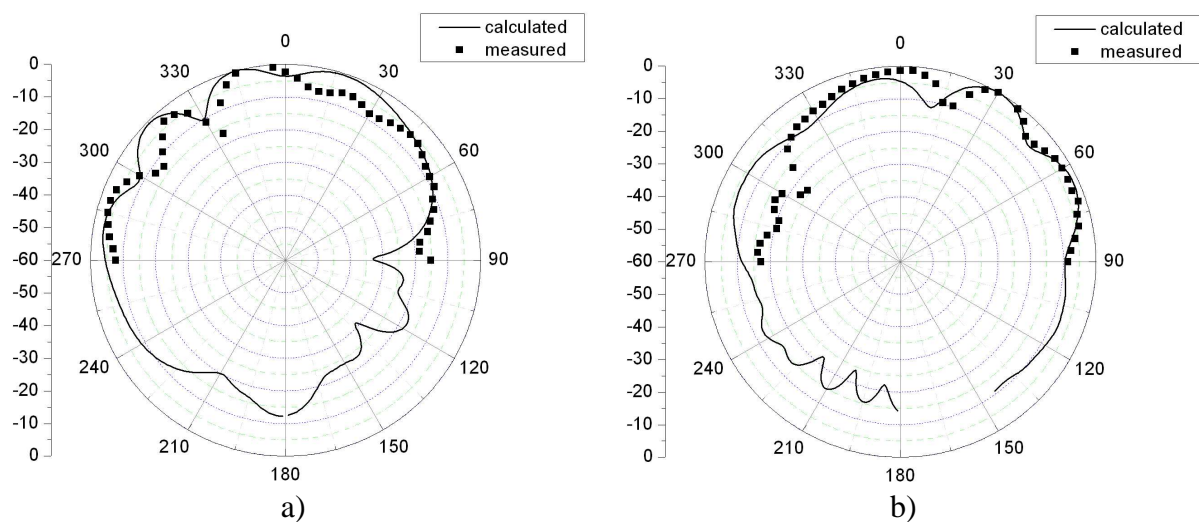


Slika 8.4. Normirani diferencijalni dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ; \alpha_2=56^\circ, \beta_{21}=180^\circ$) [57].

Diferencijalni dijagram zračenja podrazumijeva dijagram u kojem je jedan valovod u odnosu na drugi pobuđen s razlikom u fazi 180° , a *notch peak* takvog dijagrama zračenja nalazi se na polovici vrijednosti položaja drugog valovoda, tj. na -28° .

Kako je iz slike vidljivo, mjerenja su rađena za obje ravnine posebno i to od -90° do $+90^\circ$ po azimutu, eksperimentalni podaci poklapaju se s očekivanim simulacijama. Pošto prostorije u kojima su mjereni dijagrami zračenja nisu bezječne komore, postoje mala odstupanja izračunatih i izmjerenih podataka.

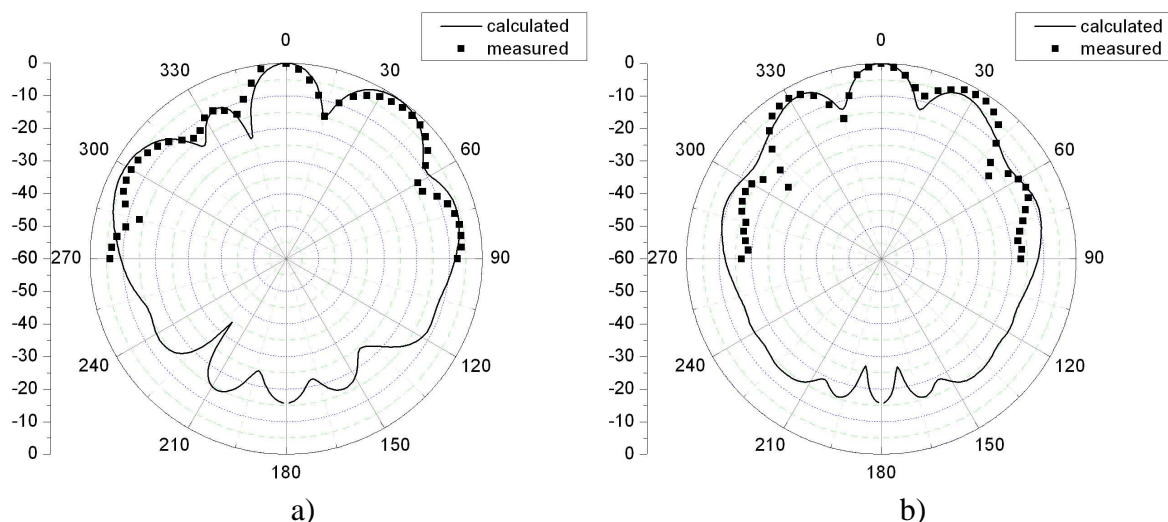
Iduće istraživanje odvija se na podnizu kojeg čine tri valovoda na sferi čije su pozicije $\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=108^\circ$, $\beta_{22}=180^\circ$. Mjerenja su opet pokazala dobra poklapanja s teoretskim rezultatima što i prikazuje Slika 8.5., a odstupanja od očekivanih rezultata također su posljedica postojanja elektromagnetskog odjeka u prostoriji za mjerenje dijagrama zračenja.



Slika 8.5. Normirani dijagram zračenja tri valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=108^\circ$, $\beta_{22}=180^\circ$) [57].

Kad su u pitanju šest aktivnih valovoda u isto vrijeme, mjerenja su se također složila s proračunima.

U mjerenju dijagrama zračenja sva tri antenska niza amplitude pobude su konstantnog iznosa, a Slika 8.6. prikazuje dijagram zračenja šest zračećih valovoda na sferi u E i H ravnini za teorijski i eksperimentalni slučaj posebno.



Slika 8.6. Normirani dijagram zračenja šest valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=36^\circ$, $\beta_{22}=108^\circ$, $\beta_{23}=180^\circ$, $\beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$) [57].

Prethodna tri dijagrama predstavljaju dijagrame zračenja antenskih nizova s dviju različitih antena, te je svaki proračun koji je izveden moment metodom uz upotrebu spektralne metode potvrđen eksperimentalnim rezultatima. Sama mjerenja nisu izvedena u idealnim uvjetima, što znači da okolina unosi pogreške mjerenjima, a i sami modeli izrađeni su s određenom pogreškom, te unatoč tome, poklapanja teoretskih i eksperimentalnih rezultata vrlo su dobra.

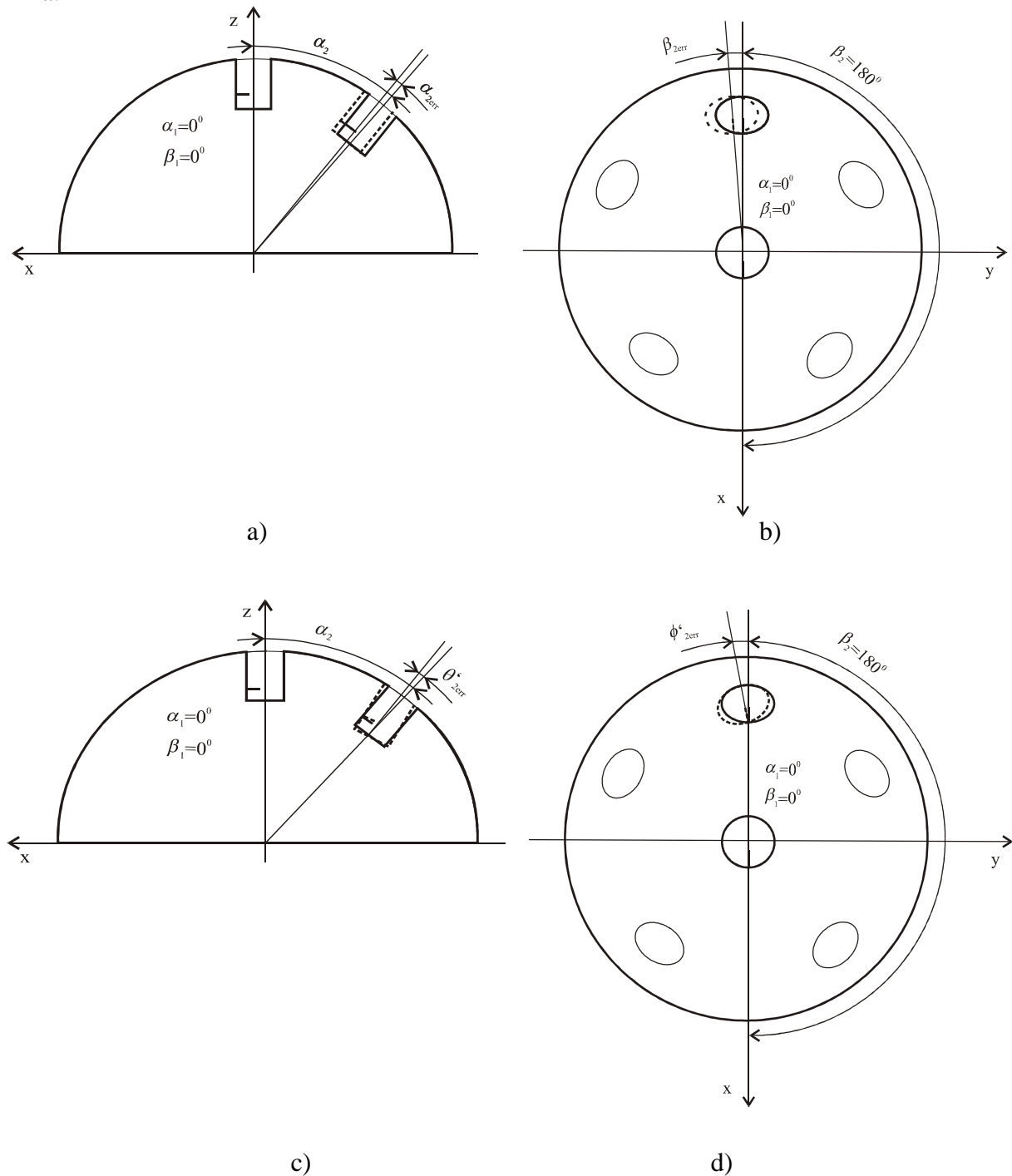
Sljedeći primjeri istraživanja ispituju upravo na pogreške pri izradi modela antenskog niza.

c) Utjecaj pogreške laboratorijskog modela na rezultate eksperimentalnih mjerenja:

Sljedećih nekoliko ispitivanja dijagrama zračenja antenskih nizova napravljeno je u programu Fortran, a niz čini šest valovoda raspoređenih u ikosaedarsku strukturu ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=36^\circ$, $\beta_{22}=108^\circ$, $\beta_{23}=180^\circ$, $\beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$). Cilj ovih proračuna je odrediti utjecaj pogreške u konstrukciji laboratorijskog modela na ukupni dijagram zračenja. Pogreške pri izradi modela uzete su u obzir u svakom proračunu dijagrama zračenja, a pobuda je takva da je su amplituda i faza konstantne u svakom od sljedećih slučajeva [58].

Postoje tri osnovne grupe pogrešaka koje se dogode u izradi modela, a dijele se na pogreške u dimenzijama (primjerice radijusa sfere i radijusa valovoda: r_{serr} , r_{werr}), pogreške elevacijskog i azimutalnog položaja svakog elementa (α_{2err} , β_{2err}), te pogreške lokalnih kuteva (θ'_{2err} , ϕ'_{2err}).

Sljedećim su slikama (Slika 8.7. a), b), c) i d)) predstavljene pogreške modela antenskog niza.



Slika 8.7. Pogreške modela antenskog niza: a) elevacijski položaj drugog valovoda α_2 i pogreška elevacijskog položaja α_{2err} ; b) azimutalni položaj drugog valovoda β_2 i pogreška azimutalnog položaja β_{2err} ; c) elevacijski položaj drugog valovoda α_2 i pogreška lokalnog kuta θ'_{2err} , d) azimutalni položaj drugog valovoda β_2 i pogreška lokalnog kuta ϕ'_{2err} [58].

Pogreške pri izradi modela uzete su u obzir pri proračunu polja na način da se dodaju njihovim osnovnim vrijednostima:

$$r_{se} = r_s + r_{serr}; r_{we} = r_w + r_{werr} \quad (8-1)$$

$$\alpha_{2e} = \alpha_2 + \alpha_{2err}; \beta_{2e} = \beta_2 + \beta_{2err} \quad (8-2)$$

$$\theta'_e = \theta' + \theta'_{2err}; \phi'_e = \phi' + \phi'_{2err} \quad (8-3)$$

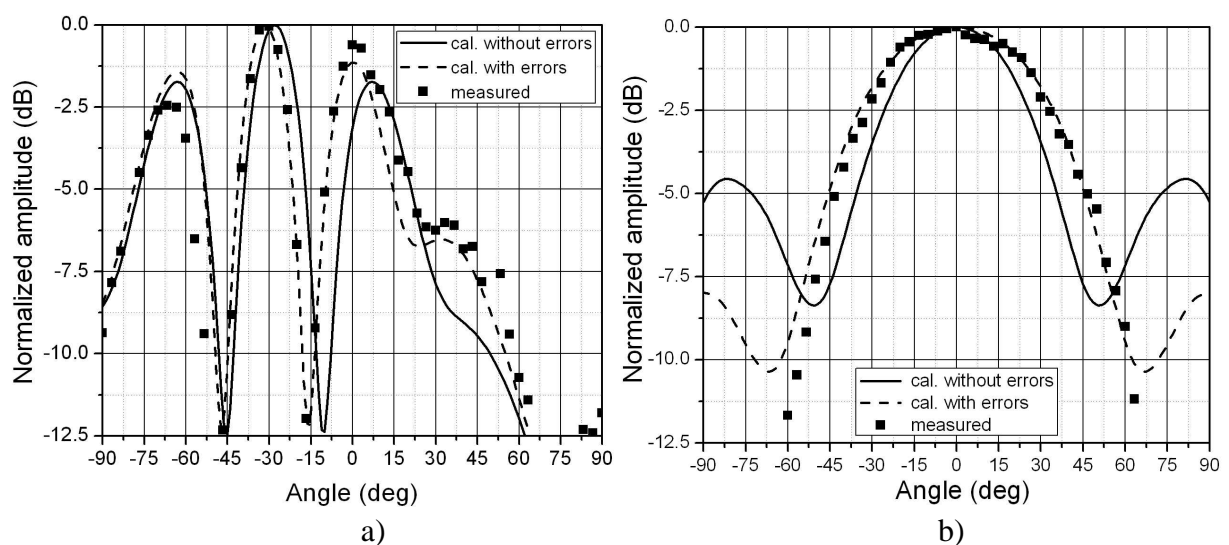
gdje su θ' i ϕ' koordinate u lokalnom koordinatnom sustavu.

Za početak, analizirana su dva valovoda – centralni s koordinatama (α_1, β_1) i drugi valovod (α_2, β_2) (pošto su u igri dva valovoda postojat će samo jedan indeks).

Nakon postignutih zaključaka za dva valovoda, razmatrat će se utjecaj pogreške izrade šest valovoda u nizu, a ono što treba napomenuti jest da je razmak između dva valovoda na prvom prstenu $1,82 \lambda_0$, a udaljenost centralnog valovoda od valovoda u sljedećem prstenu iznosi $1,71 \lambda_0$ (ovo nisu optimirane vrijednosti).

Slika 8.8. prikazuje izračunati i izmjereni normirani dijagram zračenja dva valovoda. Pogreške laboratorijskog modela uključene u proračun su sljedeće:

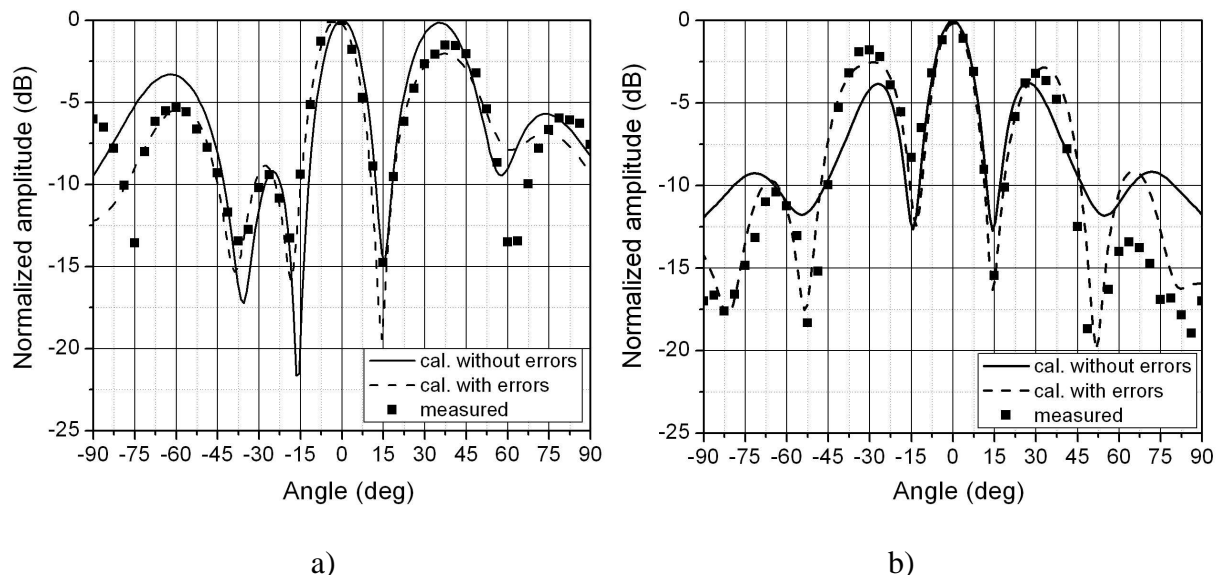
- $\alpha_{2err} = 2^\circ$,
- $\beta_{2err} = 0^\circ$,
- $\theta'_{2err} = 5^\circ$,
- $\phi'_{2err} = 0^\circ$,
- $r_{serr} = 0$ cm i
- $r_{werr} = 0$ cm.



Slika 8.8. Izmjereni i izračunati dijagram zračenja dva valovoda sfernog niza s uključenim pogreškama: a) E ravnina; b) H ravnina [58].

Kako je iz Slike 8.8. vidljivo, na dijagramima se nalaze po tri krivulje koje predstavljaju dijagrame zračenja dvaju valovoda. Punom linijom prikazano je zračenje niza kad ne postoje pogreške modela, zatim, iscrtkana linija znači izračunate vrijednosti s uključenim pogreškama u proračun, a kvadratići predstavljaju izmjerene vrijednosti – laboratorijski model realiziran s pogreškama. U području mjerenja od -60° do $+60^\circ$ izračunati i izmjereni podaci se dobro poklapaju, dok u području izvan 60° dolazi do odstupanja u rezultatima zbog nesavršenosti prostorije u kojoj se mjerilo zračenje tih dvaju valovoda. Ipak, ovo je još jedna potvrda ispravnosti teorijskog i eksperimentalnog modela sfernog niza.

Isto tako ispitan je utjecaj pogrešaka eksperimentalnog modela u slučaju šest valovoda, a sistematizirane pogreške nalaze se u Tablici 8.1. Slika 8.9. prikazuje dijagrame zračenja šest valovoda u obje ravnine uz pogreške uzete u obzir.



Slika 8.9. Izmjereni i izračunati dijagrami zračenja šest valovoda sfernog niza s uključenim pogreškama u proračun: a) E ravnina; b) H ravnina [58].

Iz svega do sad navedenog, može se zaključiti da ako se uzmu u proračun pogreške pri izradi pojedinog laboratorijskog modela, izračunati i izmjereni dijagrami zračenja usporedivi su, a rezultati praktičnog dijela prate rezultate teorijskog dijela ispitivanja.

Tablica 8.1. Pogreške antenskog niza šest valovoda [58].

| β_{nm} (deg) | α_{err} (deg) | θ'_{err} (deg) | β_{err} (deg) | ϕ'_{err} (deg) |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 36 | 0 | +2.0 | -2.5 | +9 |
| 108 | +1.0 | +3.5 | -1.0 | -13 |
| 180 | +2.0 | +5.0 | 0 | 0 |
| 252 | 0 | +6.0 | +2.0 | +13 |
| 324 | 0 | -2.0 | -1 | -8 |

d) Sferni niz ikosaedarske konstelacije sastavljen od mikrotrakastih antena:

Slijedeći sferni niz čine mikrotrakaste antene smještene na aluminijskoj polusferi radijusa $r_s=30$ cm. Elementi su raspoređeni u ikosaedarsku konfiguraciju, $P_n=4$, a model je izveden s ukupno 31 antenom. Amplituda pobude u svakom od narednih situacija je konstantna, a kompenzacija faze je uključena. Radna frekvencija je $f=1,45$ GHz.

Laboratorijski model prikazan je Slikom 8.10., a zračenje takvog niza obrađeno je u [59].



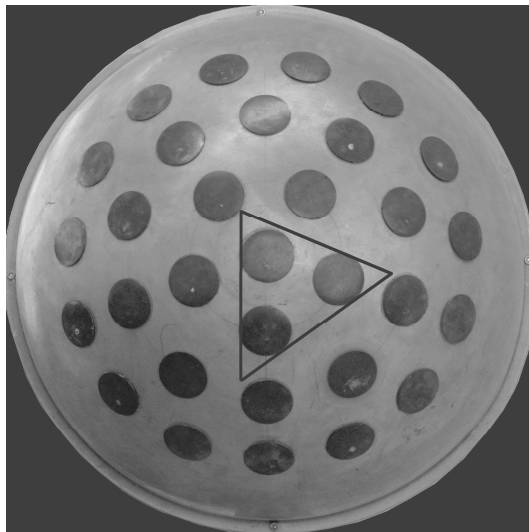
Slika 8.10. Sferni eksperimentalni model kojeg predstavljaju 31 kružna mikrotrakaste antena (radijus mikrotrakaste antene $r_p=2,65$ cm) na sferi radijusa $r_s=30$ cm raspoređenih u ikosaedarsku konfiguraciju [59].

Položaj elementa je: $\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$; $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$, $\beta_{53}=144^0$, $\beta_{54}=216^0$, $\beta_{55}=288^0$; $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$, $\beta_{42}=36^0$, $\beta_{43}=72^0$, $\beta_{44}=108^0$, $\beta_{45}=144^0$, $\beta_{46}=180^0$, $\beta_{47}=216^0$, $\beta_{48}=252^0$, $\beta_{49}=288^0$, $\beta_{410}=324^0$, $\alpha_3=45^0$, $\beta_{31}=0^0$, $\beta_{32}=24^0$, $\beta_{33}=48^0$, $\beta_{34}=72^0$, $\beta_{35}=96^0$, $\beta_{36}=120^0$, $\beta_{37}=144^0$, $\beta_{38}=168^0$, $\beta_{39}=192^0$, $\beta_{310}=216^0$, $\beta_{311}=240^0$, $\beta_{312}=264^0$, $\beta_{313}=288^0$, $\beta_{314}=312^0$, $\beta_{315}=336^0$,

a karakteristike niza:

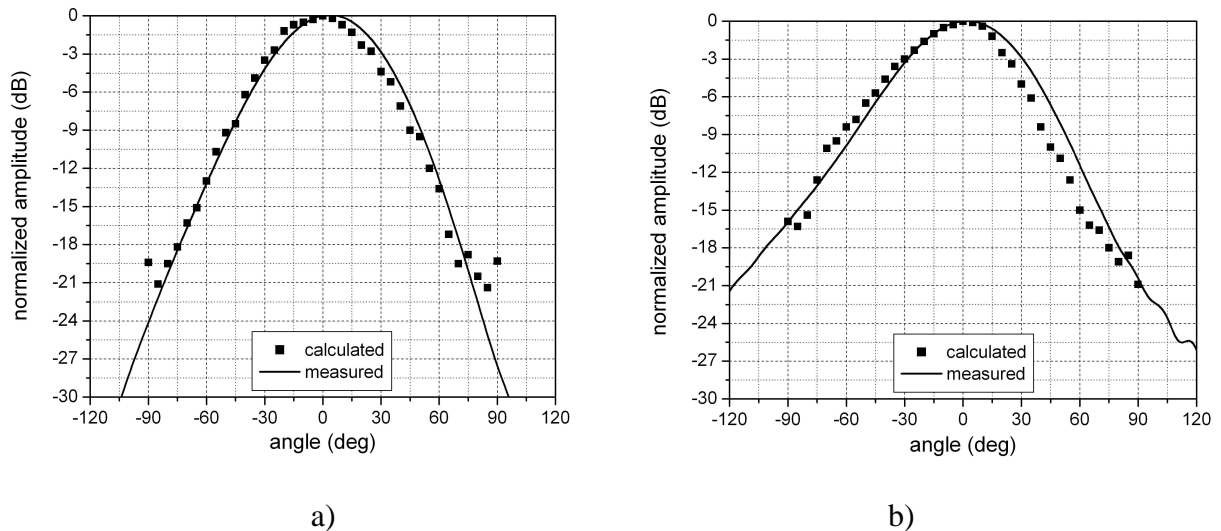
- radijus sfere: $r_s = 30$ cm,
- radijus mikrostrip antene: $r_w = 6$ cm,
- frekvencija: $f=1,45$ GHz,
- amplituda pobude svakog elementa je konstantna i
- promjena faze pobude.

Prvi podniz i njegov dijagram zračenja istražen u ovom dijelu je niz od tri antene čije su pozicije $\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$. Slika 8.11. prikazuje niz sa odabranim elementima, a Slika 8.12. pripadajući dijagram zračenja uz uvjet da je fazna kompenzacija pobude uključena, a maksimum zračenja postavljen na $\theta_{\max}=0^0$, $\varphi_{\max}=0^0$.



Slika 8.11. Prvi eksperimentalni podniz tri mikrotrakaste antene ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$) [59].

$\theta_{\max}=0^0$ i $\varphi_{\max}=0^0$ predstavljaju koordinate maksimalnog zračenja postavljenog u centar sfere. Mjereni podaci prate izračunatu krivulju polja uz manja odstupanja zbog neidealnih uvjeta mjerenja.

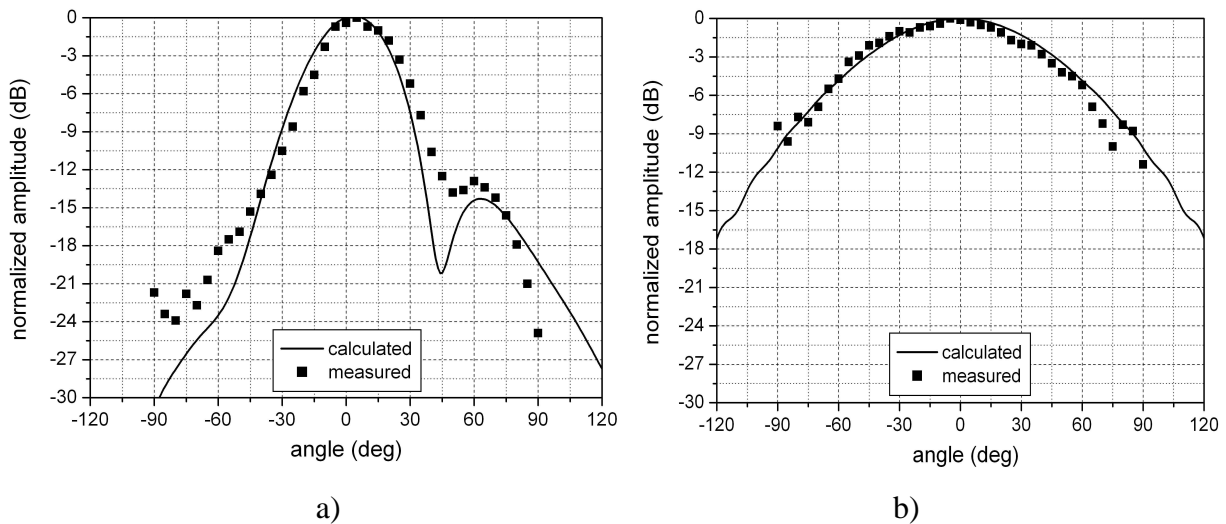


Slika 8.12. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=0^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude [59].

Drugi podniz čine također tri antene drukčije raspoređene. Njihove su pozicije $\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$, a sljedeće slike prikazuju aktivne antene u niza i njihov dijagram zračenja. Maksimum zračenja postavljen je u središte antene, a fazna kompenzacija pobude je uključena.

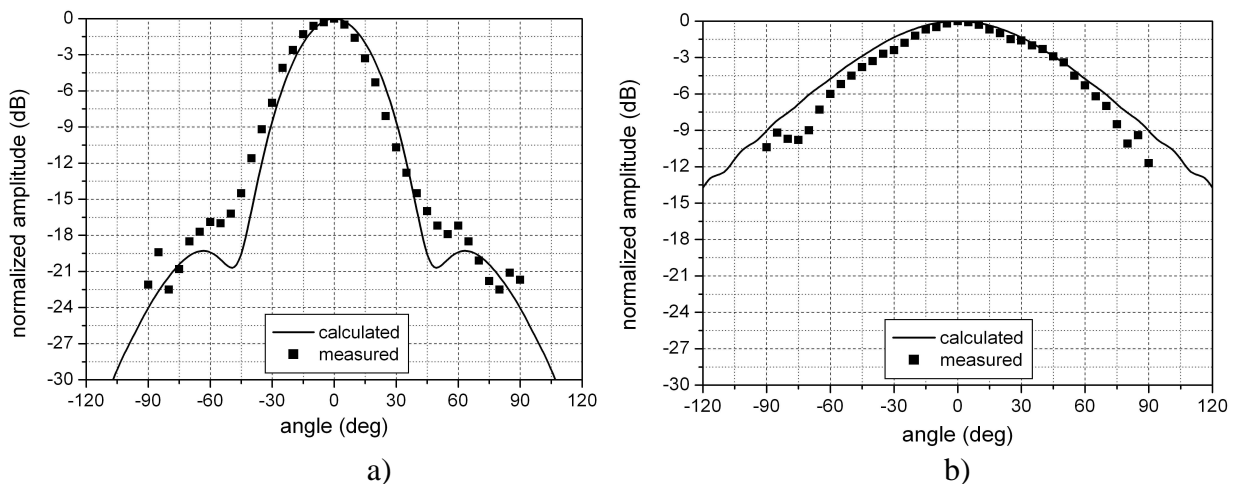


Slika 8.13. Drugi eksperimentalni podniz tri mikrotrakaste antene ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$) [59].



Slika 8.14. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=0^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude [59].

I ovo je ispitivanje zračenja niza napravljeno tako da je središte maksimuma zračenja postavljeno u centar sfere, pa je u skladu s tim maksimalna vrijednost polja postignuta na 0° . Slika 8.14. prikazuje (teorijski i eksperimentalno dobiven) dijagram zračenja niza, gdje se podaci o polju izmjerеноg dijagrama zračenja vrlo dobro poklapaju s očekivanim rezultatima uz manja odstupanja u području mjerenja iznad 30° .



Slika 8.15. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=15^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude [59].

Sljedeće ispitivanje izvršeno je na istom nizu ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$), samo je promijenjen kut maksimuma zračenja na $\theta_{\max}=15^0$, $\varphi_{\max}=0^0$. Faza je također uključena, a amplituda pobude i dalje je konstantna. Slika 8.15. prikazuje izračunati i izmjereni normirani dijagram zračenja.

Svako od ova tri posljednja ispitivanja pokazalo je da eksperimentalni model odgovara teorijskim proračunima i postavkama. Iz dijagrama je vidljiva relativno široka glavna latica, no to je posljedica manjeg broja aktivnih elemenata u nizu. Cilj je prethodnog istraživanja verifikacija ispravnosti eksperimentalnih modela kao i razvijene računalne rutine. Sva prethodna mjerenja upravo potvrđuju ispravnosti eksperimentalnih modela kao i razvijene računalne rutine.

e) Smanjenje razine bočnih latica neuniformnom raspodjelom elemenata na sferi:

Svi podaci o mjerenju dijagrama zračenja različitih nizova dobiveni u [57], [58] i [59], postignuti su uz uvjet da je geometrijski parametar poput položaja antena na sferi konstantan. No, kako je u prethodnim poglavljima optimizacije i to pitanje obrađeno, u literaturi [56] mogu se naći i informacije o utjecaju promjene ovog parametra na dijagram zračenja sfernog niza.

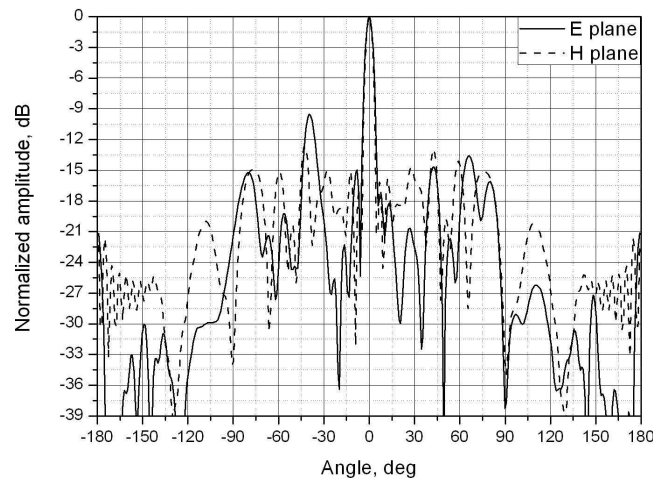
Kako bi se vidio doprinos neuniformne raspodjele elemenata na površini sfere, prvo je ispitan uniformni raspored antena. I dalje je u pitanju ikosaedarska konfiguracija, a selekcijskim kutom od 75° obuhvaćena je 71 antena u nizu – cilj: uži i usmjeren dijagram zračenja. Kut maksimalnog zračenja niza je postavljen u polu sfere.

Postavke simulacije su sljedeće:

- antenski elementi koji čine niz su kružni valovodi raspoređeni po prstenovima,
- broj prstenova u nizu: 5, plus centralni element u polu sfere,
- početna konfiguracija: ikosaedar,
- ukupni broj elemenata: 71,
- radijus sfere: $r_s=65,5$ cm ($3,83\lambda$),
- radijus valovoda: $r_w=6$ cm ($0,35\lambda$),
- radna frekvencija: $f=1,75$ GHz,
- svi su elementi niza pobuđeni signalom konstantne amplitude, a fazna kompenzacija pobude je uključena.

Uniformna raspodjela antenskih elemenata na sferi

Uniformna raspodjela antenskih elemenata na sferi podrazumijeva jednako razmaknute antene, a prstenovi koji su obuhvaćeni u proračunu nalaze se na $\alpha_1=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ i 75° . Slika 8.21. prikazuje normiran dijagram zračenja u E i H ravnini, a osnovne karakteristike takvog dijagrama rezimirane su Tablicama 8.3. do 8.9.



Slika 8.16. Normirani dijagram zračenja sfernog niza kojeg čini 71 antena raspoređenih u ikosaedarsku konfiguraciju: $\alpha_1=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ i 75° ; kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=10^0, \varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude [56].

Veći broj aktivnih elemenata u nizu doprinosi užoj glavnoj latici, što je vidljivo na slici 8.16. Iz Slike 8.16. također se može zaključiti da je dijagram zračenja nešto bolji u H ravnini po pitanju razine bočnih latica. Vrijednost prve značajne bočne latice nalazi se na -9,55 dB od maksimalne vrijednosti glavne latice (E ravnina), i -12,66 dB (H ravnina). Ove su vrijednosti bočnih latica referentne vrijednosti s kojima će se uspoređivati dijagrami zračenja postignuti neuniformnom raspodjelom elemenata, a dobivene vrijednosti trebaju biti niže od gore navedenih.

Određenom promjenom položaja antena na sferi, tj., narušavanjem izvorne konfiguracije, žele se postići bolji rezultati dijagrama zračenja. Sljedeće poglavlje govori upravo o efektu neuniformne raspodjele elemenata na sferi.

Neuniformna raspodjela antenskih elemenata na sferi:

Neuniformna raspodjela elemenata na sferi predstavlja promjenu položaja antena po elevacijskom kutu prstena na kome se ti elementi nalaze, a bit će predstavljena u nekoliko varijanti položaja elemenata:

i) raspodjela po eksponencijalnoj funkciji:

$$\alpha_{l1} = A_1 + B_1 \cdot e^{\left(\frac{l}{C_1}\right)} \quad (8-4)$$

koja je konveksna funkcija, gdje α_{l1} predstavljaju elevacijske kuteve alfa koji su obuhvaćeni gornjim izrazom, l su prstenovi sa antenskim elementima, a β_{lk} određuju azimutalni položaj svakog elementa na sferi. Najmanja udaljenost dva elementa ($\alpha_{\min} = 6,55^\circ$) određena je minimalnim dopuštenim razmakom između dvije antene (ne smije pasti ispod $\lambda/2$).

ii) raspodjela po polinomnoj funkciji:

$$\alpha_{l2} = A_2 + B_2 \cdot l + C_2 \cdot l^2 + D_2 \cdot l^3, \quad (8-5)$$

također konveksnoj funkciji, a α_{l2} i l imaju isto značenje kao u prethodnom izrazu.

iii) po trigonometrijskoj funkciji:

$$\alpha_{l3} = A_3 + B_3 \cdot \cos\left(\frac{l}{C_3} - D_3\right), \quad (8-6)$$

iv) po logaritamskoj funkciji:

$$\alpha_{l4} = A_4 + B_4 \cdot \log(l + C_4) \quad (8-7)$$

v) po pravilu prostih brojeva (*eng. prime number spacing*):

Neuniformna raspodjela elemenata na sferi predstavljena principom prostih brojeva ne može se izraziti određenim oblikom funkcije kao što je to učinjeno u prethodnim slučajevima.

Tablica 8.2. prikazuje prstenove na kojima se nalaze antenski elementi, a oni se mogu izračunati umnoškom minimalne udaljenosti između dva elementa ($6,55^\circ$) i vrijednosti u koloni *Distance*.

Tablica 8.2. Raspored prstenova elemenata predstavljenih shemom prostih brojeva [56].

| Broj prstena l | Prosti Brojevi PN | $2xPN/100$ | Udaljenost | Kut prstena α_{ls} (°) |
|------------------|-------------------|------------|------------|-------------------------------|
| 5 | 53 | 1.06 | 1,06 | 6,94 |
| 4 | 59 | 1.18 | 2,24 | 14,67 |
| 3 | 61 | 1.22 | 3,46 | 22,66 |
| 2 | 67 | 1.34 | 4,80 | 31,44 |
| 1 | 71 | 1.42 | 6,22 | 40,74 |

Gore navedene funkcije (i, ii, iii, iv i v) predstavljaju funkcije po kojima se neuniformno pomiču elementi po sferi, tj., njihove elevacijske koordinate mijenjaju se po zadanim pravilima. Tablica 8.3. pokazuje elevacijske pozicije prstenova ikosaedarskog niza za različite funkcije neuniformnog rasporeda antena na sferi. Tablice 8.4., 8.5., 8.6. i 8.7. prikazuju različite karakteristične vrijednosti očitane na dijagramima zračenja svih razmatranih nizova neuniformno raspoređenih antena u E i H ravnini.

Tablica 8.3. Položaj prstenova po kojima su raspoređeni antenski elementi dani neuniformnom raspodjelom [56].

| NENUNIFORMNE SCHEME | α_{5i} (°) | α_{4i} (°) | α_{3i} (°) | α_{2i} (°) | α_{1i} (°) |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Eksponecijalna ($i = 1$) | 6,58 | 13,98 | 22,31 | 31,66 | 42,18 |
| Polinomna ($i = 2$) | 6,55 | 13,99 | 22,51 | 32,24 | 43,35 |
| Trigonometrijska ($i = 3$) | 6,57 | 15,73 | 26,59 | 38,10 | 49,15 |
| Logaritamska ($i = 4$) | 6,55 | 14,39 | 24,11 | 36,97 | 55,99 |
| Prosti brojevi ($i = 5$) | 6,94 | 14,67 | 22,66 | 31,44 | 40,74 |

Prethodni izračuni i postignuti dijagrami zračenja svjedoče o tome da se neuniformnom raspodjelom elemenata na sferi mogu poboljšati karakteristike dijagrama zračenja.

Sljedeće tablice rezultat su istraživanja utjecaja neuniformne razdiobe elemenata na dijagram zračenja u usporedbi s uniformnom ikosaedarskom konstelacijom.

Tablica 8.4. Razina prve značajne bočne latice za različite neuniformne konfiguracije elemenata [56].

| | Uniform. E, dB | Eksponen. E, dB | Polinom. E, dB | Trigonomet. E, dB | Logaritam. E, dB | Prosti brojevi E, dB |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|------------------|----------------------|
| E – rav. | -9,55 | -16,50 | -16,39 | -16,59 | -16,63 | -15,99 |
| H – rav. | -12,66 | -14,21 | -14,21 | -16,05 | -17,79 | -14,29 |

Tablica 8.5. Razina bočne latice na 180° za različite neuniformne konfiguracije elemenata [56].

| | Uniform. E, dB | Eksponen. E, dB | Polinom. E, dB | Trigonomet. E, dB | Logaritam. E, dB | Prosti brojevi E, dB |
|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| E - rav. | -21,15 | -38,26 | -35,42 | -40,08 | -35,50 | -37,29 |
| H - rav. | -22,37 | -39,51 | -36,60 | -41,15 | -36,42 | -38,15 |

Tablica 8.6. Najviša razina bočne latice u opsegu $abs(\text{Angle}) \geq 90^\circ$ za različite neuniformne konfiguracije elemenata [56].

| | Uniform. E, dB | Eksponen. E, dB | Polinom. E, dB | Trigonomet. E, dB | Logaritam. E, dB | Prosti brojevi E, dB |
|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| E - rav. | -26,21 | -28,26 | -35,16 | -27,90 | -34,13 | -33,10 |
| H - rav. | -19,99 | -23,46 | -21,28 | -24,09 | -26,65 | -30,08 |

Tablica 8.7. Širina glavne latice za različite neuniformne konfiguracije elemenata [56].

| | Uniform. | Eksponen. | Polinom. | Trigonomet. | Logaritam | Prosti brojevi |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | HPBW ($^\circ$) | HPBW ($^\circ$) | HPBW ($^\circ$) | HPBW ($^\circ$) | HPBW ($^\circ$) | HPBW ($^\circ$) |
| E - rav. | 4,78 | 7,22 | 7,10 | 8,53 | 6,20 | 7,28 |
| H - rav. | 4,44 | 7,04 | 6,90 | 5,98 | 6,18 | 7,14 |

Tablice 8.8. i 8.9. prikazuju udaljenost susjednih antenskih elemenata te susjednih prstenova za različite neuniformne konfiguracije elemenata.

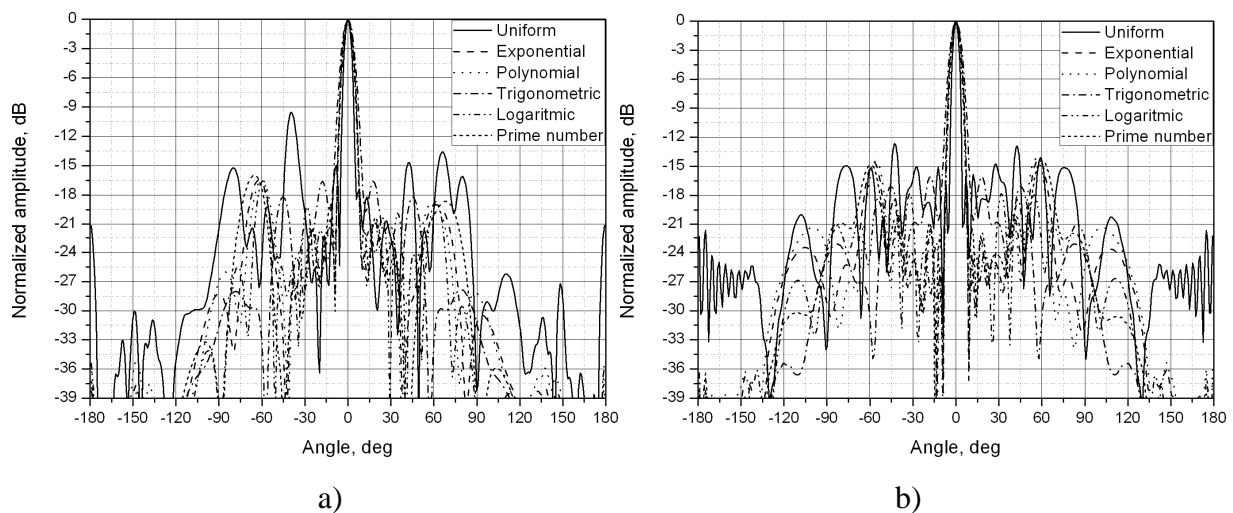
Tablica 8.8. Udaljenost susjednih antenskih elemenata po prstenu za različite neuniformne konfiguracije elemenata (N_l je broj antena raspoređenih na l^{om} prstenu) [56].

| $d_{lk} = \frac{2\pi r_s \sin \alpha_l}{N_l}$ | Uniform. | Eksponen. | Polinom. | Trigonomet. | Logaritam. | Prosti brojevi |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Min. razmak d_{lk}/λ_0 | 1,67 ($l=2$) | 0,88 ($l=5$) | 0,88 ($l=5$) | 0,88 ($l=5$) | 0,88 ($l=5$) | 0,93 ($l=5$) |
| Maks. razmak d_{lk}/λ_0 | 1,99 ($l=5$) | 1,29 ($l=1$) | 1,60 ($l=1$) | 1,46 ($l=1$) | 1,60 ($l=1$) | 1,26 ($l=1$) |

Tablica 8.9. Udaljenost susjednih prstenova za različite neuniformne konfiguracije elemenata [56].

| $d_{l-1,l} = \frac{\pi r_S (\alpha_{l-1} - \alpha_l)}{180}$ | Uniform. | Eksponen. | Polinom. | Trigonomet. | Logaritam. | Prosti brojevi |
|---|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Min. razmak $d_{l-1,l} / \lambda_0$ | 1,61 (all) | 0,70 (d_{56}) | 0,70 (d_{56}) | 0,70 (d_{56}) | 0,70 (d_{56}) | 0,74 (d_{56}) |
| Maks. razmak $d_{l-1,l} / \lambda_0$ | 1,61 (all) | 1,13 (d_{12}) | 1,19 (d_{12}) | 1,18 (d_{12}) | 2,04 (d_{12}) | 0,99 (d_{12}) |

Slika 8.17. a) i b) prikazuje grupirane dijagrame zračenja (za svaku razdiobu) u E i H ravnini posebno, a na taj je način evidentnije smanjenje razine bočnih latica neuniformne razdiobe elemenata u odnosu na uniformnu razdiobu.



Slika 8.17. Dijagram zračenja uniformne konfiguracije nasuprot neuniformnim razdiobama elemenata na sferi a) E ravnina b) H ravnina [56].

Ovim je još jednom pokazano da neuniformna razdioba elemenata na sferi može poboljšati dijagram zračenja u odnosu na uniformnu – ikosaedarsku konfiguraciju. Člankom [56] ideja o neuniformnoj razdiobi elemenata na sferi primijenjena je na sferni niz koji daje prethodne dijagrame zračenja uz sljedeće postavke simulacije:

f) Mjerenja dijagrama zračenja ikosaedarskog rasporeda mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm:

Raspored antena na mjerenom modelu niza na sferi je ikosaedarski s podjelom osnovnog trokuta ikosaedra na 4 dijela ($P_n = 4$). Za niz ikosaedarskog rasporeda načinjeno je mjerenje dijagrama zračenja za dva podniza koja se međusobno razlikuju po elevacijskom kutu prstena sa pet mikrotrakastih antena. Na taj način ostvaren je slučaj sfernog niza različite gustoće elemenata. Uz to amplituda pobude antena na elevacijskom prstenu i antene u polu sfere nije jednaka. To je ostvareno kontroliranom podjelom signala koji se dovodi antenama.

Parametri mjerenja za ikosaedarski niz na sferi, veće gustoće elemenata:

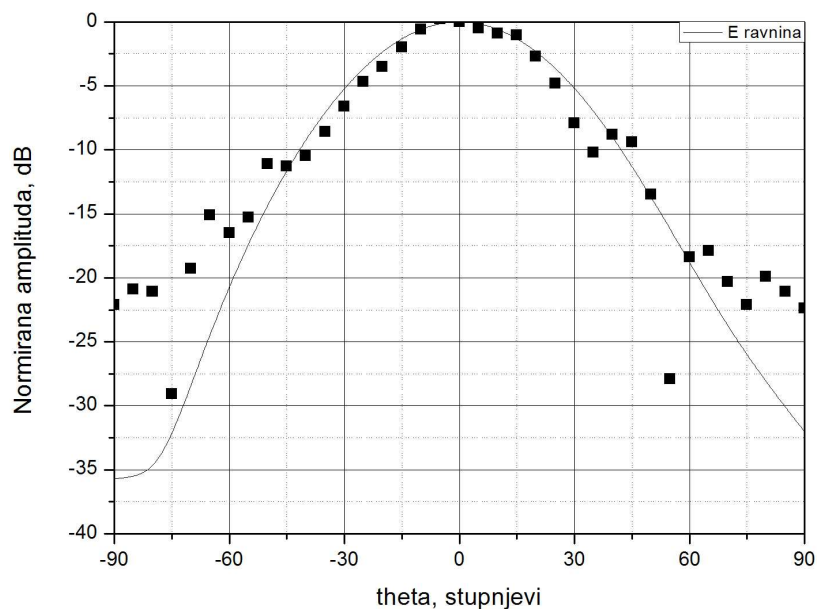
- radijus sfere $r_s=30$ cm,
- radijus mikrotrakastih antena $r_p=2,65$ cm,
- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:
 - prvi prsten: $\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ$;
 - drugi prsten: $\alpha_2=15^\circ, \beta_{21}=0^\circ, \beta_{22}=72^\circ, \beta_{23}=144^\circ, \beta_{24}=216^\circ$ i $\beta_{25}=288^\circ$;
- frekvencija $f=1,7$ GHz;
- amplituda pobude nije konstantna: prvi prsten pobuđen je jediničnom amplitudom, dok je drugi prsten (za oba slučaja) pobuđen s približno 70% vrijednosti pobudne amplitude prvog prstena;
- fazna kompenzacija pobude je uključena.

Slika 8.18. prikazuje model ikosaedarskog niza s 45 mikrotrakastih antena na sferi uz označene aktivne antene niza.

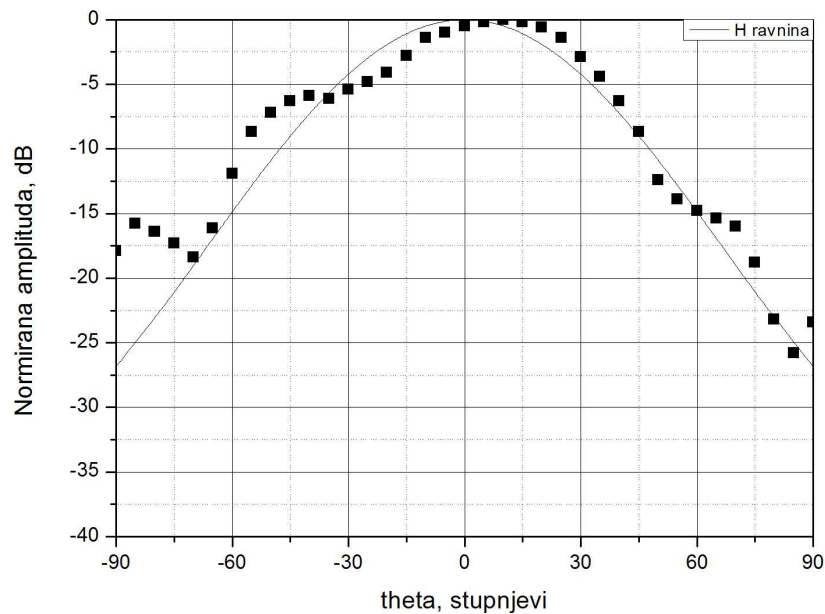


Slika 8.18. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$, $\alpha_2=15^\circ$, $\beta_{21}=0^\circ$, $\beta_{22}=72^\circ$, $\beta_{23}=144^\circ$, $\beta_{24}=216^\circ$, $\beta_{25}=288^\circ$).

Dijagrami na Slici 8.19. prikazuju dijagrame zračenja, sfernog niza mikrotrakastih antena ikosaedarskog rasporeda, na sferi radijusa 30 cm, u dvije ortogonalne ravnine.



a)



b)

Slika 8.19. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$, $\alpha_2=15^\circ$, $\beta_{21}=0^\circ$, $\beta_{22}=72^\circ$, $\beta_{23}=144^\circ$, $\beta_{24}=216^\circ$, $\beta_{25}=288^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina.

Parametri mjerenja za ikosaedarski niz na sferi, manje gustoće elemenata:

- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:

prvi prsten: $\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$;

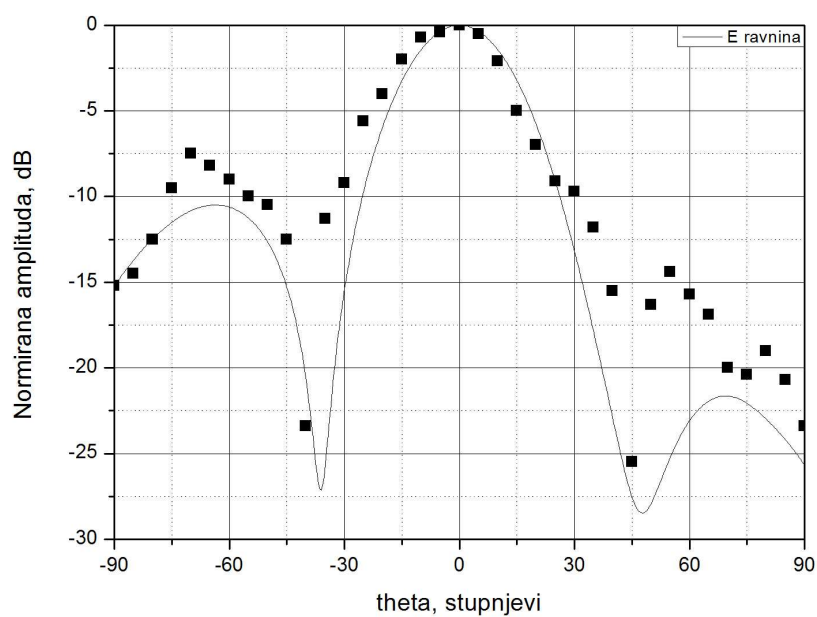
drugi prsten: $\alpha_2=30^\circ$, $\beta_{21}=0^\circ$, $\beta_{22}=72^\circ$, $\beta_{23}=144^\circ$, $\beta_{24}=216^\circ$ i $\beta_{25}=288^\circ$;

Ova mjerena konfiguracija je podniz osnovnog niza s $P_n=4$ uz pobudu neparnih mikrotrakastih antena drugog prstena kao što je prikazano na Slici 8.20.

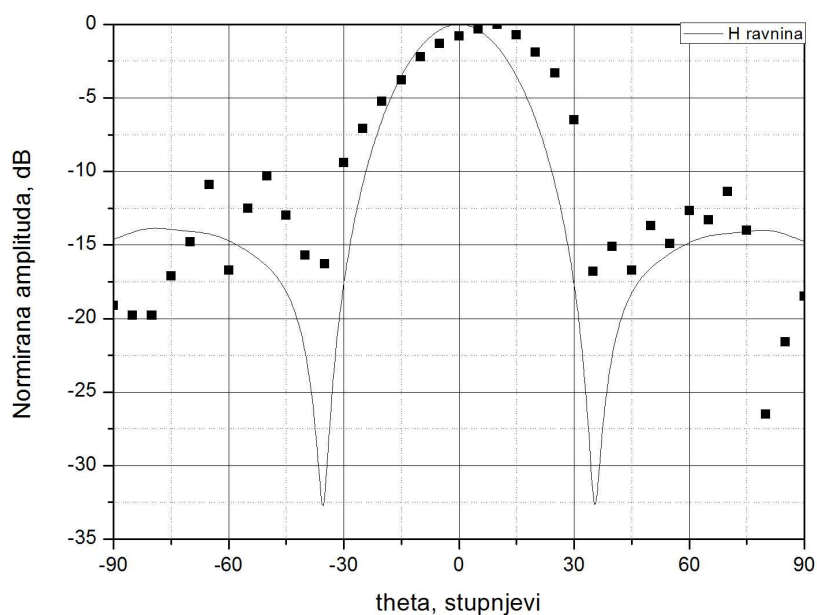
Važno je napomenuti i to da je pobuda mikrotrakastih antena izvedena u jednoj točki koaksijalnim vodom. Sve točke pobude nalaze se u točkama ravnina koje prolaze paralelama sfere pri čemu je centralna ravnina z-x ravnina.



Slika 8.20. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$, $\alpha_2=30^\circ$, $\beta_{21}=0^\circ$, $\beta_{22}=72^\circ$, $\beta_{23}=144^\circ$, $\beta_{24}=216^\circ$, $\beta_{25}=288^\circ$).



a)



b)

Slika 8.21. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$, $\alpha_2=30^\circ$, $\beta_{21}=0^\circ$, $\beta_{22}=72^\circ$, $\beta_{23}=144^\circ$, $\beta_{24}=216^\circ$, $\beta_{25}=288^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina.

Usporede li se dijagrami zračenja ova dva niza dolazi se do zaključka da niz gušće konstelacije (manjeg elevacijskog kuta) rezultira jednom osnovnom laticom veće širine dok se kod niza manje gustoće pojavljuje uža glavna latica i dodatne bočne latice. Ovakav zaključak je naizgled u kontradikciji s generalnim zaključkom koji je rezultat istraživanja u prethodnim poglavljima. Zaključak prethodnih poglavlja je da povećanje gustoće rezultira sužavanjem glavne latice. Ipak, taj zaključak je ispravan kad se radi o više prstenova, a time i više antena niza. Pri mjerenju ovih podnizova radi se o samo jednom prstenu s po 5 antena kojem se diskretno mijenja elevacijska pozicija (15° i 30°).

Odstupanja izmjerenih i računski dobivenih dijagrama zračenja ova dva niza, u najvećoj mjeri, jesu rezultat refleksije u prostoru u kojem je mjerenje izvedeno. Pogreške očitavanja i izvedbe modela čine drugi dio utjecaja na izmjerene rezultate.

Unatoč svim utjecajima poklapanja izmjerenih i računski dobivenih rezultata su vrlo dobra.

g) Mjerenja dijagrama zračenja spiralnog rasporeda mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm:

Posljednja mjerenja u sklopu ove disertacije odrađena su također na sferi radijusa 30 cm, a 45 antenskih elemenata raspoređeno po pravilu spiralne konfiguracije. I u ovom su slučaju obrađena dva podniza različite gustoće, a amplituda pobude je konstantna za zadani niz.

Parametri mjerenja spiralnog niza antena na sferi, veće gustoće elemenata su:

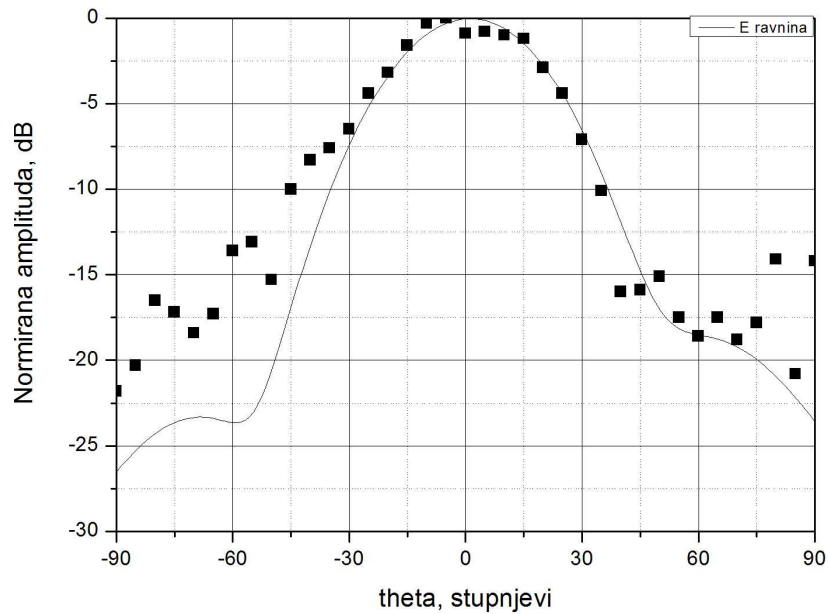
- radijus sfere $r_s=30$ cm,
- radijus mikrotrakastih antena $r_p=2,65$ cm,
- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:
 $\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=11,48^\circ$, $\beta_2=153,07^\circ$; $\alpha_3=14,07^\circ$, $\beta_3=226,18^\circ$; $\alpha_4=16,26^\circ$,
 $\beta_4=286,03^\circ$; $\alpha_5=18,19^\circ$, $\beta_5=337,99^\circ$; $\alpha_6=19,95^\circ$, $\beta_6=24,58^\circ$.
- frekvencija $f=1,7$ GHz;
- amplituda pobude je konstantna;
- fazna kompenzacija pobude nije uključena.

Slika 8.22. prikazuje model spiralnog niza s 45 mikrotrakastih antena na sferi uz označene aktivne antene niza.

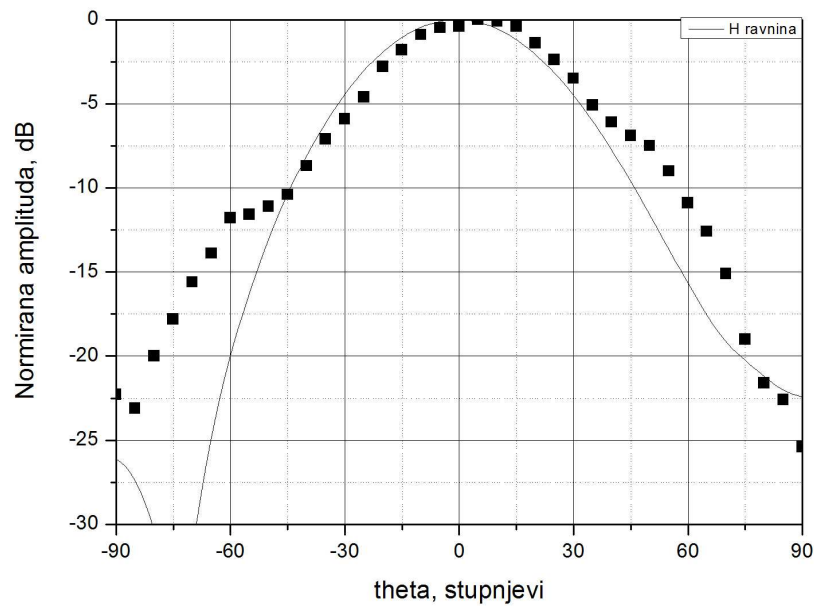


Slika 8.22. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=11,48^\circ$, $\beta_2=153,07^\circ$; $\alpha_3=14,07^\circ$, $\beta_3=226,18^\circ$; $\alpha_4=16,26^\circ$,
 $\beta_4=286,03^\circ$; $\alpha_5=18,19^\circ$, $\beta_5=337,99^\circ$; $\alpha_6=19,95^\circ$, $\beta_6=24,58^\circ$).

Slikom 8.23. prikazani su dijagrami zračenja sfernog niza mikrotrakastih antena ikosaedarskog rasporeda, na sferi radijusa 30 cm, u dvije ortogonalne ravnine.



a)



b)

Slika 8.23. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=11,48^\circ$, $\beta_2=153,07^\circ$; $\alpha_3=14,07^\circ$, $\beta_3=226,18^\circ$; $\alpha_4=16,26^\circ$, $\beta_4=286,03^\circ$; $\alpha_5=18,19^\circ$, $\beta_5=337,99^\circ$; $\alpha_6=19,95^\circ$, $\beta_6=24,58^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina.

Parametri mjerenja za spiralni niz na sferi, manje gustoće elemenata:

- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:

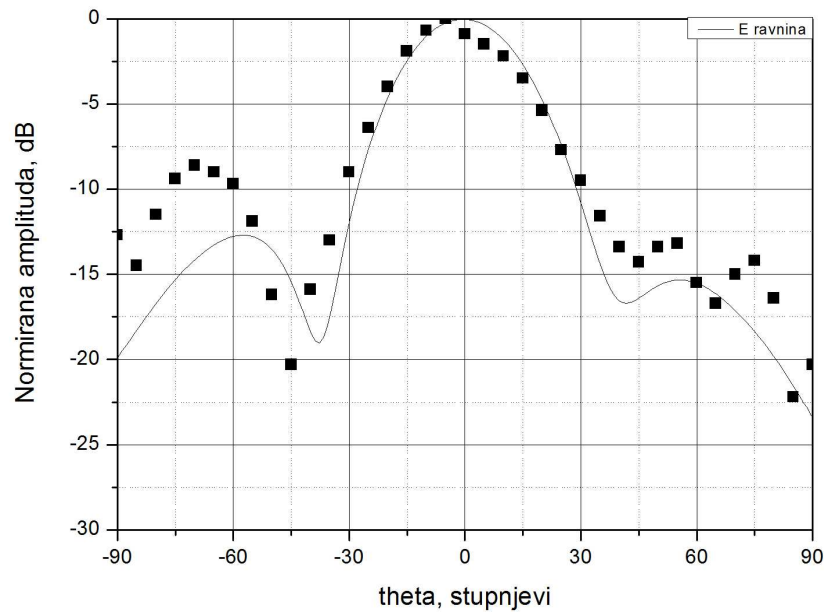
$\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=14,07^\circ$, $\beta_2=226,18^\circ$; $\alpha_3=18,19^\circ$, $\beta_3=337,99^\circ$; $\alpha_4=21,57^\circ$,
 $\beta_4=67,22^\circ$; $\alpha_5=24,50^\circ$, $\beta_5=143,93^\circ$; $\alpha_6=27,13^\circ$, $\beta_6=212,40^\circ$.

Slika 8.24. prikazuje odabrani podniz elemenata, a Slika 8.25. pripadajuće dijagrame zračenja u E i H ravnini

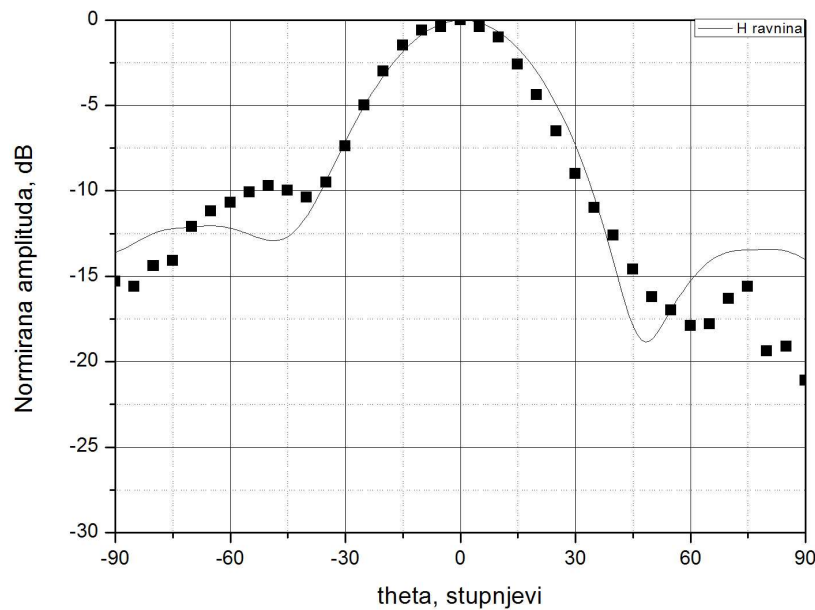
Pobuda mikrotrakastih antena izvedena je u jednoj točki koaksijalnim vodom. Sve točke pobude nalaze se u točkama ravnina koje prolaze paralelama sfere pri čemu je centralna ravnina z-x ravnina.



Slika 8.24. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=14,07^\circ$, $\beta_2=226,18^\circ$; $\alpha_3=18,19^\circ$, $\beta_3=337,99^\circ$; $\alpha_4=21,57^\circ$,
 $\beta_4=67,22^\circ$; $\alpha_5=24,50^\circ$, $\beta_5=143,93^\circ$; $\alpha_6=27,13^\circ$, $\beta_6=212,40^\circ$).



a)



b)

Slika 8.25. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ$, $\beta_1=49,94^\circ$; $\alpha_2=14,07^\circ$, $\beta_2=226,18^\circ$; $\alpha_3=18,19^\circ$, $\beta_3=337,99^\circ$; $\alpha_4=21,57^\circ$, $\beta_4=67,22^\circ$; $\alpha_5=24,50^\circ$, $\beta_5=143,93^\circ$; $\alpha_6=27,13^\circ$, $\beta_6=212,40^\circ$)

a) E ravnina b) H ravnina.

I u slučaju dijagrama zračenja spiralnih podnizova dolazi se do zaključka kao u prethodnoj situaciji kada su u pitanju ikosaedarski podnizovi. Usporede li se dijagrami zračenja ova dva podniza, također se može vidjeti da niz gušće konstelacije rezultira jednom

osnovnom laticom veće širine dok se kod niza manje gustoće pojavljuje uža glavna latica i dodatne bočne latice. Takav je dijagram zračenja rezultat manjeg broja antena u nizu.

Na dijagramima zračenja prikazanih slikama 8.23. i 8.25. vidljiva su odstupanja računskih i izmjerenih vrijednosti, a ona su rezultat refleksije u prostoru mjerenja, te uslijed pogreške očitavanja, i također, izvedbe modela.

Unatoč svim utjecajima poklapanja izmjerenih i računski dobivenih rezultata su vrlo dobra.

9. Zaključak

Najviše rezultata istraživanja antenskih nizova postoji u području planarnih antena. Razlog tome leži u jednostavnosti geometrije i matematičkih alata za analizu takvih sustava. Antenski se elementi raspoređuju u mrežu, a oblik često može biti pravokutni ili četvrtasti. No, takve antene imaju dosta nedotataka, npr., ograničenost frekvencijskog pojasa i maksimalni kut zakretanja glavne laticice. Neke od mana ovih nizova nastoje prevladati konformni sustavi, tj., konformne antene.

Konformne antene dobivaju naziv po svojim karakteristikama prilagodbe podlozi na koju se montiraju. Ta podloga može biti dio nekog komunikacijskog sustava, a često je važno i to da antena bude integrirana u sustav ili da ne uzrokuje promjenu aerodinamičnosti objekta na kojem se nalazi.

Osnovna razlika između konformnih i planarnih antena je u njihovoj geometriji. Geometrija konformnih antena složenija je, kao i matematika koja se primjenjuje na takav sustav. Ipak, najvažnije razlike ovih antena su u ostvarenim parametrima i karakteristikama zračenja, a time i u namjeni. Zračenjem konformne antene, preciznije sfernog niza, moguća je pokrivenost cijele hemisfere, šire frekvencijsko područje, a dobitak ne opada povećanjem kuta skeniranja.

Upravo zbog ovih prednosti nad planarnim sustavima, ovakve se antene mogu primijeniti u različitim komunikacijama – mobilnim, satelitskim, ali i u vojnoj, zrakoplovnoj i drugoj industriji. Pogodne su za praćenje satelita, telemetriji, upravljačkim procesima kao i za druge namjene.

U ovoj disertaciji analizirani su antenski elementi kao dijelovi niza te sami nizovi sastavljeni od otvora antena napajanih kružnim valovodom te mikrotrakastih antena kružnog presjeka. Obje vrste antena rade u mikrovalnom području, a dobitak je bolji ukoliko su dimenzije antene reda veličine valne duljine λ (nekoliko cm).

Kako konformne antene mogu poprimiti proizvoljni oblik za koji ne postoji konkretno analitičko rješenje, u primjeni su različite metode uz pomoć kojih se dolazi do krajnjeg rješenja ovakvih antenskih sustava. Metode analize korištene u ovoj disertaciji su *Metoda Momenata* (MoM) uz primjenu spektralne metode, te metoda ekvivalencije i metoda usklađivanja modova. MoM metoda predstavlja niz tehnika za numeričko rješavanje EM problema u kojima se fizikalni problem formulira integralnim jednadžbama s malim konačnim domenama, na kojima su odabrane nepoznanice diskretizirane. *Spektralna metoda* podrazumijeva transformaciju problema iz vremenske domene u prostornu, s tim da varijabla

nije frekvencija kako se inače očekuje, već simbolička veličina s kojom je lakše računati i doći do rješenja. Na otvor antene napajane valovodom primjenjuje se teorem ekvivalencije, tj. stvarni se problem zamjenjuje ekvivalentnim koje se zna riješiti, a daje jednako rješenje kao i originalni problem. Kod mikrotrakastih antena ovaj dio, tj. ova metoda se ne primjenjuje jer postoje stvarne struje na površini antene. Usklopu MoM metode koristi se metoda usklađivanja modova (*eng. mode matching*) kojom se jedna funkcija zamjenjuje nizom funkcija (diskretizira).

Kad su u pitanju optimizacija i sinteza dijagrama zračenja, metode korištene u posljednjem dijelu ove disertacije su *Metoda direktnog pretraživanja prostora* i *Metoda roja čestica* (PSO) - algoritam. *Metoda direktnog pretraživanja prostora* predstavlja sustavnu promjenu parametara optimizacije unutar opsega njegovih vrijednosti, dok je PSO algoritam algoritam optimizacije, a temelji se na ponašanju bioloških jedinki u situacijama preživljavanja. Ove dvije posljednje metode koriste se u optimiranju dijagrama zračenja, a pošto kriteriji optimizacije ovise o primjeni antenskog niza, optimirati dijagram zračenja u sklopu ove disertacije značilo je postići što užu glavnu laticu dijagrama (na -3 dB i -10 dB), te što nižu razinu bočnih latica (prva značajna bočna latica).

PSO algoritam korišten je za sintezu (pronalaženje) slobodne konfiguracije antenskog niza na sfernoj podlozi, te njen optimalni dijagram zračenja. Uz geometrijske parametre (radijus sfere, položaj antena), pri optimizaciji i sintezi dijagrama zračenja sfernog niza optimirane su i vrijednosti parametara pobude (amplituda i polarizacija, uz konstantnu frekvenciju i uključenu faznu kompenzaciju pobude) kako bi se ispunili zahtjevi na ciljnu funkciju kojom se određuju karakteristike željenog dijagrama zračenja. Ciljna funkcija označena kao CF_1 definirana je u dvije varijante pri čemu je prva primjenjena u optimizaciji pojedinačnih geometrijskih i pobudnih parametara u svakoj ravnini zasebno. Pri višeparametarskoj optimizaciji kao i pri sintezi korištena je ciljna funkcija CF_2 definirana kao aritmetička sredina ciljnih funkcija CF_1 u svakoj od dvije ortogonalne ravnine. Na taj način je ujednačen oblik dijagrama zračenja pri optimizaciji i sintezi. Optimizacija dijagrama zračenja izvedena je na postojećim konfiguracijama sfernih nizova: ikosaedarska, spiralna i Leopardi. Sinteza je izvedena na način optimiranja sfernog niza uz prethodno definiranje okvira sinteze koji definira granice unutar koji se mora zadržati dijagram zračenja s tim da raspored antenskih elemenata na sfernoj podlozi nije unaprijed definiran.

Optimizacija je rezultirala saznanjem da postojeće konfiguracije nisu optimalne i moguće ih je optimirati promjenom geometrijskih i pobudnih parametara. Sinteza zasnovana na saznanjima iz višeparametarske optimizacije rezultirala je novim konfiguracijama koje

povećavaju vrijednosti ciljne funkcije u odnosu na postojeće konfiguracije. Ipak, u rasporedu ovih konfiguracija može se prepoznati raspored koncentričnih elevacijskih prstenova antenskih elemenata uz stanovita odstupanja od ovog pravila.

Ekperimentalnim mjerenjima dijagrama zračenja postojećih nizova verificirali su se teorijski modeli. Iako su mjerenja izvedena u neizoliranom prostoru s puno EM jeke i prisutnim 'vanjskim' smetnjama, ona potvrđuju ispravnost teorijskog modela prema kome je izveden računalni program. Pri mjerenju su korištena dva izrađena modela sfernih nizova i to jedan ikosaedarske (s 45 mikrotrakastih antena), a drugi spiralne konfiguracije (s po 40 mikrotrakastih antena). Ovi modeli izvedeni su korištenjem alumunijske polusferne podloge s bakrenim mikrotrakastim antenama i napajani koaksijalnim vodom u jednoj točki. Uz njih, mjerenja su izvedena i na dva postojeća modela, jedan s po dvije valovodom napajane otvor antene (na sfernom odsječku radijusa sfere od 69 cm) i drugi s 6 kružna otvora napajana valovodima (na polusferi radijusa 30 cm).

U svim izmjerenim slučajevima postiglo se dobro poklapanje izračunatih i izmjerenih rezultata.

Mogućnost oblikovanja dijagrama zračenja sfernih nizova promjenom geometrijskih i pobudnih parametara zahtijeva optimizaciju dijagrama zračenja ovih nizova po definiranim parametrima. Optimizacija primjenjena u ovom radu pokazuje mogućnosti koje se otvaraju kako bi se došlo do racionalizacije materije i energije potrebne za prijenos informacija, oblikovanjem dijagrama zračenja kao i oblikovanjem sfernih (konformnih) antenskih nizova.

PRILOG I

Ikosaedarska raspodjela elementarnih antena na sfernoj podlozi:

Ikosaedarska raspodjela elemenata spada u uniformnu distribuciju elemenata na sferi, a karakteristične veličine dane sljedećom tablicom su:

P_n – broj podioka po visini jednakostraničnog trokuta (odnosi se na ukupni broj elementa na sferi);

ALFA(i) – elevacijski položaj pojedinog elementa;

BETA(ij) – azimutalni položaj pojedinog elementa.

Tablica I.I. Ikosaedarski raspored antena na sferi.

| Pn=1 | Pn=2 | Pn=3 | Pn=4 | Pn=5 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| ALFA(0) = not exist | ALFA(0) = 90 | ALFA(0) = not exist | ALFA(0) = 90 | ALFA(0) = not exist |
| ALFA(1) = 60 | ALFA(1) = 60 | ALFA(1) = 80 | ALFA(1) = 75 | ALFA(1) = 84 |
| ALFA(2) = 0 | ALFA(2) = 30 | ALFA(2) = 60 | ALFA(2) = 60 | ALFA(2) = 72 |
| | ALFA(3) = 0 | ALFA(3) = 40 | ALFA(3) = 45 | ALFA(3) = 60 |
| BETA(0,0) = not exist | | ALFA(4) = 20 | ALFA(4) = 30 | ALFA(4) = 48 |
| | BETA(0,0) = 18 | ALFA(5) = 0 | ALFA(5) = 15 | ALFA(5) = 36 |
| BETA(1,0) = 0 | BETA(0,1) = 54 | | ALFA(6) = 0 | ALFA(6) = 24 |
| BETA(1,1) = 72 | BETA(0,2) = 90 | BETA(0,0) = not exist | | ALFA(7) = 12 |
| BETA(1,2) = 144 | BETA(0,3) = 126 | | BETA(0,0) = 0 | ALFA(8) = 0 |
| BETA(1,3) = 216 | BETA(0,4) = 162 | BETA(1,0) = 12 | BETA(0,1) = 18 | |
| BETA(1,4) = 288 | BETA(0,5) = 198 | BETA(1,1) = 36 | BETA(0,2) = 36 | BETA(0,0)=not exist |
| | BETA(0,6) = 234 | BETA(1,2) = 60 | BETA(0,3) = 54 | |
| BETA(2,0) = 0 | BETA(0,7) = 270 | BETA(1,3) = 84 | BETA(0,4) = 72 | BETA(1,0) = 0 |
| | BETA(0,8) = 306 | BETA(1,4) = 108 | BETA(0,5) = 90 | BETA(1,1) = 14,4 |
| | BETA(0,9) = 342 | BETA(1,5) = 132 | BETA(0,6) = 108 | BETA(1,2) = 28,8 |
| | | BETA(1,6) = 156 | BETA(0,7) = 126 | BETA(1,3) = 43,2 |
| | BETA(1,0) = 0 | BETA(1,7) = 180 | BETA(0,8) = 144 | BETA(1,4) = 57,6 |
| | BETA(1,1) = 36 | BETA(1,8) = 204 | BETA(0,9) = 162 | BETA(1,5) = 72 |
| | BETA(1,2) = 72 | BETA(1,9) = 228 | BETA(0,10) = 180 | BETA(1,6) = 86,4 |
| | BETA(1,3) = 108 | BETA(1,10) = 252 | BETA(0,11) = 198 | BETA(1,7) = 100,8 |
| | BETA(1,4) = 144 | BETA(1,11) = 276 | BETA(0,12) = 216 | BETA(1,8) = 115,2 |
| | BETA(1,5) = 180 | BETA(1,12) = 300 | BETA(0,13) = 234 | BETA(1,9) = 129,6 |
| | BETA(1,6) = 216 | BETA(1,13) = 324 | BETA(0,14) = 252 | BETA(1,10) = 144 |
| | BETA(1,7) = 252 | BETA(1,14) = 348 | BETA(0,15) = 270 | BETA(1,11) = 158,4 |
| | BETA(1,8) = 288 | | BETA(0,16) = 288 | BETA(1,12) = 172,8 |
| | BETA(1,9) = 324 | BETA(2,0) = 0 | BETA(0,17) = 306 | BETA(1,13) = 187,2 |
| | | BETA(2,1) = 24 | BETA(0,18) = 324 | BETA(1,14) = 201,6 |
| | BETA(2,0) = 0 | BETA(2,2) = 48 | BETA(0,19) = 342 | BETA(1,15) = 216 |
| | BETA(2,1) = 72 | BETA(2,3) = 72 | | BETA(1,16) = 230,4 |
| | BETA(2,2) = 144 | BETA(2,4) = 96 | BETA(1,0) = 9 | BETA(1,17) = 244,8 |
| | BETA(2,3) = 216 | BETA(2,5) = 120 | BETA(1,1) = 27 | BETA(1,18) = 259,2 |
| | BETA(2,4) = 288 | BETA(2,6) = 144 | BETA(1,2) = 45 | BETA(1,19) = 273,6 |
| | | BETA(2,7) = 168 | BETA(1,3) = 63 | BETA(1,20) = 288 |
| | BETA(3,0) = 0 | BETA(2,8) = 192 | BETA(1,4) = 81 | BETA(1,21) = 302,4 |
| | | BETA(2,9) = 216 | BETA(1,5) = 99 | BETA(1,22) = 316,8 |
| | | BETA(2,10) = 240 | BETA(1,6) = 117 | BETA(1,23) = 331,2 |
| | | BETA(2,11) = 264 | BETA(1,7) = 135 | BETA(1,24) = 345,6 |
| | | BETA(2,12) = 288 | BETA(1,8) = 153 | |
| | | BETA(2,13) = 312 | BETA(1,9) = 171 | BETA(2,0) = 7,2 |
| | | BETA(2,14) = 336 | BETA(1,10) = 189 | BETA(2,1) = 21,6 |
| | | | BETA(1,11) = 207 | BETA(2,2) = 36 |
| | | BETA(3,0) = 0 | BETA(1,12) = 225 | BETA(2,3) = 50,4 |
| | | BETA(3,1) = 36 | BETA(1,13) = 243 | BETA(2,4) = 64,8 |
| | | BETA(3,2) = 72 | BETA(1,14) = 261 | BETA(2,5) = 79,2 |
| | | BETA(3,3) = 108 | BETA(1,15) = 279 | BETA(2,6) = 93,6 |
| | | BETA(3,4) = 144 | BETA(1,16) = 297 | BETA(2,7) = 108 |
| | | BETA(3,5) = 180 | BETA(1,17) = 315 | BETA(2,8) = 122,4 |
| | | BETA(3,6) = 216 | BETA(1,18) = 333 | BETA(2,9) = 136,8 |
| | | BETA(3,7) = 252 | BETA(1,19) = 351 | BETA(2,10) = 151,2 |
| | | BETA(3,8) = 288 | | BETA(2,11) = 165,6 |
| | | BETA(3,9) = 324 | BETA(2,0) = 0 | BETA(2,12) = 180 |

| | | |
|-----------------|------------------|--------------------|
| | BETA(2,1) = 18 | BETA(2,13) = 194,4 |
| BETA(4,0) = 0 | BETA(2,2) = 36 | BETA(2,14) = 208,8 |
| BETA(4,1) = 72 | BETA(2,3) = 54 | BETA(2,15) = 223,2 |
| BETA(4,2) = 144 | BETA(2,4) = 72 | BETA(2,16) = 237,6 |
| BETA(4,3) = 216 | BETA(2,5) = 90 | BETA(2,17) = 252 |
| BETA(4,4) = 288 | BETA(2,6) = 108 | BETA(2,18) = 266,4 |
| | BETA(2,7) = 126 | BETA(2,19) = 280,8 |
| BETA(5,0) = 0 | BETA(2,8) = 144 | BETA(2,20) = 295,2 |
| | BETA(2,9) = 162 | BETA(2,21) = 309,6 |
| | BETA(2,10) = 180 | BETA(2,22) = 324 |
| | BETA(2,11) = 198 | BETA(2,23) = 338,4 |
| | BETA(2,12) = 216 | BETA(2,24) = 352,8 |
| | BETA(2,13) = 234 | |
| | BETA(2,14) = 252 | BETA(3,0) = 0 |
| | BETA(2,15) = 270 | BETA(3,1) = 14,4 |
| | BETA(2,16) = 288 | BETA(3,2) = 28,8 |
| | BETA(2,17) = 306 | BETA(3,3) = 43,2 |
| | BETA(2,18) = 324 | BETA(3,4) = 57,6 |
| | BETA(2,19) = 342 | BETA(3,5) = 72 |
| | | BETA(3,6) = 86,4 |
| | BETA(3,0) = 0 | BETA(3,7) = 100,8 |
| | BETA(3,1) = 24 | BETA(3,8) = 115,2 |
| | BETA(3,2) = 48 | BETA(3,9) = 129,6 |
| | BETA(3,3) = 72 | BETA(3,10) = 144 |
| | BETA(3,4) = 96 | BETA(3,11) = 158,4 |
| | BETA(3,5) = 120 | BETA(3,12) = 172,8 |
| | BETA(3,6) = 144 | BETA(3,13) = 187,2 |
| | BETA(3,7) = 168 | BETA(3,14) = 201,6 |
| | BETA(3,8) = 192 | BETA(3,15) = 216 |
| | BETA(3,9) = 216 | BETA(3,16) = 230,4 |
| | BETA(3,10) = 240 | BETA(3,17) = 244,8 |
| | BETA(3,11) = 264 | BETA(3,18) = 259,2 |
| | BETA(3,12) = 288 | BETA(3,19) = 273,6 |
| | BETA(3,13) = 312 | BETA(3,20) = 288 |
| | BETA(3,14) = 336 | BETA(3,21) = 302,4 |
| | | BETA(3,22) = 316,8 |
| | BETA(4,0) = 0 | BETA(3,23) = 331,2 |
| | BETA(4,1) = 36 | BETA(3,24) = 345,6 |
| | BETA(4,2) = 72 | |
| | BETA(4,3) = 108 | BETA(4,0) = 0 |
| | BETA(4,4) = 144 | BETA(4,1) = 18 |
| | BETA(4,5) = 180 | BETA(4,2) = 36 |
| | BETA(4,6) = 216 | BETA(4,3) = 54 |
| | BETA(4,7) = 252 | BETA(4,4) = 72 |
| | BETA(4,8) = 288 | BETA(4,5) = 90 |
| | BETA(4,9) = 324 | BETA(4,6) = 108 |
| | | BETA(4,7) = 126 |
| | BETA(5,0) = 0 | BETA(4,8) = 144 |
| | BETA(5,1) = 72 | BETA(4,9) = 162 |
| | BETA(5,2) = 144 | BETA(4,10) = 180 |
| | BETA(5,3) = 216 | BETA(4,11) = 198 |
| | BETA(5,4) = 288 | BETA(4,12) = 216 |

| | |
|---------------|------------------|
| | BETA(4,13) = 234 |
| BETA(6,0) = 0 | BETA(4,14) = 252 |
| | BETA(4,15) = 270 |
| | BETA(4,16) = 288 |
| | BETA(4,17) = 306 |
| | BETA(4,18) = 324 |
| | BETA(4,19) = 342 |
| | |
| | BETA(5,0) = 0 |
| | BETA(5,1) = 24 |
| | BETA(5,2) = 48 |
| | BETA(5,3) = 72 |
| | BETA(5,4) = 96 |
| | BETA(5,5) = 120 |
| | BETA(5,6) = 144 |
| | BETA(5,7) = 168 |
| | BETA(5,8) = 192 |
| | BETA(5,9) = 216 |
| | BETA(5,10) = 240 |
| | BETA(5,11) = 264 |
| | BETA(5,12) = 288 |
| | BETA(5,13) = 312 |
| | BETA(5,14) = 336 |
| | |
| | BETA(6,0) = 0 |
| | BETA(6,1) = 36 |
| | BETA(6,2) = 72 |
| | BETA(6,3) = 108 |
| | BETA(6,4) = 144 |
| | BETA(6,5) = 180 |
| | BETA(6,6) = 216 |
| | BETA(6,7) = 252 |
| | BETA(6,8) = 288 |
| | BETA(6,9) = 324 |
| | |
| | BETA(7,0) = 0 |
| | BETA(7,1) = 72 |
| | BETA(7,2) = 144 |
| | BETA(7,3) = 216 |
| | BETA(7,4) = 288 |
| | |
| | BETA(8,0) = 0 |

PRILOG II

Spiralna raspodjela elementarnih antena na sfernoj podlozi:

Spiralna raspodjela elemenata spada u uniformnu distribuciju antenskih elemenata, a karakteristične veličine dane su tablicom II.I.

Alfa – elevacijski položaj pojedinog elementa;

Beta – azimutalni položaj pojedinog elementa;

Tablica II.I. Spiralni raspored 71 antene na sferi radijusa 30 cm.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 167,36836 | 108,14263 |
| 2 | 161,67592 | 181,60208 |
| 3 | 157,27583 | 242,02088 |
| 4 | 153,53888 | 294,73413 |
| 5 | 150,22183 | 342,23814 |
| 6 | 147,20015 | 25,93547 |
| 7 | 144,39994 | 66,70618 |
| 8 | 141,77312 | 105,14516 |
| 9 | 139,28628 | 141,67688 |
| 10 | 136,91512 | 176,61683 |
| 11 | 134,64126 | 210,20724 |
| 12 | 132,45043 | 242,63900 |
| 13 | 130,33125 | 274,06590 |
| 14 | 128,27446 | 304,61411 |
| 15 | 126,27243 | 334,38883 |
| 16 | 124,31871 | 363,47897 |
| 17 | 122,40786 | 31,96067 |
| 18 | 120,53517 | 59,89981 |
| 19 | 118,69655 | 87,35400 |
| 20 | 116,88840 | 114,37411 |
| 21 | 115,10755 | 141,00543 |
| 22 | 113,35113 | 167,28860 |
| 23 | 111,61659 | 193,26044 |
| 24 | 109,90159 | 218,95450 |
| 25 | 108,20399 | 244,40160 |
| 26 | 106,52184 | 269,63026 |
| 27 | 104,85329 | 294,66707 |
| 28 | 103,19665 | 319,53697 |
| 29 | 101,55030 | 344,26352 |
| 30 | 99,91271 | 8,86916 |
| 31 | 98,28244 | 33,37538 |
| 32 | 96,65807 | 57,80293 |
| 33 | 95,03826 | 82,17197 |
| 34 | 93,42167 | 106,50224 |
| 35 | 91,80701 | 130,81319 |
| 36 | 90,19299 | 155,12414 |

| | | |
|----|----------|-----------|
| 37 | 88,57833 | 179,45441 |
| 38 | 86,96174 | 203,82345 |
| 39 | 85,34193 | 228,25100 |
| 40 | 83,71756 | 252,75722 |
| 41 | 82,08729 | 277,36286 |
| 42 | 80,44970 | 302,08942 |
| 43 | 78,80335 | 326,95931 |
| 44 | 77,14671 | 351,99612 |
| 45 | 75,47816 | 17,22479 |
| 46 | 73,79601 | 42,67189 |
| 47 | 72,09841 | 68,36594 |
| 48 | 70,38341 | 94,33778 |
| 49 | 68,64887 | 120,62096 |
| 50 | 66,89245 | 147,25227 |
| 51 | 65,11160 | 174,27238 |
| 52 | 63,30345 | 201,72658 |
| 53 | 61,46483 | 229,66571 |
| 54 | 59,59214 | 258,14741 |
| 55 | 57,68129 | 287,23756 |
| 56 | 55,72757 | 317,01227 |
| 57 | 53,72554 | 347,56048 |
| 58 | 51,66875 | 18,98738 |
| 59 | 49,54957 | 51,41914 |
| 60 | 47,35874 | 85,00955 |
| 61 | 45,08488 | 119,94950 |
| 62 | 42,71372 | 156,48122 |
| 63 | 40,22688 | 194,92021 |
| 64 | 37,60006 | 235,69091 |
| 65 | 34,79985 | 279,38824 |
| 66 | 31,77817 | 326,89225 |
| 67 | 28,46112 | 19,60550 |
| 68 | 24,72417 | 80,02431 |
| 69 | 20,32408 | 153,48375 |
| 70 | 14,63164 | 256,62638 |
| 71 | 1,00000 | 5,00000 |

Tablica II.II. Spiralni raspored 139 antena na sferi radijusa 52,5 cm.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 180,00000 | 0,00000 |
| 2 | 170,23350 | 103,13511 |
| 3 | 166,17126 | 176,33027 |
| 4 | 163,04257 | 236,31480 |
| 5 | 160,39514 | 288,45641 |
| 6 | 158,05396 | 335,26828 |
| 7 | 155,92939 | 18,16304 |
| 8 | 153,96822 | 58,02716 |
| 9 | 152,13582 | 95,45977 |
| 10 | 150,40815 | 130,88810 |
| 11 | 148,76774 | 164,62940 |
| 12 | 147,20139 | 196,92688 |
| 13 | 145,69885 | 227,97183 |
| 14 | 144,25198 | 257,91792 |
| 15 | 142,85420 | 286,89082 |
| 16 | 141,50005 | 314,99485 |
| 17 | 140,18500 | 342,31776 |
| 18 | 138,90521 | 8,93418 |
| 19 | 137,65739 | 34,90825 |
| 20 | 136,43872 | 60,29555 |
| 21 | 135,24671 | 85,14466 |
| 22 | 134,07921 | 109,49832 |
| 23 | 132,93431 | 133,39439 |
| 24 | 131,81031 | 156,86660 |
| 25 | 130,70571 | 179,94516 |
| 26 | 129,61913 | 202,65727 |
| 27 | 128,54934 | 225,02754 |
| 28 | 127,49525 | 247,07829 |
| 29 | 126,45583 | 268,82991 |
| 30 | 125,43016 | 290,30102 |
| 31 | 124,41739 | 311,50876 |
| 32 | 123,41674 | 332,46889 |
| 33 | 122,42749 | 353,19601 |
| 34 | 121,44898 | 13,70362 |
| 35 | 120,48059 | 34,00431 |
| 36 | 119,52173 | 54,10978 |
| 37 | 118,57188 | 74,03098 |
| 38 | 117,63053 | 93,77816 |
| 39 | 116,69720 | 113,36098 |
| 40 | 115,77146 | 132,78847 |
| 41 | 114,85289 | 152,06922 |
| 42 | 113,94109 | 171,21129 |
| 43 | 113,03568 | 190,22236 |
| 44 | 112,13632 | 209,10970 |
| 45 | 111,24267 | 227,88023 |
| 46 | 110,35441 | 246,54055 |
| 47 | 109,47122 | 265,09696 |
| 48 | 108,59282 | 283,55550 |
| 49 | 107,71893 | 301,92194 |
| 50 | 106,84928 | 320,20183 |
| 51 | 105,98361 | 338,40054 |
| 52 | 105,12167 | 356,52321 |
| 53 | 104,26321 | 14,57481 |
| 54 | 103,40802 | 32,56019 |
| 55 | 102,55586 | 50,48399 |
| 56 | 101,70651 | 68,35078 |
| 57 | 100,85976 | 86,16496 |
| 58 | 100,01541 | 103,93085 |
| 59 | 99,17325 | 121,65265 |
| 60 | 98,33308 | 139,33448 |
| 61 | 97,49472 | 156,98038 |
| 62 | 96,65796 | 174,59432 |
| 63 | 95,82263 | 192,18021 |
| 64 | 94,98854 | 209,74188 |
| 65 | 94,15551 | 227,28315 |
| 66 | 93,32336 | 244,80777 |
| 67 | 92,49191 | 262,31948 |
| 68 | 91,66098 | 279,82199 |
| 69 | 90,83040 | 297,31898 |
| 70 | 90,00000 | 314,81413 |
| 71 | 89,16960 | 332,31112 |
| 72 | 88,33902 | 349,81363 |
| 73 | 87,50809 | 7,32534 |
| 74 | 86,67664 | 24,84996 |
| 75 | 85,84449 | 42,39123 |
| 76 | 85,01146 | 59,95291 |
| 77 | 84,17737 | 77,53879 |
| 78 | 83,34204 | 95,15273 |
| 79 | 82,50528 | 112,79863 |
| 80 | 81,66692 | 130,48046 |
| 81 | 80,82675 | 148,20226 |
| 82 | 79,98459 | 165,96815 |
| 83 | 79,14024 | 183,78233 |
| 84 | 78,29349 | 201,64912 |
| 85 | 77,44414 | 219,57293 |
| 86 | 76,59198 | 237,55830 |
| 87 | 75,73679 | 255,60991 |
| 88 | 74,87833 | 273,73257 |
| 89 | 74,01639 | 291,93128 |
| 90 | 73,15072 | 310,21118 |
| 91 | 72,28107 | 328,57761 |
| 92 | 71,40718 | 347,03615 |
| 93 | 70,52878 | 5,59256 |
| 94 | 69,64559 | 24,25288 |
| 95 | 68,75733 | 43,02341 |
| 96 | 67,86368 | 61,91075 |
| 97 | 66,96432 | 80,92182 |
| 98 | 66,05891 | 100,06389 |
| 99 | 65,14711 | 119,34464 |
| 100 | 64,22854 | 138,77214 |
| 101 | 63,30280 | 158,35495 |
| 102 | 62,36947 | 178,10214 |
| 103 | 61,42812 | 198,02333 |
| 104 | 60,47827 | 218,12880 |
| 105 | 59,51941 | 238,42949 |
| 106 | 58,55102 | 258,93710 |
| 107 | 57,57251 | 279,66422 |
| 108 | 56,58326 | 300,62436 |
| 109 | 55,58261 | 321,83209 |
| 110 | 54,56984 | 343,30321 |
| 111 | 53,54417 | 5,05482 |
| 112 | 52,50475 | 27,10557 |
| 113 | 51,45066 | 49,47584 |
| 114 | 50,38087 | 72,18795 |
| 115 | 49,29429 | 95,26652 |
| 116 | 48,18969 | 118,73873 |
| 117 | 47,06569 | 142,63480 |
| 118 | 45,92079 | 166,98846 |
| 119 | 44,75329 | 191,83756 |
| 120 | 43,56128 | 217,22487 |
| 121 | 42,34261 | 243,19893 |
| 122 | 41,09479 | 269,81535 |
| 123 | 39,81500 | 297,13826 |
| 124 | 38,49995 | 325,24229 |
| 125 | 37,14580 | 354,21519 |
| 126 | 35,74802 | 24,16128 |
| 127 | 34,30115 | 55,20623 |
| 128 | 32,79861 | 87,50371 |
| 129 | 31,23226 | 121,24501 |
| 130 | 29,59185 | 156,67334 |
| 131 | 27,86418 | 194,10595 |
| 132 | 26,03178 | 233,97007 |
| 133 | 24,07061 | 276,86483 |
| 134 | 21,94604 | 323,67670 |
| 135 | 19,60486 | 15,81831 |
| 136 | 16,95743 | 75,80284 |
| 137 | 13,82874 | 148,99800 |
| 138 | 9,76650 | 252,13311 |
| 139 | 0,00000 | 0,00000 |

PRILOG III

Raspodjela elementarnih antena na sfernoj podlozi po Leopardi algoritmu:

Raspodjela elemenata po Leopardi algoritmu također spada u uniformnu distribuciju, a karakteristične veličine dane su sljedećom tablicom posebno za sferu radijusa 30 cm i posebno za sferu radijusa 52,9 cm.

Alfa – elevacijski položaj pojedinog elementa;

Beta – azimutalni položaj pojedinog elementa.

Tablica III.I. Raspored antena po Leopardi algoritmu na sferi radijusa 30 cm.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 14,62385 | 165,96032 |
| 3 | 20,74343 | 40,52154 |
| 3 | 20,74343 | 220,52154 |
| 4 | 27,13354 | 124,13529 |
| 4 | 27,13354 | 304,13529 |
| 5 | 33,39817 | 31,50765 |
| 5 | 33,39817 | 151,50764 |
| 5 | 33,39817 | 271,50764 |
| 6 | 39,85166 | 79,57571 |
| 6 | 39,85166 | 199,57571 |
| 6 | 39,85166 | 319,57571 |
| 7 | 46,35470 | 77,09658 |
| 7 | 46,35470 | 167,09658 |
| 7 | 46,35470 | 257,09658 |
| 7 | 46,35470 | 347,09658 |
| 8 | 53,06349 | 60,00694 |
| 8 | 53,06349 | 150,00694 |
| 8 | 53,06349 | 240,00694 |
| 8 | 53,06349 | 330,00694 |
| 9 | 59,21644 | 18,07858 |
| 9 | 59,21644 | 108,07858 |
| 9 | 59,21644 | 198,07858 |
| 9 | 59,21644 | 288,07858 |
| 10 | 64,99288 | 70,34986 |
| 10 | 64,99288 | 160,34986 |
| 10 | 64,99288 | 250,34986 |
| 10 | 64,99288 | 340,34986 |
| 11 | 71,16894 | 51,41524 |
| 11 | 71,16894 | 123,41524 |
| 11 | 71,16894 | 195,41524 |
| 11 | 71,16894 | 267,41524 |
| 11 | 71,16894 | 339,41524 |
| 12 | 77,79249 | 18,14822 |
| 12 | 77,79249 | 90,14822 |
| 12 | 77,79249 | 162,14822 |
| 12 | 77,79249 | 234,14822 |
| 12 | 77,79249 | 306,14822 |
| 13 | 84,25183 | 46,04561 |
| 13 | 84,25183 | 118,04561 |
| 13 | 84,25183 | 190,04561 |
| 13 | 84,25183 | 262,04561 |
| 13 | 84,25183 | 334,04561 |
| 14 | 90,00000 | 17,53397 |
| 14 | 90,00000 | 107,53397 |
| 14 | 90,00000 | 197,53397 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 14 | 90,00000 | 287,53397 |
| 15 | 95,74817 | 69,76161 |
| 15 | 95,74817 | 141,76161 |
| 15 | 95,74817 | 213,76161 |
| 15 | 95,74817 | 285,76161 |
| 15 | 95,74817 | 357,76161 |
| 16 | 102,20751 | 52,24406 |
| 16 | 102,20751 | 124,24407 |
| 16 | 102,20751 | 196,24407 |
| 16 | 102,20751 | 268,24406 |
| 16 | 102,20751 | 340,24406 |
| 17 | 108,83106 | 54,47169 |
| 17 | 108,83106 | 126,47169 |
| 17 | 108,83106 | 198,47169 |
| 17 | 108,83106 | 270,47169 |
| 17 | 108,83106 | 342,47169 |
| 18 | 115,00712 | 74,72793 |
| 18 | 115,00712 | 164,72793 |
| 18 | 115,00712 | 254,72793 |
| 18 | 115,00712 | 344,72793 |
| 19 | 120,78356 | 20,85302 |
| 19 | 120,78356 | 110,85302 |
| 19 | 120,78356 | 200,85302 |
| 19 | 120,78356 | 290,85302 |
| 20 | 126,93651 | 51,58520 |
| 20 | 126,93651 | 141,58520 |
| 20 | 126,93651 | 231,58520 |
| 20 | 126,93651 | 321,58520 |
| 21 | 133,64530 | 28,53120 |
| 21 | 133,64530 | 118,53120 |
| 21 | 133,64530 | 208,53120 |
| 21 | 133,64530 | 298,53120 |
| 22 | 140,14834 | 50,37307 |
| 22 | 140,14834 | 170,37307 |
| 22 | 140,14834 | 290,37307 |
| 23 | 146,60183 | 60,26119 |
| 23 | 146,60183 | 180,26119 |
| 23 | 146,60183 | 300,26119 |
| 24 | 152,86646 | 125,19809 |
| 24 | 152,86646 | 305,19809 |
| 25 | 159,25657 | 57,14440 |
| 25 | 159,25657 | 237,14441 |
| 26 | 165,37615 | 133,27561 |
| 27 | 180,00000 | 0,00000 |

Tablica III.II. Leopardiev raspored antena na sferi radijusa 52,9 cm.

| R. br. prstena | Alfa, ° | Beta, ° |
|----------------|----------|-----------|
| 1 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 14,32426 | 74,51596 |
| 2 | 14,32426 | 194,51596 |
| 2 | 14,32426 | 314,51596 |
| 3 | 23,14564 | 77,53332 |
| 3 | 23,14564 | 167,53332 |
| 3 | 23,14564 | 257,53332 |
| 3 | 23,14564 | 347,53332 |
| 4 | 31,00808 | 40,75190 |
| 4 | 31,00808 | 112,75190 |
| 4 | 31,00808 | 184,75190 |
| 4 | 31,00808 | 256,75190 |
| 4 | 31,00808 | 328,75190 |
| 5 | 39,22446 | 24,79325 |
| 5 | 39,22446 | 76,22182 |
| 5 | 39,22446 | 127,65039 |
| 5 | 39,22446 | 179,07896 |
| 5 | 39,22446 | 230,50753 |
| 5 | 39,22446 | 281,93611 |
| 5 | 39,22446 | 333,36468 |
| 6 | 47,86927 | 39,02996 |
| 6 | 47,86927 | 84,02996 |
| 6 | 47,86927 | 129,02996 |
| 6 | 47,86927 | 174,02996 |
| 6 | 47,86927 | 219,02996 |
| 6 | 47,86927 | 264,02995 |
| 6 | 47,86927 | 309,02995 |
| 6 | 47,86927 | 354,02995 |
| 7 | 56,40890 | 31,87197 |
| 7 | 56,40890 | 71,87197 |
| 7 | 56,40890 | 111,87197 |
| 7 | 56,40890 | 151,87197 |
| 7 | 56,40890 | 191,87197 |
| 7 | 56,40890 | 231,87197 |
| 7 | 56,40890 | 271,87197 |
| 7 | 56,40890 | 311,87197 |
| 7 | 56,40890 | 351,87197 |
| 8 | 64,62133 | 12,80558 |
| 8 | 64,62133 | 52,80558 |
| 8 | 64,62133 | 92,80558 |
| 8 | 64,62133 | 132,80558 |
| 8 | 64,62133 | 172,80558 |
| 8 | 64,62133 | 212,80558 |
| 8 | 64,62133 | 252,80558 |
| 8 | 64,62133 | 292,80558 |
| 8 | 64,62133 | 332,80558 |
| 9 | 73,10793 | 22,16992 |
| 9 | 73,10793 | 54,89720 |
| 9 | 73,10793 | 87,62447 |
| 9 | 73,10793 | 120,35174 |
| 9 | 73,10793 | 153,07901 |
| 9 | 73,10793 | 185,80629 |
| 9 | 73,10793 | 218,53356 |
| 9 | 73,10793 | 251,26083 |
| 9 | 73,10793 | 283,98810 |
| 9 | 73,10793 | 316,71538 |
| 9 | 73,10793 | 349,44265 |
| 10 | 81,65226 | 12,50109 |
| 10 | 81,65226 | 48,50109 |
| 10 | 81,65226 | 84,50109 |
| 10 | 81,65226 | 120,50109 |
| 10 | 81,65226 | 156,50109 |
| 10 | 81,65226 | 192,50109 |
| 10 | 81,65226 | 228,50109 |
| 10 | 81,65226 | 264,50109 |
| 10 | 81,65226 | 300,50109 |
| 10 | 81,65226 | 336,50109 |
| 11 | 90,00000 | 23,12685 |
| 11 | 90,00000 | 55,85412 |
| 11 | 90,00000 | 88,58139 |
| 11 | 90,00000 | 121,30867 |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 11 | 90,00000 | 154,03594 |
| 11 | 90,00000 | 186,76321 |
| 11 | 90,00000 | 219,49048 |
| 11 | 90,00000 | 252,21776 |
| 11 | 90,00000 | 284,94503 |
| 11 | 90,00000 | 317,67230 |
| 11 | 90,00000 | 350,39958 |
| 12 | 98,34774 | 24,44174 |
| 12 | 98,34774 | 60,44174 |
| 12 | 98,34774 | 96,44174 |
| 12 | 98,34774 | 132,44174 |
| 12 | 98,34774 | 168,44174 |
| 12 | 98,34774 | 204,44174 |
| 12 | 98,34774 | 240,44174 |
| 12 | 98,34774 | 276,44174 |
| 12 | 98,34774 | 312,44174 |
| 12 | 98,34774 | 348,44174 |
| 13 | 106,89207 | 10,81370 |
| 13 | 106,89207 | 43,54097 |
| 13 | 106,89207 | 76,26824 |
| 13 | 106,89207 | 108,99552 |
| 13 | 106,89207 | 141,72279 |
| 13 | 106,89207 | 174,45006 |
| 13 | 106,89207 | 207,17733 |
| 13 | 106,89207 | 239,90461 |
| 13 | 106,89207 | 272,63188 |
| 13 | 106,89207 | 305,35915 |
| 13 | 106,89207 | 338,08643 |
| 14 | 115,37867 | 28,64139 |
| 14 | 115,37867 | 68,64139 |
| 14 | 115,37867 | 108,64139 |
| 14 | 115,37867 | 148,64139 |
| 14 | 115,37867 | 188,64139 |
| 14 | 115,37867 | 228,64139 |
| 14 | 115,37867 | 268,64139 |
| 14 | 115,37867 | 308,64139 |
| 14 | 115,37867 | 348,64139 |
| 15 | 123,59110 | 27,20847 |
| 15 | 123,59110 | 67,20847 |
| 15 | 123,59110 | 107,20847 |
| 15 | 123,59110 | 147,20847 |
| 15 | 123,59110 | 187,20847 |
| 15 | 123,59110 | 227,20847 |
| 15 | 123,59110 | 267,20847 |
| 15 | 123,59110 | 307,20847 |
| 15 | 123,59110 | 347,20847 |
| 16 | 132,13073 | 42,54395 |
| 16 | 132,13073 | 87,54395 |
| 16 | 132,13073 | 132,54395 |
| 16 | 132,13073 | 177,54395 |
| 16 | 132,13073 | 222,54395 |
| 16 | 132,13073 | 267,54395 |
| 16 | 132,13073 | 312,54395 |
| 16 | 132,13073 | 357,54395 |
| 17 | 140,77554 | 22,89754 |
| 17 | 140,77554 | 74,32611 |
| 17 | 140,77554 | 125,75468 |
| 17 | 140,77554 | 177,18325 |
| 17 | 140,77554 | 228,61182 |
| 17 | 140,77554 | 280,04040 |
| 17 | 140,77554 | 331,46897 |
| 18 | 148,99192 | 46,10521 |
| 18 | 148,99192 | 118,10521 |
| 18 | 148,99192 | 190,10521 |
| 18 | 148,99192 | 262,10521 |
| 18 | 148,99192 | 334,10521 |
| 19 | 156,85436 | 47,83055 |
| 19 | 156,85436 | 137,83055 |
| 19 | 156,85436 | 227,83055 |
| 19 | 156,85436 | 317,83055 |
| 20 | 165,67574 | 34,21193 |
| 20 | 165,67574 | 154,21193 |

POPIS SLIKA

- Slika 2.1.** Eksperimentalna 300m Wullenweber antena na sveučilištu Illinois. (str. 9)
- Slika 2.2.** Niz od 16 helikoidalnih antena smještenih na sferi (0.6 – 3 GHz). (str. 10)
- Slika 2.3.** Niz kružnih mikrotrakastih antena na polusferi. (str. 10)
- Slika 2.4.** Valovodni antenski niz na kružnoj cilindričnoj podlozi. (str. 11)
- Slika 2.5.** Cilindrični demonstrator. (str. 11)
- Slika 2.6.** Aktivna antena sa 6 dualnopolariziranih dipolnih elemenata po stranici. (str. 12)
- Slika 2.7.** Eksperimentalne mikrotrakaste antene na polusferi. (str. 12)
- Slika 2.8.** Moguće podloge konformnih antenskih nizova: I. S glatkim zakrivljenim plohama: a) cilindar; b) sfera (polusfera); c) stožac; II. S planarnim plohama: d) prizma; e) piramida. (str. 13)
- Slika 2.9.** Efektivna površina i kut skeniranja: a) planarni niz i b) sferni niz (polusfera ili polucilindar). (str. 14)
- Slika 2.10.** Efektivna površina za nekoliko vrsta ravnina; $h/R = 1$. (str. 16)
- Slika 2.11.** Vizija konformne antene izvedene pristupom „pametne kože“. (str. 16)
- Slika 3.1.** Točka polja i točka izvora. (str. 20)
- Slika 3.2.** Struktura analize 3D sferne višeslojne strukture kao niz ekvivalentnih potproblema. (str. 24)
- Slika 3.3.** Dijagram toka PSO algoritma. (str. 31)
- Slika 4.1.** Najčešće vrste otvor antena: a) prerez antene, b) valovodne antene i c) lijevak antene. (str. 32)
- Slika 4.2.** Vanjsko i unutarnje područje otvorenog valovoda na sfernoj površini. (str. 33)
- Slika 4.3.** Podjela izvornog problema na dva potproblema teoremom ekvivalencije. (str. 34)
- Slika 4.4.** Otvoreni valovod na sfernoj vodljivoj podlozi. (str. 35)
- Slika 4.5.** Osnovni oblici mikrotrakastih antena. (str. 41)
- Slika 4.6.** Mikrotrakasta antena: a) 3D prikaz; b) presjek mikrotrakaste antene. (str. 42)

Slika 4.7. Vrste pobuda mikrotrakaste antene: a) pobuda pomoću mikrotrakaste linije; b) pobuda pomoću koaksijalne linije; c) pobuda pomoću raspore. (str. 42)

Slika 4.8. Kružna mikrotrakasta antena smještena na uzemljenoj sferi. (str. 45)

Slika 4.9. Globalni i lokalni koordinatni sustav. (str. 50)

Slika 4.10. Geometrijski raspored elemenata koji čine antenski niz na sfernoj podlozi: a) jedan od rasporeda antenskih elemenata na ikosaedru, b) antenski niz sastavljen od 16 elemenata smješten na sferi. (str. 53)

Slika 4.11. Podjela jednog od dvadeset trokuta koji čine ikosaedar u proizvoljan broj manjih jednakostraničnih trokuta. (str. 53)

Slika 4.12. Spiralna distribucija $N = 60$ antenskih elemenata na sferi. (str. 54)

Slika 4.13. Podjela sfere u $N=33$ dijela jednakih površina, gdje točke predstavljaju središte svake regije. (str. 57)

Slika 4.14. Podjela sfere na prstenove po Leopardi algoritmu. (str. 58)

Slika 5.1. Dijagram zračenja antenskog niza i karakteristične veličine kojima su definirane ciljne funkcije. (str. 62)

Slika 5.2. Udaljenost dvije točke na sferi radijusa R . (str. 64)

Slika 5.3. Ovisnost vrijednosti ciljne funkcije CF_1 o promjeni broja elementarnih antena – broja podjela elementarnog trokuta P_n za: a) E – ravninu, b) H – ravninu uz $r_s = 30$ cm. (str. 67)

Slika 5.4. Ovisnost vrijednosti ciljne funkcije CF_1 o promjeni broja elementarnih antena – broja podjela elementarnog trokuta P_n za: a) E – ravninu, b) H – ravninu uz $r_s = 52,9$ cm. (str. 68)

Slika 5.5. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm, te $d_{\min}=0,5\lambda$. (str. 71)

Slika 5.6. Dijagram zračenja uniformno raspodređenih antena u odnosu na neuniformni raspored 71 antene na sfernoj podlozi za: a) E-ravninu b) H-ravninu. (str. 73)

Slika 5.7. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude pobude: a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm. (str. 75)

Slika 5.8. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude pobude: a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm. (str. 76)

Slika 5.9. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije pobude: a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm. (str. 78)

Slika 5.10. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije pobude: a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm. (str. 79)

Slika 5.11. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (ϕ_{\max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm. (str. 81)

Slika 5.12. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (θ_{\max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 30$ cm. (str. 82)

Slika 5.13. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (ϕ_{\max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm. (str. 83)

Slika 5.14. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (θ_{\max} promjenjiv): a) E – ravnina, b) H – ravnina uz $r_s = 52,9$ cm. (str. 84)

Slika 5.15. Promjena ciljne funkcije CF_1 i CF_2 uz promjenu broja antena: a) $r_s = 30$ cm i b) $r_s = 52,9$ cm. (str. 88)

Slika 5.16. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o promjeni azimutalnog i elevacijskog kuta elemenata: a) $r_s = 30$ cm, b) $r_s = 52,9$ cm. (str. 90)

Slika 5.17. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm, $d_{\min}=0,4\lambda$. (str. 92)

Slika 5.18. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta funkcije kojom se mijenja položaj elemenata na sferi: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm, $d_{\min}=0,5\lambda$. (str. 93)

Slika 5.19. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 96)

Slika 5.20. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni amplitude: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 97)

Slika 5.21. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 99)

Slika 5.22. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 100)

Slika 5.23. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 102)

Slika 5.24. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 103)

Slika 5.25. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 104)

Slika 5.26. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja: a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 105)

Slika 5.27. Ciljne funkcije u ovisnosti o broju antena ($r_s=30$ cm). (str. 108)

Slika 5.28. Ciljne funkcije u ovisnosti o broju antena ($r_s=52,9$ cm). (str. 109)

Slika 5.29. Promjena ciljne funkcije CF_1 u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' : a) E – ravnina, b) H – ravnina ($r_s = 30$ cm). (str. 114)

Slika 5.30. Promjena ciljne funkcije CF_1 u ovisnosti o promjeni koeficijenta k' : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 116)

Slika 5.31. Utjecaj promjene amplitude pobude na ciljnu funkciju CF_1 : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 118)

Slika 5.32. Utjecaj promjene amplitude pobude na ciljnu funkciju – CF_1 : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 120)

Slika 5.33. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta k : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 122)

Slika 5.34. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta k : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 123)

Slika 5.35. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja ϕ_{\max} na promjenu ciljne funkcije, a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 124)

Slika 5.36. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja θ_{\max} na promjenu ciljne funkcije, a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 30$ cm. (str. 125)

Slika 5.37. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja ϕ_{\max} na promjenu ciljne funkcije CF_1 , a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 127)

Slika 5.38. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja θ_{\max} na promjenu ciljne funkcije CF_1 : a) E – ravnina, b) H – ravnina za $r_s = 52,9$ cm. (str. 128)

Slika 6.1. Ciljna funkcija CF_2 dijagrama zračenja ikosaedarske strukture uz promjenu geometrijskih parametara izračunata uz pomoć PSO alata integriranog u Matlab2009b. (str. 133)

Slika 6.2. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o promjeni koeficijenta $k=k_d$. (str. 136)

Slika 6.3. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije uz postupno dodavanje relevantnih parametara optimizacije: a) E ravnina, b) H ravnina. (str. 138)

Slika 6.4. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=30\text{cm}$. (str. 140)

Slika 6.5. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=35,3\text{ cm}$. (str. 142)

Slika 6.6. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za $r_s=52,9\text{ cm}$. (str. 143)

Slika 6.7. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za $r_s = 30\text{ cm}$ Leopardi konfiguracije. (str. 146)

Slika 6.8. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za $r_s = 35,3\text{ cm}$ Leopardi konfiguracije. (str. 147)

Slika 6.9. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o koeficijentu $k=k_a$ za $r_s = 52,9\text{ cm}$ Leopardi konfiguracije. (str. 148)

Slika 6.10. Dijagram zračenja Leopardi konfiguracije uz različit broj relevantnih parametara optimizacije za $r_s=52,9\text{ cm}$: a) E ravnina, b) H ravnina. (str. 150)

Slika 6.11. Ciljna funkcija CF_2 dijagrama zračenja spiralne konfiguracije uz promjenu 4 geometrijska parametra izračunata uz pomoć PSO algoritma. (str. 152)

Slika 6.12. Ciljna funkcija CF_2 u ovisnosti o promjeni koeficijenta amplitude $k=k_a$. (str. 155)

Slika 6.13. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije za različit broj parametara optimizacije: a) E ravnina, b) H ravnina. (str. 159)

Slika 7.1. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz slijedeće parametre: radijus sfere i pozicija elemenata. (str. 164)

Slika 7.2. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 slobodne konfiguracije elemenata postignuta PSO optimizacijom (uz masku) geometrijskih parametara – radijusa sfere i položaja elemenata. (str. 164)

Slika 7.3. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz promjenu geometrijskih parametara (radijus sfere i položaj antena): a) E ravnina, b) H ravnina. (str 166)

Slika 7.4. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz slijedeće parametre: radijus sfere, pozicija elemenata, te amplituda pobude. (str. 168)

Slika 7.5. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 slobodne konfiguracije elemenata postignuta PSO optimizacijom (uz masku) geometrijskih parametara – geometrijskih parametara i amplitude pobude. (str. 168)

Slika 7.6. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz optimiranje geometrijskih parametara i amplitude kao parametra pobude: a) E ravnina, b) H ravnina. (str. 170)

Slika 7.7. Raspored 31 antenskog elementa na sferi postignut sintezom (PSO optimizacijom uz masku) dijagrama zračenja uz slijedeće parametre: radijus sfere, pozicija elemenata, te amplituda i polarizacija pobude. (str. 172)

Slika 7.8. Ciljna funkcija slobodne konfiguracije dobivena promjenom geometrijskih i pobudnih parametara uz upotrebu PSO algoritma optimizacije. (str. 172)

Slika 7.9. Dijagram zračenja slobodne konfiguracije uz istovremeno optimiranje geometrijskih i pobudnih parametara: a) E ravnina, b) H ravnina. (str. 174)

Slika 8.1. Sferni eksperimentalni model predstavljen s dva valovoda (radijus valovoda $r_w=6\text{cm}$) na sferi radijusa $r_s=69\text{cm}$ ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=18^\circ$, $\beta_{21}=90^\circ$). (str. 178)

Slika 8.2. Normirani dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=18^\circ$, $\beta_{21}=90^\circ$). (str. 178)

Slika 8.3. Sferni eksperimentalni model kojeg predstavljaju šest valovoda (radijus valovoda $r_w=6\text{cm}$) na sferi radijusa $r_s=30\text{cm}$ ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=36^\circ$, $\beta_{22}=108^\circ$, $\beta_{23}=180^\circ$, $\beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$). (str. 179)

Slika 8.4. Normirani diferencijalni dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=180^\circ$). (str. 180)

Slika 8.5. Normirani dijagram zračenja tri valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=108^\circ$, $\beta_{22}=180^\circ$). (str. 181)

Slika 8.6. Normirani dijagram zračenja šest valovoda a) E ravnina, b) H ravnina ($\alpha_1=0^\circ$, $\beta_{11}=0^\circ$; $\alpha_2=56^\circ$, $\beta_{21}=36^\circ$, $\beta_{22}=108^\circ$, $\beta_{23}=180^\circ$, $\beta_{24}=252^\circ$ i $\beta_{25}=324^\circ$). (str. 182)

Slika 8.7. Pogreške modela antenskog niza: a) elevacijski položaj drugog valovoda α_2 i pogreška elevacijskog položaja α_{2err} ; b) azimutalni položaj drugog valovoda β_2 i pogreška azimutalnog položaja β_{2err} ; c) elevacijski položaj drugog valovoda α_2 i pogreška lokalnog kuta θ'_{2err} , d) azimutalni položaj drugog valovoda β_2 i pogreška lokalnog kuta ϕ'_{2err} . (str. 183)

Slika 8.8. Izmjereni i izračunati dijagram zračenja dva valovoda sfernog niza s uključenim pogreškama: a) E ravnina; b) H ravnina. (str. 184)

Slika 8.9. Izmjereni i izračunati dijagrami zračenja šest valovoda sfernog niza s uključenim pogreškama u proračun: a) E ravnina; b) H ravnina. (str. 185)

Slika 8.10. Sferni eksperimentalni model kojeg predstavljaju 31 kružna mikrotrakaste antena (radijus mikrotrakaste antene $r_p=2,65$ cm) na sferi radijusa $r_s=30$ cm raspoređenih u ikosaedarsku konfiguraciju. (str. 186)

Slika 8.11. Prvi eksperimentalni podniz tri mikrotrakaste antene ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$). (str. 187)

Slika 8.12. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\beta_{52}=72^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=0^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude. (str. 188)

Slika 8.13. Drugi eksperimentalni podniz tri mikrotrakaste antene ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$). (str. 188)

Slika 8.14. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=0^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude. (str. 189)

Slika 8.15. Normirani dijagram zračenja tri mikrotrakaste antene sfernog niza: a) E ravnina; b) H ravnina ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$); kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=15^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude. (str. 189)

Slika 8.16. Normirani dijagram zračenja sfernog niza kojeg čini 71 antena raspoređenih u ikosaedarsku konfiguraciju: $\alpha_1=0^0$, 15^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 i 75^0 ; kut maksimuma zračenja $\theta_{\max}=10^0$, $\varphi_{\max}=0^0$; uključena fazna kompenzacija pobude. (str. 191)

Slika 8.17. Dijagram zračenja uniformne konfiguracije nasuprot neuniformnim razdiobama elemenata na sferi a) E ravnina b) H ravnina. (str. 195)

Slika 8.18. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^0$, $\beta_{11}=0^0$, $\alpha_2=15^0$, $\beta_{21}=0^0$, $\beta_{22}=72^0$, $\beta_{23}=144^0$, $\beta_{24}=216^0$, $\beta_{25}=288^0$). (str. 197)

Slika 8.19. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^0$, $\beta_{11}=0^0$, $\alpha_2=15^0$, $\beta_{21}=0^0$, $\beta_{22}=72^0$, $\beta_{23}=144^0$, $\beta_{24}=216^0$, $\beta_{25}=288^0$):

a) E ravnina b) H ravnina. (str. 198)

Slika 8.20. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^0$, $\beta_{11}=0^0$, $\alpha_2=30^0$, $\beta_{21}=0^0$, $\beta_{22}=72^0$, $\beta_{23}=144^0$, $\beta_{24}=216^0$, $\beta_{25}=288^0$). (str. 199)

Slika 8.21. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ, \alpha_2=30^\circ, \beta_{21}=0^\circ, \beta_{22}=72^\circ, \beta_{23}=144^\circ, \beta_{24}=216^\circ, \beta_{25}=288^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina. (str. 200)

Slika 8.22. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ, \beta_1=49,94^\circ; \alpha_2=11,48^\circ, \beta_2=153,07^\circ; \alpha_3=14,07^\circ, \beta_3=226,18^\circ; \alpha_4=16,26^\circ, \beta_4=286,03^\circ; \alpha_5=18,19^\circ, \beta_5=337,99^\circ; \alpha_6=19,95^\circ, \beta_6=24,58^\circ$). (str. 201)

Slika 8.23. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ, \beta_1=49,94^\circ; \alpha_2=11,48^\circ, \beta_2=153,07^\circ; \alpha_3=14,07^\circ, \beta_3=226,18^\circ; \alpha_4=16,26^\circ, \beta_4=286,03^\circ; \alpha_5=18,19^\circ, \beta_5=337,99^\circ; \alpha_6=19,95^\circ, \beta_6=24,58^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina. (str. 202)

Slika 8.24. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=8,11^\circ, \beta_1=49,94^\circ; \alpha_2=14,07^\circ, \beta_2=226,18^\circ; \alpha_3=18,19^\circ, \beta_3=337,99^\circ; \alpha_4=21,57^\circ, \beta_4=67,22^\circ; \alpha_5=24,50^\circ, \beta_5=143,93^\circ; \alpha_6=27,13^\circ, \beta_6=212,40^\circ$). (str. 203)

Slika 8.25. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm ($\alpha_1=0^\circ, \beta_{11}=0^\circ, \alpha_2=30^\circ, \beta_{21}=0^\circ, \beta_{22}=72^\circ, \beta_{23}=144^\circ, \beta_{24}=216^\circ, \beta_{25}=288^\circ$):

a) E ravnina b) H ravnina. (str. 204)

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Parametri i karakteristike planarnih i konformnih nizova. (str. 7)

Tablica 3.1. Transformacijski parovi planarnih, cilindričnih i sfernih struktura. (str. 26)

Tablica 4.1. Prvih pet korjena jednadžbe $J_n'(x) = 0$. (str. 48)

Tablica 4.2. Broj antenskih elemenata smještenih na jednoj polusferi. (str. 55)

Tablica 5.1. Pozicijski kutevi elementarnih antena Leopardi konfiguracije za sferu radijusa $r_s=30$ cm i 90 antena. (str. 110)

Tablica 5.2. Pozicijski kutevi elementarnih antena Leopardi konfiguracije za sferu radijusa $r_s=52,9$ cm i 145 antena. (str. 111)

Tablica 5.3. Utjecaj parametara geometrije i pobude za različite konfiguracije antenskih elemenata na vodljivoj sfernoj podlozi. (str. 129)

Tablica 6.1. Vrijednosti parametara i ciljne funkcije pri optimizaciji dijagrama zračenja uz promjenu geometrijskih parametara. (str. 134)

Tablica 6.2. Optimalan položaj 91 antene na sferi radijusa 100 cm (ikosaedarska konfiguracija). (str. 134)

Tablica 6.3. Vrijednosti parametara i ciljne funkcije pri optimizaciji dijagrama zračenja uz promjenu geometrijskih i pobudnih (amplituda) parametara. (str. 136)

Tablica 6.4. Elevacijski kutevi i pripadajuće amplitude pri eksponencijalnoj promjeni amplitude antenskih elemenata za 91 antenu; na sferi radijusa 100 cm uz koeficijent amplitude $k_a=7$. (str. 137)

Tablica 6.5. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 ikosaedarske konfiguracije elemenata uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza. (str. 138)

Tablica 6.6. Optimalni pozicijski kutevi 90 antena na sferi radijusa 30 cm Leopardi konfiguracije. (str. 140)

Tablica 6.7. Raspored 90 antena na sferi radijusa 35,3 cm Leopardi konfiguracije. (142)

Tablica 6.8. Pozicijski kutevi 145 antena na sferi radijusa 52,9 cm Leopardi konfiguracije. (str. 144)

Tablica 6.9. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=7$ za sferu radijusa 30 cm Leopardi konfiguracije. (str. 146)

Tablica 6.10. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=7$ za sferu radijusa 35,3 cm Leopardi konfiguracije. (str. 148)

Tablica 6.11. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=8$ za sferu radijusa 52,9 cm Leopardi konfiguracije. (str. 149)

Tablica 6.12. Vrijednosti ciljne funkcije CF_2 Leopardi konfiguracije uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza. (str. 151)

Tablica 6.13. Optimalan položaj 284 antene spiralne konfiguracije sfere radijusa 100 cm. (str. 153)

Tablica 6.14. Vrijednosti parametara dobijenih optimizacijom dijagrama zračenja sfernog niza spiralnog rasporeda radijus sfere $r_s = 100$ cm, za koeficijent amplitude $k_a=4$. (str. 156)

Tablica 6.15. Vrijednost ciljne funkcije CF_2 spiralne konfiguracije uz optimizaciju geometrije i pobude sfernog niza. (str. 160)

Tablica 6.16. Utjecaj geometrijskih i pobudnih parametara na vrijednost ciljne funkcije ikosaedarske, spiralne i Leopardi konfiguracije elemenata. (str. 161)

Tablica 7.1. Optimalni radijus sfere i pripadajući položaj 31 antene slobodne konfiguracije niza. (str. 165)

Tablica 7.2. Optimalni radijus sfere, položaj 31 antene, te iznos amplitude pobude slobodne konfiguracije niza. (str. 169)

Tablica 7.3. Optimalni radijus sfere, položaj 31 antene, te iznos amplitude i polarizacije pobude slobodne konfiguracije niza. (str. 173)

Tablica 7.4. Sustavan prikaz optimizacije slobodne konfiguracije niza po svim relevantnim parametrima geometrije i pobude. (str. 175)

Tablica 8.1. Pogreške antenskog niza šest valovoda. (str. 186)

Tablica 8.2. Raspored prstenova elemenata predstavljenih shemom prostih brojeva. (str. 193)

Tablica 8.3. Položaj prstenova po kojima su raspoređeni antenski elementi dani neuniformnom raspodjelom. (str. 193)

Tablica 8.4. Razina prve značajne bočne latice za različite neuniformne konfiguracije elemenata. (str. 193)

Tablica 8.5. Razina bočne latice na 180° za različite neuniformne konfiguracije elemenata. (str. 194)

Tablica 8.6. Najviša razina bočne latice u opsegu $abs(\text{Angle}) \geq 90^\circ$ za različite neuniformne konfiguracije elemenata. (str. 194)

Tablica 8.7. Širina glavne latice za različite neuniformne konfiguracije elemenata. (str. 194)

Tablica 8.8. Udaljenost susjednih antenskih elemenata po prstenu za različite neuniformne konfiguracije elemenata (N_l je broj antena raspoređenih na l^{om} prstenu). (str. 194)

Tablica 8.9. Udaljenost susjednih prstenova za različite neuniformne konfiguracije elemenata. (str. 195)

LITERATURA:

- [1] L. Josefsson, P. Persson, "Conformal Array Antenna Theory and Design", The IEEE Press, Wiley-Interscience, New Jersey, 2006.
- [2] S. Rupčić, "Nizovi kružnih valovodnih antena na sfernim strukturama", Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [3] S. Rupčić, Z. Sipus, V. Mandrić, "Input Admittance of Circular Waveguide Opening Mounted on Dielectric-Covered Grounded Spherical Surface", Proceedings of the IEEE International Conference ELMAR 2009, Zadar, Croatia, September 2009.
- [4] P.J.D. Gething, "High-Frequency Direction Finding", Processing of IEE, pp.54, January 1966.
- [5] J.R. Wait, "Electromagnetic Radiation from Cylindrical Structures", Pergamon Press, London, 1959.
- [6] D.L. Sengupta, J.E. Ferris, R. W. Larson, and T. M. Smith, "Azimuth and elevation direction finder study", Radiation Lab., University of Michigan, Ann Arbor, Rept. 7577-1-Q, AD 479635L, 1965; Rept. 7577-2-Q, 1966.
- [7] D.L. Sengupta, T. M. Smith, and R. W. Larson, "Radiation Characteristics of Spherical Array of Circularly Polarized Elements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 16, pp. 2-7, January 1968.
- [8] D.L. Sengupta, J.E. Ferris and T.M. Smith, "Experimental Study of a Spherical Array of Circular polarized Elements", Proceedings of the IEEE, pp. 2048-2051, November 1968.
- [9] R.J. Stockton, R.P. Hockensmith, "Application of Spherical Array – A Simple Approach", IEEE AP-s International Symposium Digest, pp. 1003-1012, 1977.
- [10] R.J. Stockton, R.P. Hockensmith, "Microprocessor Provides Multi-Mode Versatility for the ESSA Antenna System", IEEE AP-s International Symposium Digest, pp. 469-472, 1979.
- [11] P. Persson, L. Josefsson, "Calculating the Mutual Coupling between Apertures on Convex Surfaces using a Hybrid UTD-Mom Method", IEEE AP-S Int.Symp., Orlando, FL, USA, pp. 890-893, July, 1999.
- [12] H.J. Visser, G. Gerini "Beam Switching and Steering in Cylindrical Array Antennas using a Locally Planar Array Approach", 1. European Workshop on Conformal Antennas, Karlsruhe, Germany, pp. 46-49, October, 1999.

- [13] N. Burum, Z. Sipus, "Radiation Pattern of Spherical Array of Rectangular Microstrip Patches", Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 96-99. San Antonio, USA, 2002.
- [14] Z.Sipus, N. Burum, J. Bartolic, "Input Impedance and Mutual Coupling of Spherical Rectangular Microstrip Patch Antennas", 17th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications - ICECom 2003., pp. 209-212, October 2003.
- [15] N. Burum, S. Rupcic, Z.Sipus, "Theoretical and Experimental Study of the Spherical Arrays", IEEE International Conference – Melecom, Dubrovnik, pp. 503-506, May, 2004.
- [16] Z. Sipus, N. Burum, S.Skokic, P.-S. Kildal, "Analysis of spherical arrays of microstrip antennas using moment method in spectral domain", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol. 153, No. 6, December 2006.
- [17] R.F. Harrington, "Matrix Methods for field problems", Proceedings of IEEE, pp. 136-149, Vol. 55, No. 2, February 1967.
- [18] W.D. Rawle, "The Method of Moments: A Numerical Technique for Wire Antenna Design", High Frequency Electronics, February 1967.
- [19] J.J.H. Wang, "Generalized Moment Methods in Electromagnetics – Formulation and Computer Solution of Integral Equations", John Wiley and Sons, INC., New York, 1991.
- [20] R.F. Harrington, "Field computation by moment method", MacMillan, New York, 1968.
- [21] W.C. Croswell, "Origin and Development of the Method of Moments for Field Computation", IEEE Antennas and Propagation Society Magazine, pp. 31-36.
- [22] G.J. Burke, E.K. Miller, A.J. Poggio, "The Numerical Electromagnetics Code (NEC) – A Brief History", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Monterey, California, 2871-2874, June 2004 pp.
- [23] M.N.O.Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics – Second Edition", CRC Press LLC, Boca Raton London, New York, Washington, 2001.
- [24] N. Burum, "Modeliranje mikrotrakastih antena na sfernim strukturama", Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [25] T.Myin-U, "Partial Differential equations of Mathematical Physics – 2nd Edition", Chapter 10, pp. 282-305, New York:Nort Holland, 1980.
- [26] Z. Sipus, P.-S. Kildal, R. Leijon, and M. Johansson, "An algorithm for calculating Green's functions for planar, circular cylindrical and spherical multilayer substrates", Applied Computational Electromagnetics Society Journal, Vol. 13, No. 3, pp. 243-254, November 1998.

- [27] Z. Sipus, “*Analysis of planar and circular cylindrical multilayer structures with application to soft and hard surfaces*”, Ph.D. Thesis, Department of Microwave Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, October 1997.
- [28] Z. Sipus, “*CyMPA – Program for Analyzing Microstrip Patch Arrays on Circular-Cylindrical Structures*”, Final report for contract F61775-99-WE040, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, April 2000.
- [29] S.A. Schelkunoff, “*Some Equivalence Theorems of Electromagnetics and Their Application to Radiation Problems*”, Bell System Tech. J., Vol.15, pp. 92-112, 1936.
- [30] A.J. Booyesen, “*Aperture Theory and the Equivalence Principle*”, IEEE Antennas and Propagations Magazine, Vol.45, No.3, June 2003.
- [31] J. Kennedy, R. Eberhart, “*Particle swarm optimization*”, IEEE International Conference Neural Networks, pp. 1942-1948.
- [32] J.F. Schutte, A.A. Groenwold, “*A Study of Global Optimization Using Particle Swarms*”, Journal of Global Optimization, Vol. 31, No. 1, pp. 93-108, 2005.
- [33] M. Shihab, Y. Najjar, N. Dib, M. Khodier, “*Design of Nonuniform Circular Antenna Arrays Using Particle Swarm Optimization*”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 4, pp. 216-220, 2008.
- [34] <http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php> (travanj 2012.)
- [35] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii, “*Particle Swarm Optimization in Electromagnetics*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 2, pp. 397-407, February 2004.
- [36] F.J. Villegas, Y.Rahmat.Samii, D.R. Jackson, “*A Hybrid MoM Solution of Scattering From Finite Arrays of Cylindrical Cavities in a Ground Plane*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No.9, pp. 2369-2380, September 2003.
- [37] R.F. Harrington, “*Time-harmonic electromagnetic fields*”, McGraw-Hill, New York, 1961.
- [38] C. W. Chew, Z.Nie and Y.T.Lo, “*The Effect of Feed on the Input Impedance of a Microstrip Antenna*”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 3. No. 3, pp. 79-83, March, 1990.
- [39] W.Y. Tam, K.M. Luk, “*Resonance in spherical-circular microstrip structures*”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-39, pp.700-704, April 1991.
- [40] E. Zentner, “*Antene i radiosustavi*”, Graphis, Zagreb, 1999.
- [41] L. Marantis, E.D. Witte, P.V. Brennan, “*Comparison of various Spherical Antenna Array*

Element Distributions”, Antennas and Propagation 2009, EuCAP 2009. 3rd European Conference, pp. 2980-2984, March 2009.

[42] E.A. Rakhmanov, E.B. Saff, Y.M. Zhou, “*Minimal Discrete Energy on the Sphere*”, Mathematical Research Letters 1, pp. 647-662, 1994.

[43] P. Leopardi, “*Distributing points on the sphere: Partitions, separations, quadrature and energy*”, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, 2006.

[44] R. E. Munson, “*Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 74-78, January 1974.

[45] D.M. Pozar, D.H. Schaubert, “*The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*”, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1995.

[46] E.O. Hammerstad, “*Equations for Microstrip Circuits Design*”, Microwave Conference, pp. 268-272, Hamburg, Germany, September 1975.

[47] E. Chang, S.A. Long, W.F. Richards, “*An Experimental Investigation of Electrically Thick Rectangular Microstrip Antennas*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 6, June 1986.

[48] J.R. James, P.S. Hall, C. Wood, “*Microstrip antenna: theory and design*”, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1981.

[49] A.A. Kishk, L. Shafai, “*The Effect of Various Parameters of Circular Microstrip Antennas on Their Radiation Efficiency and the Mode Excitation*”, IEEE Transactions Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 8, August 1986.

[50] H.T. Chen, K.L. Wong, “*Cross-polarization characteristics of a probe-fed spherical-circular microstrip patch antenna*”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 6, No. 12, pp. 705–710, September 1993.

[51] G. Splitt, M. Davidovitz, “*Guidelines for Design of Electromagnetically Coupled Microstrip Patch Antennas on Two-Layer Substrates*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 38, No. 7, pp. 1137-1140, July 1990.

[52] D.H. Schaubert, D.M. Pozar, A. Adrian, “*Effect of Microstrip Antenna Substrate Thickness and Permittivity: Comparison of Theories with Experiment*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 37, No. 6, pp. 677-682, June 1989.

[53] N. Burum, Z. Sipus, “*Radiation Properties of Spherical and Cylindrical Rectangular Microstrip Patch Antennas*”, Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije, Vol.43 No.1, Str. 69-74, Listopad 2002.

- [54] J.R. James, P.S. Hall, "Handbook of Microstrip Antennas", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1989.
- [55] D. Augustin, R. Staraj, E. Cambiaggio, A. Papiernik, "Microstrip Phased Array Antennas Printed on Inclined Planes", Radioengineering, Vol. 5, No. 2, pp. 1-7, June 1996.
- [56] S. Rupcic, V. Mandric, D. Zagar, "Reduction of Sidelobes by Nonuniform Elements Spacing of a Spherical Antenna Array", Radioengineering, Vol. 20, No. 1, pp. 299-306, April 2011.
- [57] S. Rupcic, V. Mandric, D.Vinko, "Radiation Pattern of Waveguide Antenna Arrays on Spherical Surface – Experimental Results", International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, Vol. 1, No. 1., pp. 31-36, June 2010.
- [58] S. Rupcic, V. Mandric, S. Rimac-Drlje, "Fabrication Errors Influence on the Spherical Array Radiation Pattern", Radioengineering, Vol.19, No. 3, pp. 378-385, September 2010.
- [59] S. Rupcic, V. Mandric, D. Pilski, "Experimental Results of Circular Waveguide and Microstrip Antennas" Proceedings of the IEEE International Conference ELMAR 2011, Zadar, Croatia, September 2011.
- [60] R. Hooke, T. A. Jeeves, "Direct search - solution of numerical and statistical problems", Journal of the Association for Computing Machinery. 8. 212 - 229. 1961.
- [61] R. M. Lewis, V. Torczon, and M. W. Trosset, "Direct Search methods: Then and now", J. Comput, Appl. Math., 124 (2000), pp. 191-207.
- [62] http://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula (travanj 2012.)
- [63] <http://www.longitudestore.com/haversine-formula.html> (travanj 2012.)

SAŽETAK

Disertacija govori o konformnim nizovima – antenama koje imaju sposobnost prilagodbe podlozi na koju su postavljene. Dobre karakteristike poput mogućnosti pokrivanja cijele hemisfere, preko šireg frekvencijskog područja od područja planarnih nizova, do mogućnosti usmjeravanja glavne latice u željenom smjeru i pri tom ne gubljenju na vrijednosti dobitka, čine ove antenske sustave primjenjive u različitim područjima komunikacija, u vojnoj i zrakoplovnoj industriji, mogu poslužiti za praćenje objekata, telemetriji, te u raznim upravljačkim procesima.

U sklopu ovog istraživanja obrađene su dvije vrste antena kao elemenata sfernog niza – otvoreni valovod antene i mikrotrakaste antene. Obje vrste antena rade u mikrovalnom području, a dimenzije su reda veličine λ . Teorijski model temelji se na izračunavanju dijagrama zračenja takvih antena, a analiza se odvija uz pomoć moment metode uz primjenu spektralne metode. U praktičnom dijelu analize dijagrama zračenja sfernih antena koristi se *Metoda direktnog pretraživanja* i *Particle Swarm Algorithm* – PSO algoritam uz pomoć kojih se optimira dijagram zračenja po relevantnim parametrima kako bi se što je više moguće zadovoljili uvjeti na primjenu pojedinog niza.

Uz sve prije navedeno, teorijski model verificiran je laboratorijskim modelom niza, no i uz neidealne uvjete mjerenja, postignuti rezultati dobro se poklapaju s očekivanim teorijskim rezultatima, što ukazuje na ispravnost teorijskog modela sfernog antenskog niza i pripadajućeg računalnog programa.

SUMMARY

This work deals with conformal antenna arrays, i.e. antennas which have the ability to mold to curved shaped surfaces. Advantages of this system such as whole hemisphere coverage, wide bandwidth, beam steering without decreasing gain, make these antennas applicable in different category of communication, in military industry, aeronautics, and finally, they can be used for satellite tracking, telemetry and command applications.

This PhD disertation investigates two types of antenna elements which constitute antenna array – waveguide and microstrip antennas. Working frequency ranges between 1.45 and 2.0 GHz, and the dimension of elements is order of magnitude λ .

The array was modeled by using a computer program based on the method of moments in spectral domain. Radiation pattern optimization was carried out by using the *Exact search* method and the PSO algorithm.

The results obtained from theoretical investigation are verified by a comparison with measured results. Despite errors in the measured results which are a consequence of a not well-defined anechoic chamber and experimental model errors, there is a good agreement between numerical and experimental results in this work.

ŽIVOTOPIS

Vanja Mandrić rođena je 11.01.1982. godine u Osijeku. 2000. godine završava srednju školu prirodoslovno – matematičkog smjera u Belom Manastiru. Školske godine 2000/01 započinje studij na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku i završava ga 2005. godine na smjeru 'Elektronika i automatizacija'. Za vrijeme studiranja, 2002. dobitnica je stipendija Sveučilišta J. J. Strossmayera Osijek, zatim stipendija AMAC UK i 2004. godine postaje stipendist MZOŠ RH.

Nakon studija, 2005. zapošljava se na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku kao viši laborant, a 2006. počinje raditi kao asistent u području 'Komunikacija'. Poslijediplomski studij upisala je 2005. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer 'Telekomunikacije i informatika'. Doktorsku disertaciju s temom 'Optimizacija dijagrama zračenja antenskih nizova na sfernoj podlozi' radila je pod vodstvom doc.dr.sc. Slavka Rupčića.

U tom je razdoblju na fakultetu uključena i na niz djelatnosti vezanih za izgradnju Laboratorija za Visokofrekvencijska mjerenja i unapređenje nastave na više kolegija.

Područje znanstvenog interesa su radiokomunikacije – strukture koje zrače, točnije, konformni antenski nizovi. Autor je i koautor 12 znanstvenih radova, od čega dva rada A kategorije, jedan B, osam radova u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom i jedan rad u zborniku skupa bez recenzije.

Istraživač je na višegodišnjem znanstvenom projektu MZT RH – **Adaptivni prijenos videosignala radijskim mrežama u heterogenom okruženju**; voditelj projekta: prof.dr.sc Snježana Rimac-Drlje.

BIOGRAPHY

Vanja Mandrić was born on 11 January 1982 in Osijek, Croatia. She received her BSEE degree from the University of Osijek. She has been working at the Faculty of Electrical Engineering as assistant since 2005, and during that period she has been involved in establishing and improvement of Laboratory for High Frequency Measurement.

While working on the PhD dissertation entitled 'Radiation pattern optimisation for antenna arrays on spherical surface', she was a researcher on the project: 'Adaptive video transmission over wireless networks in heterogeneous environment' – principal investigator: dr. Snježana Rimac-Drlje, Full Professor.

Since 2005 she has been teaching graduate and ungraduate level courses at the Faculty of Electrical Engineering, J.J. Strossmayer University of Osijek, Croatia.

Vanja Mandrić's current research interests mainly focus on radiating structures – conformal arrays. She has authored and co-authored 12 scientific papers, 3 of which are scientific papers in other journals, 1 is a non-refereed conference paper, and 8 are papers in international conference proceedings.

Ključne riječi / Key – words

konformne antene – conformal antennas

valovodne antene – waveguide antennas

mikrotrakaste antene - microstrip antennas

dijagram zračenja – radiation pattern

antenski nizovi – antenna arrays

moment metoda – moment method

spektralna metoda – spectral method

sferni antenski nizovi – spherical antenna arrays

optimizacija – optimization