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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:043747

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

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
Sveučuilište 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
Sveučuilište 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 *DIREKTNOG PRETRAŽIVANJA* SVEUKUPNOG PROSTORA 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 DIREKTNOG 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 dovoljni 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.

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 zračeći 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 ± 60°	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 je 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

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].

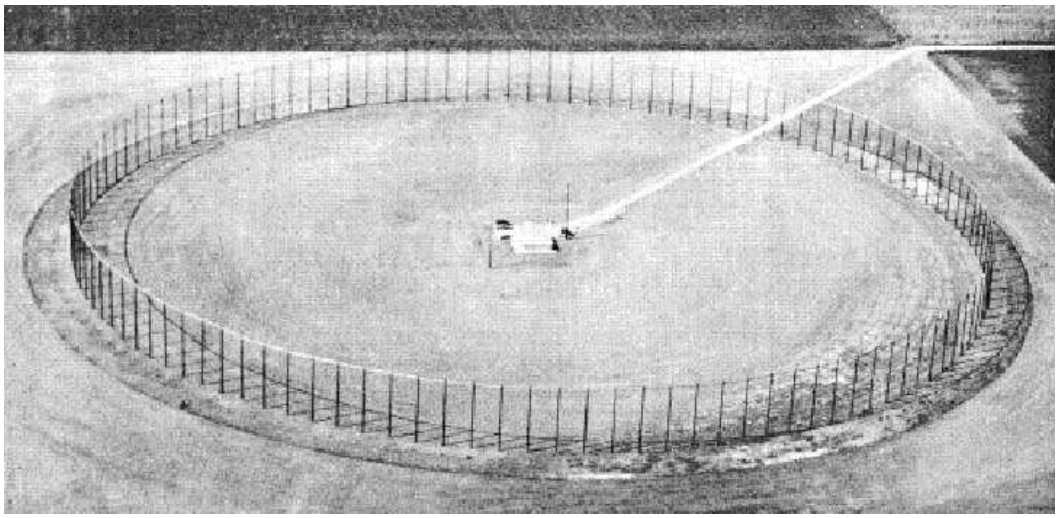
2.1. POVIJESNI RAZVOJ KONFORMNIH ANTENA

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*. inegrated 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).

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 zračećih elemenata postavljenih ispred reflektirajućeg zaslona. Promjer niza bio je oko 300 m [1], [4].



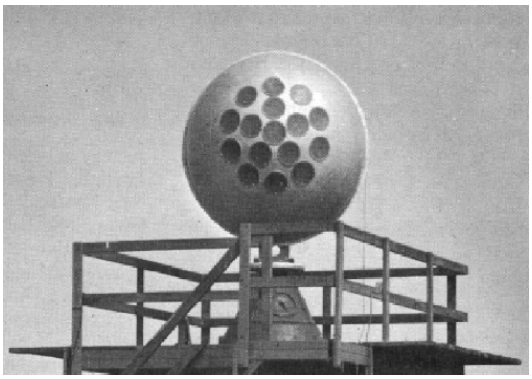
Slika 2.1. Eksperimentalna 300 m Wullenweber antena na Sveučilištu Illinois [1].

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 Shestag 1974., a primjenu nalazi u zrakoplovstvu.

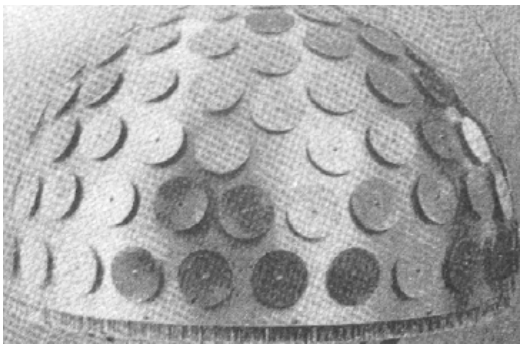
Jim Wait obrađivao je zračenja iz otvora na kružnim cilindrima 1959. godine, a rezultati su dani u knjizi 'Elektromagnetsko zračenje cilindričnih struktura' [1], [5], čime je započelo proučavanje kružnih cilindričnih i konusnih struktura, koje predstavljaju antene na glatkim površinama tj., konformne 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].

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].



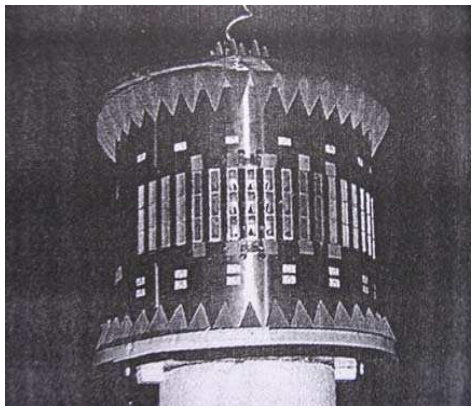
Slika 2.3. Niz kružnih mikrotrakastih antena na polusferi [9], [10].

Nakon intezivnog 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].

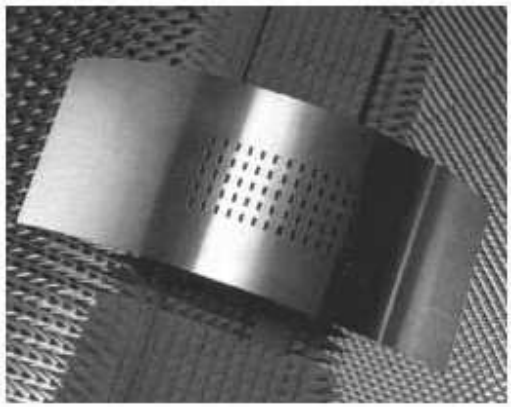
Krajem devedesetih i početkom dvijetisućitih pojavljuju se pojedinačni slučajevi izvedbe i analize konformnih (cilindričnih, konusnih i sfernih) antena.

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].

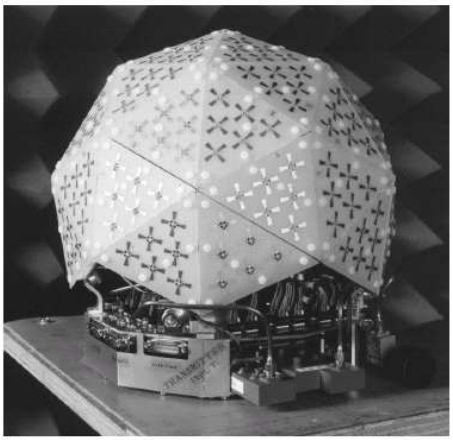
H. J. Visser i dr. 1999. izrađuju antenu cilindričnog oblika kao demonstrator za analizu konformnih antena (Slika 2.5.) [12] – TNO Physics and Electronics Laboratory, Netherland.



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

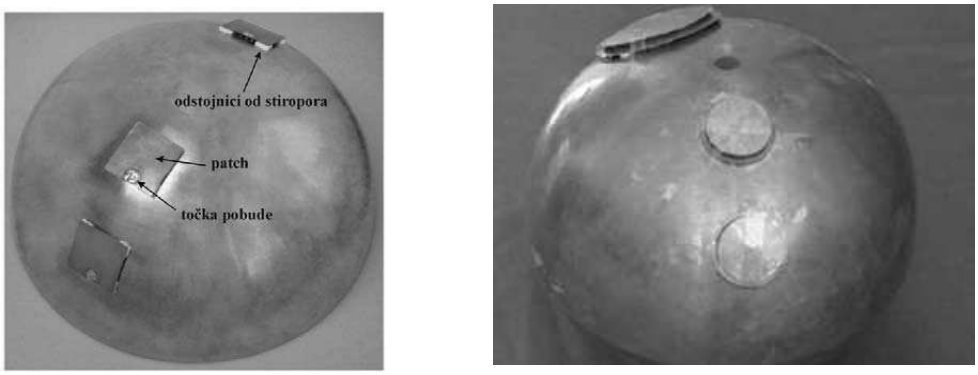
trokuta, od kojih svaki sadrži 6 križnih dualno polariziranih dipolnih elemenata za pokrivanje 360° po azimutu i od -10° do 90° po elevaciji [1].



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 parazitmin rezonatorom (Slika 2.7.) [13], [14].

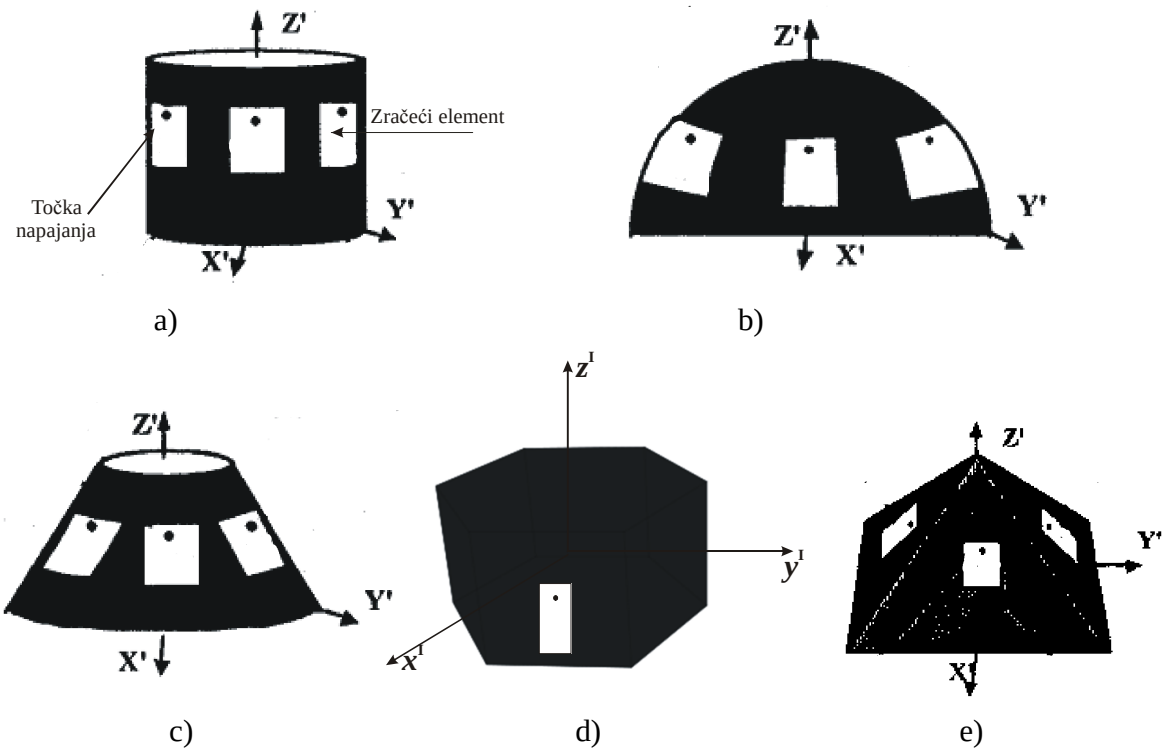


Slika 2.7. Eksperimentalne mikrotrakaste antene na polusferi [13], [14], [15], [16].

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 kompliciranа 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 plohama: a) cilindar; b) sfera (polusfera); c) stožac; II. S planarnim plohama: d) prizma; e) piramida [55].

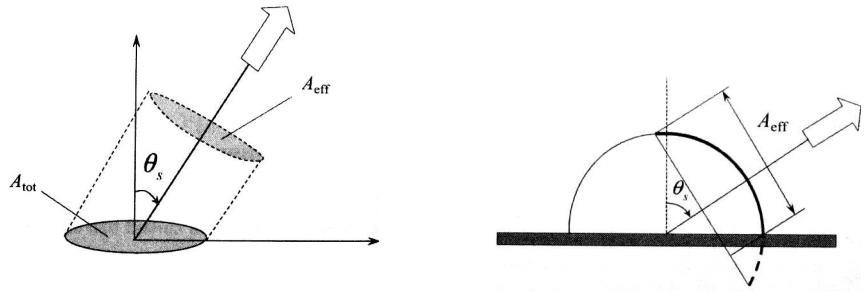
Uobičajena konformna antena sastoji se od zračećih elemenata ravnomjerno raspoređenih na zakrivljenoj površini. Ovo je slučaj kada oblik zračećeg elementa prati zakrivljenost površine. Drugi slučaj je kada su antenski elementi ugrađeni i raspodijeljeni na zakrivljenoj površini, ali ne prate zakrivljenost 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 zračećih 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 zračeći 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].



a) b)

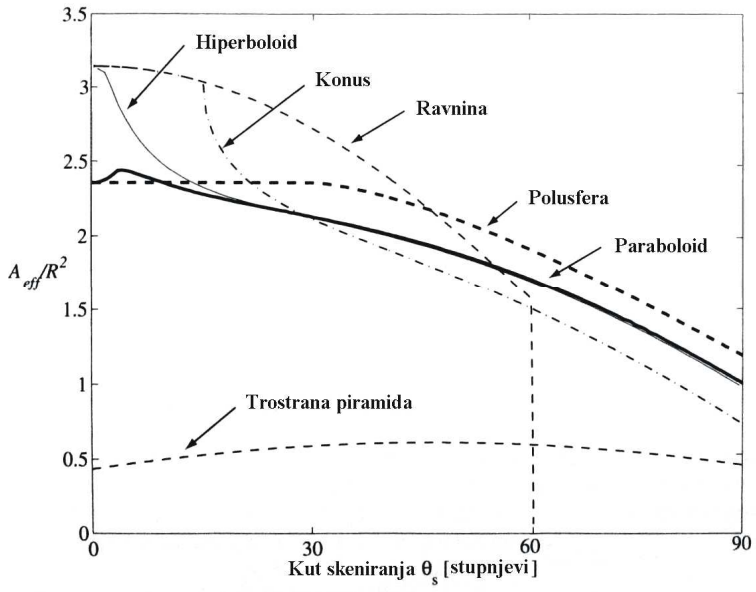
Slika 2.9. Efektivna površina i kut skeniranja: a) planarni niz i b) sferni niz (polusfera ili polucilindar) [1].

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].

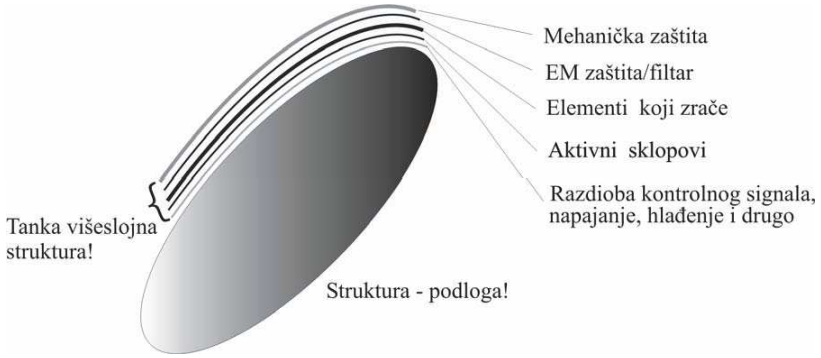
Sažeti prikaz različitih oblika konformne strukture (podloge) i njihova mogućnost iskorištenja raspoložive veličine ($2R$ je promjer baze promatranog slučaja) dan je Slikom 2.10. gdje je za usporedbu uključen hiperbolni oblik i planarni slučaj. U svim situacijama, osim za piramidu i planarni oblik, odnos 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)

- rješavanje diskretiziranih jednadžbi direktnim ili iterativnim metodama.

MoM metoda predstavlja metodu svođenja 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:

$L(f) = g$ (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, ... definiranih u domeni operatora L:

$$f = \sum_n \alpha_n f_n \tag{3-2}$$

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:

$$\sum_n \alpha_n L(f_n) = g\,. \tag{3-3}$$

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

$$\langle f, g \rangle = \iint_S f \cdot g dS\,, \tag{3-4}$$

te se definira skup težinskih ili test funkcija w_1, w_2, w_3, ... 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:

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, L(f_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle\,, \qquad m = 1, 2, 3, \ldots \tag{3-5}$$

Ovaj sustav jednadžbi zapisan u matričnom obliku tada glasi:

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

gdje je:

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

$$[\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_1 \\ . \\ . \end{bmatrix}, \qquad [g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g\rangle \\ \langle w_2, g\rangle \\ . \\ . \end{bmatrix}. \tag{3-8}$$

Rješenje jednadžbe (3-2) je tada jednako:

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

gdje je:

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

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

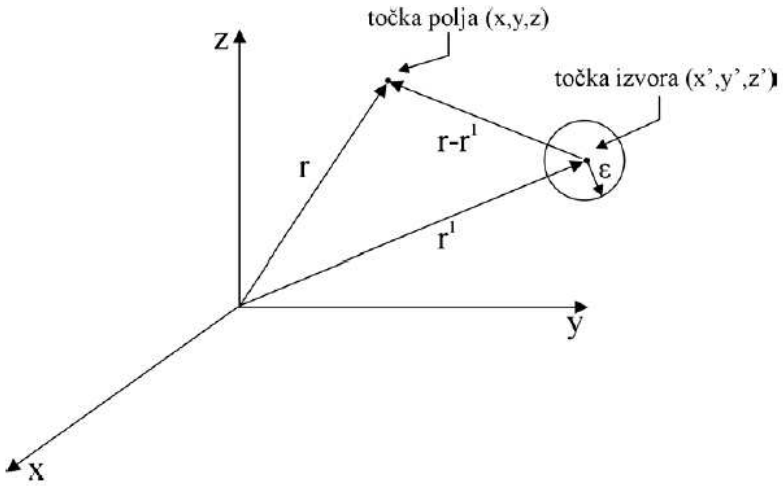
rješavanju problema zračenja otvor i mikrotrakastih antena pri čemu se određuje vrijednost nepoznate struje na površini antene ili se radi o ekvivalentnim strujama kao što je to slučaj kod otvor antena. Funkcija *f* je nepoznanica, nalazi se pod integralom i predstavlja rješenje ove jednadžbe. Ova se integralna jednadžba 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 jednadžba u ekvivalentnu integralnu jednadžbu, 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 jednadžbe [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].

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

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

$$LG(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}') = \delta(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}') \tag{3-11}$$

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

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

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

Prema [23], Greenova funkcija ima sljedeća svojstva:

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

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \oint_S \frac{\partial G}{\partial n} dS = 1 \tag{3-13}$$

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

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

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

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):

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

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

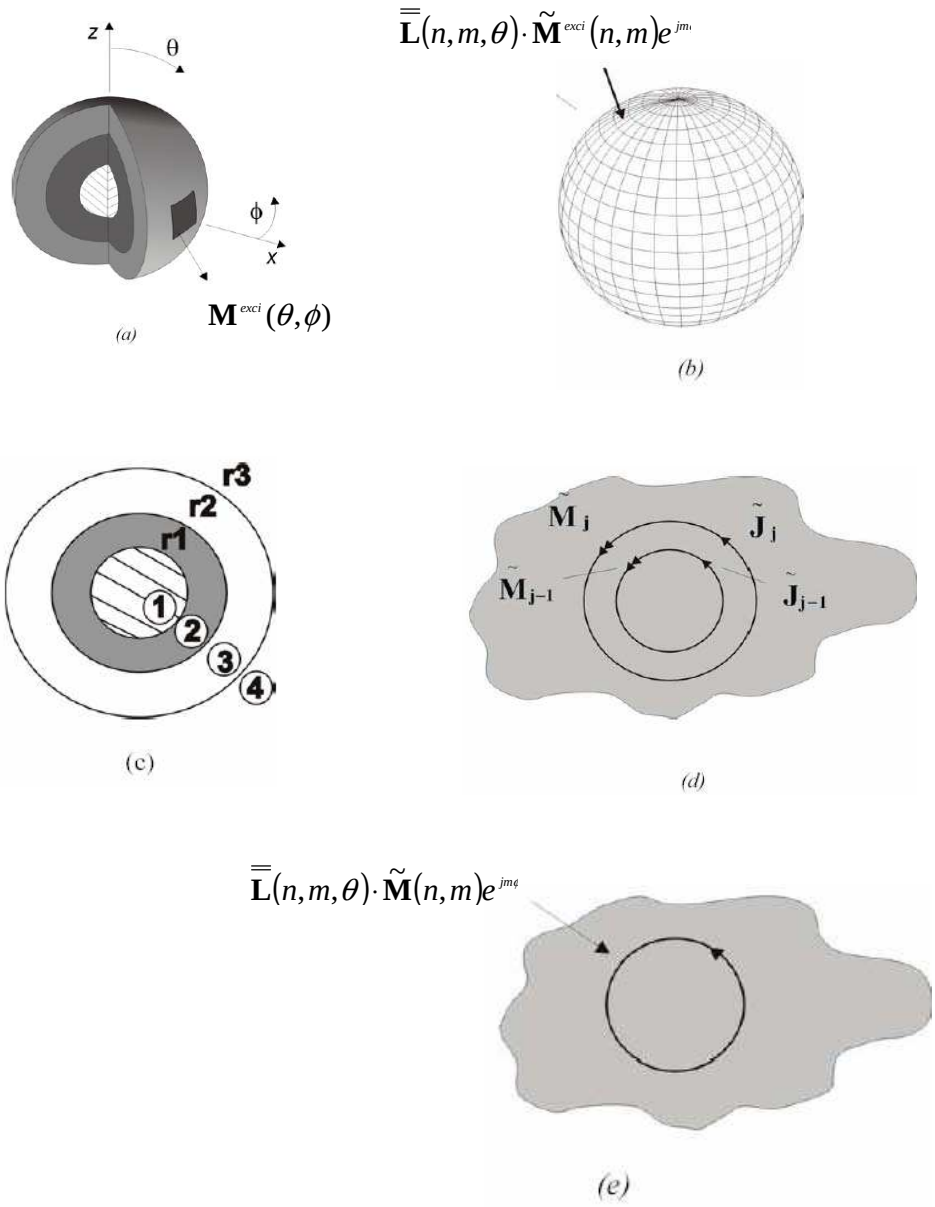
k_i – valni broj u i - tom sloju;

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.(N_{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) unutrar G1DMULT procedure rješavaju ovaj potproblem (jedan za električni, drugi za magnetski izvor). Ove podprocedure 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.

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

PLANARNI	Prostorna domena	Spektralna domena
FOURIER	$f(x,y,z)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{f}(k_x,k_y,z)e^{-j(k_x x+k_y y)}dk_x dk_y$	$\tilde{f}(k_x,k_y,z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}f(x,y,z)e^{j(k_x x+k_y y)}dxdy$
Varijable	x, y, z	k_x, k_y, z

CILINDRI.	Prostorna domena	Spektralna domena
FOURIER	$f(\rho,\phi,z)=\frac{1}{4\pi^2}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{f}(\rho,m,k_z)e^{-jk_z}e^{-jm\phi}dk_z$	$\tilde{f}(\rho,m,k_z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{0}^{2\pi}f(\rho,\phi,z)e^{jm\phi}e^{jk_z z}\rho d\phi dz$
Varijable	ρ, ϕ, z	ρ, m, k_z

SFERNI	Prostorna domena	Spektralna domena
VEKTOR-LEGENDRE	$f(r,\theta,\phi)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n=\lvert m\rvert}^{\infty}\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta)\cdot\tilde{f}(r,n,m)e^{jm\phi}$	$\tilde{f}(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi}\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta)\cdot f(r,\theta,\phi)\sin\theta e^{-jm\phi}d\theta d\phi$
Varijable	r, θ, ϕ	r, n, m

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

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

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

gdje je $P_n^{|m|}$ pridružena Legendreova funkcija prve vrste, reda *m*, 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 definirne granice vrijednosti karakterističnih veličina dijagrama (širina glavne latice 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 latice (*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

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 0,4λ i 0,5/λ.

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. M**etoda 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

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 pbest i qbest (lokalnog i globalnog najboljeg), u smjeru gdje je fitness funkcija najbolja po sljedećoj jednadžbi:

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

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

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

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;

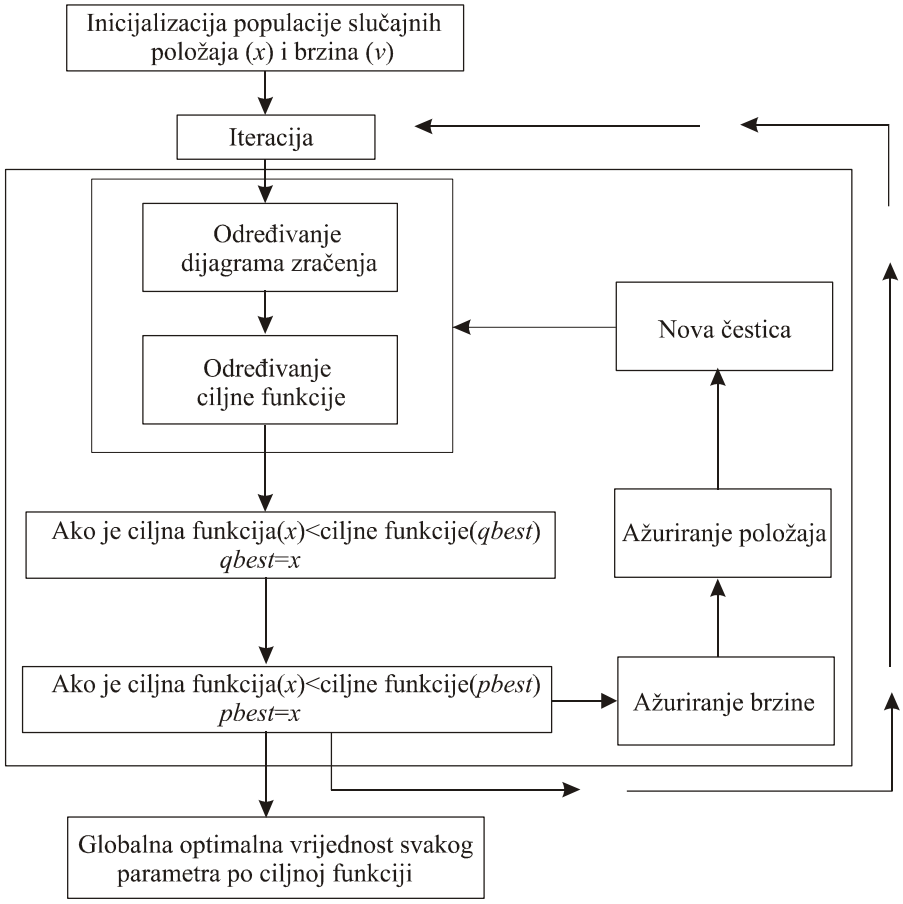
x_n – koordinata čestice u n-toj dimenziji;

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

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 njenoj 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.

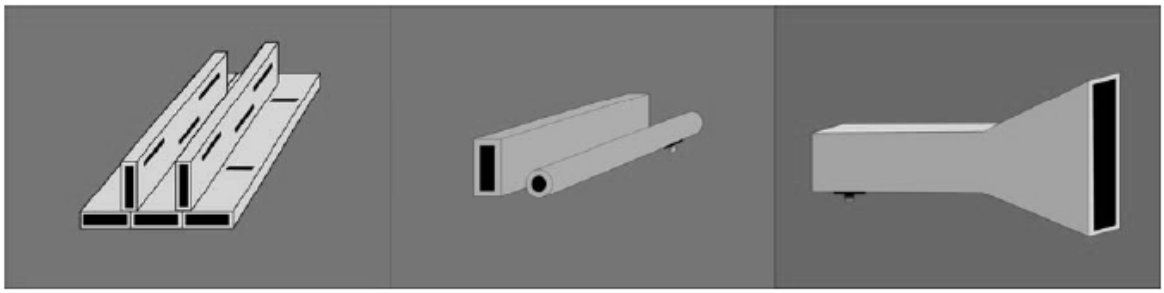
4. ELEMENTARNE ANTENE SFERNIH KONFORMNIH NIZOVA

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].



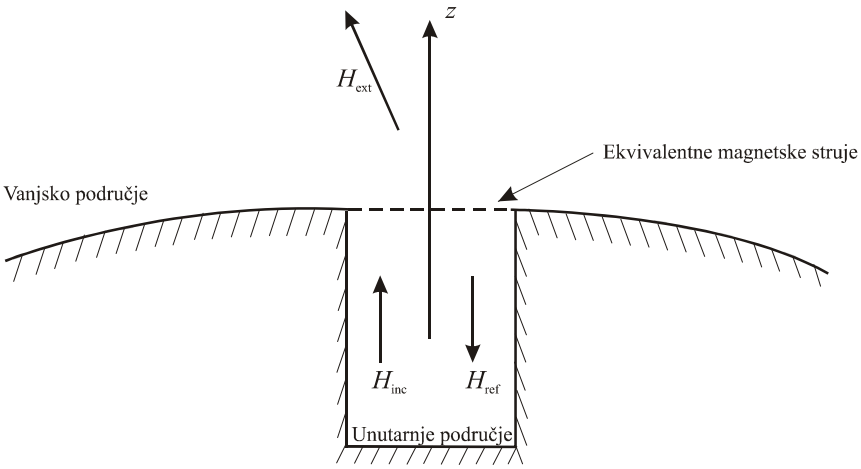
a) b) c)

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

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

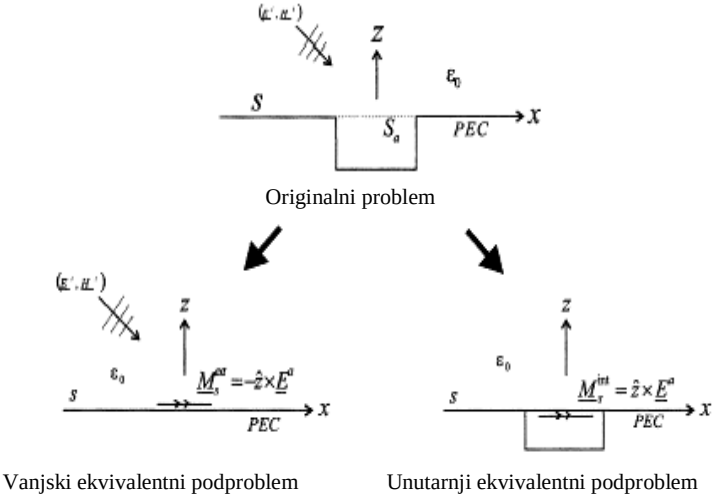
Otvor antene mogu biti montirane na (ili u) zakrivljenu površinu, te su stoga pogodne za primjene kod konformnih antenskih nizova. Slika 4.2. prikazuje valovodom napajanu otvor antenu kod koje je područje analize i izračuna podijeljeno u dva dijela – vanjski i unutarnji problem.



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.

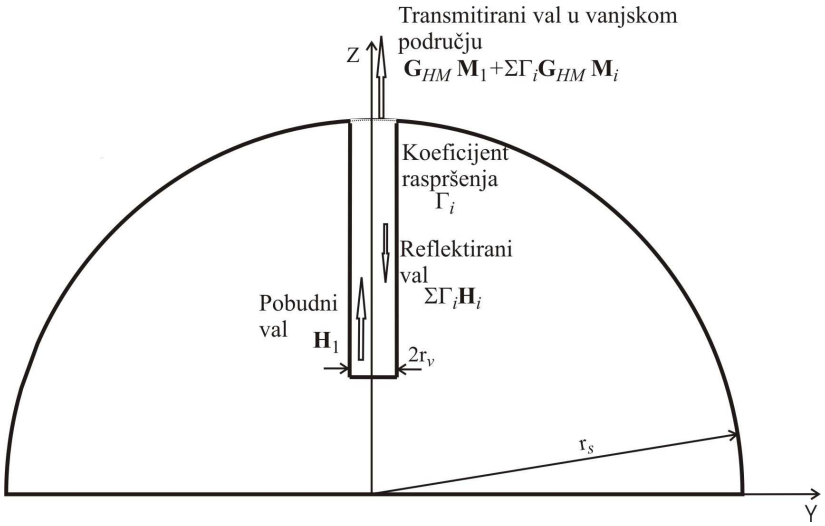
Sljedeća slika prikazuje sam princip podjele originalnog problema na dva potproblema.



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 – zračeći 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]:

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

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

$\mathbf{E}_1(\mathbf{r})$, $\mathbf{H}_1(\mathbf{r})$ 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.

Ekvivalentna magnetska struja dobije se sljedećim izrazima:

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

tako da vrijedi:

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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:

$$\tilde{\mathbf{M}}(r,n,m) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_r \\ \tilde{\mathbf{M}}_n \\ \tilde{\mathbf{M}}_m \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi S(n,m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{0}^{\pi} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta) \cdot \mathbf{M}(r,\theta,\phi) \cdot \sin\theta \cdot e^{-jm\phi} d\theta d\phi \tag{4-11a}$$

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

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

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

$\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta)$ predstavlja jezgru 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.

Korištenjem prethodno opisane metodologije za dominantni mod valovoda kružnog poprečnog presjeka - TE_{11} dobiju se slijedeći izrazi za ekvivalentne struje na otvoru valovoda u prostornoj (r,θ,ϕ) domeni:

$$\mathbf{M}_\theta = -\hat{\rho}\times\mathbf{E}_\phi \quad \Rightarrow \quad \mathrm{M}_\theta = \mathrm{E}_\phi = E_0 \mathrm{J}_1'\left(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta\right)\cos\phi \tag{4-12a}$$

$$\mathbf{M}_\phi = -\hat{\rho}\times\mathbf{E}_\theta \quad \Rightarrow \quad \mathrm{M}_\phi = -\mathrm{E}_\theta = -\frac{E_0}{\theta}\mathrm{J}_1\left(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta\right)\sin\phi \tag{4-12b}$$

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

a) Theta komponenta ekvivalentne struje:

$$\left.\begin{aligned}
\tilde{M}_\theta(r,n,m) &= -\frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s} J_1'(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial x}\sin^2\theta\ d\theta \\
&\quad + \frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s}\frac{1}{\theta}J_1(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)P_n^{|m|}(\cos\theta)\ d\theta \qquad \text{za} \quad |\boldsymbol{m}| = \mathbf{1}; \\
\tilde{M}_\theta(r,n,m) &= 0 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\quad \text{za} \quad |\boldsymbol{m}| \neq \mathbf{1}
\end{aligned}\right\} \tag{4-13}$$

b) Phi komponenta ekvivalentne struje:

$$\left.\begin{aligned}
\tilde{M}_\phi(r,n,m) &= j\frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s} J_1'(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)P_n^{|m|}(\cos\theta)\ d\theta \\
&\quad - j\frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s}\frac{1}{\theta}J_1(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial x}\sin^2\theta\ d\theta \qquad \text{za} \quad \boldsymbol{m} = \mathbf{1}; \\
\tilde{M}_\phi(r,n,m) &= -j\frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s} J_1'(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)P_n^{|m|}(\cos\theta)\ d\theta \\
&\quad + j\frac{E_0}{2S(n,m)}\int_0^{r_v/r_s}\frac{1}{\theta}J_1(\chi_{11}'\frac{r_s}{r_v}\theta)\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial x}\sin^2\theta\ d\theta \qquad \text{za} \quad \boldsymbol{m} = \mathbf{-1}; \\
\tilde{M}_\phi(r,n,m) &= 0\ . \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\quad \text{za} \quad |\boldsymbol{m}| \neq \mathbf{1}
\end{aligned}\right\} \tag{4-14}$$

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 **M**:

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

Ako se obrati pažnja na *Φ*-komponentu vanjskog dijela zračenja, postoje samo odlazni putjući valovi opisani s $a_{nm}^{i}\hat{H}_n^{(2)}(k_0 r)/r$. 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:

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

$$\tilde{E}_\theta(r_1,n,m)=\tilde{E}_\theta(r_2,n,m)\frac{r_2}{r_1}\frac{\hat{H}_n^{(2)'}(k_0r_1)}{\hat{H}_n^{(2)'}(k_0r_2)}\approx\tilde{E}_\theta(r_2,n,m)=\frac{r_2}{r_1}\frac{j^n e^{-jk_0r_1}}{\hat{H}_n^{(2)'}(k_0r_2)}. \tag{4-17}$$

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].

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

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

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

$$\mathbf{E}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-jk_0r}}{r}\frac{1}{\sqrt{2\pi S(n,m)}}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n=|m|}^{\infty}\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta)\cdot\overline{\overline{\mathbf{H}}}(n)\cdot\tilde{\tilde{\mathbf{G}}}_{\mathrm{EM}}(n,m,r_2|r_s)\tilde{\overline{\mathbf{M}}}(n,m)e^{jm\phi}, \tag{4-20}$$

pri čemu je:

$$\overline{\overline{\mathbf{H}}}(n)=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & \dfrac{j^n r_2}{H_n^{(2)'}(k_0r_2)} & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{j^{n+1}r_2}{H_n^{(2)}(k_0r_2)}\end{bmatrix}. \tag{4-21}$$

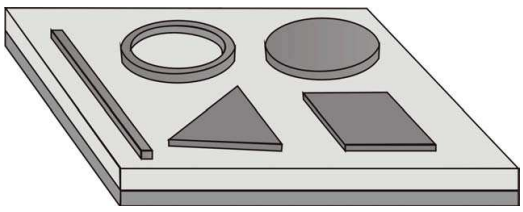
4.2. MIKROTRAKASTE ANTENE

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

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 zračeću mikrotrakastu antenu s druge razine. Schaubert, Pozar i Adrian prikazuju izmjerene podatke za pravokutnu miktrotrakastu 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.

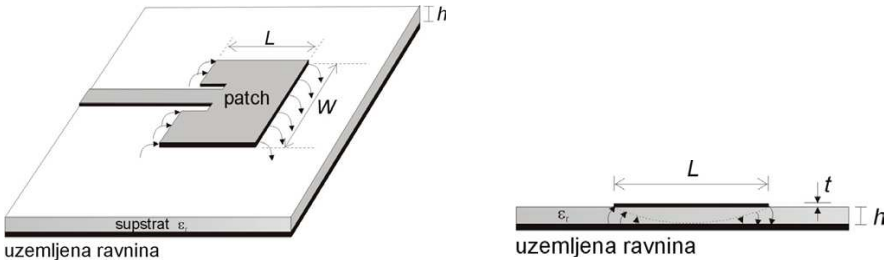
Mikrotrakasta antena sastoji se od metalne pločice (*eng*. patch, microstrip) i postavljena je na veću uzemljenu ravninu. Obično je 'otisnut' na materijal s relativnom permitivnošću ε_r u granicama između 2 i 10, no i taj materijal se može mijenjati, ovisno o primjeni. Zrak ili pjena male gustoće obično 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 (ε_r=12.8), na $LaAlO_3$ i ostale supstrate često korištenim za supervodiče (ε_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

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

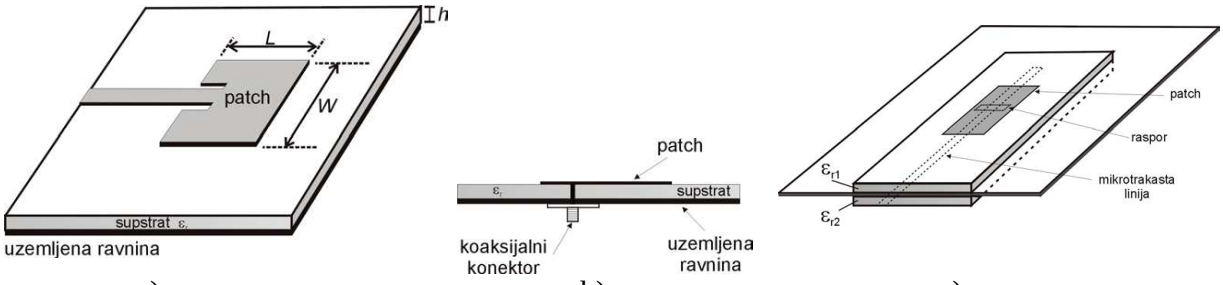


a) b)

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].



a) b) c)

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 kompliciranа, a samim tim pojednostavljuje se izrada antenskih nizova jer se i mikrotrakaste antene i pobudna mreža izrađuju na istom supstratu.

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 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 kontantom. 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].

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

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

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

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

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

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:

$$\tilde{\mathbf{J}}(r,n,m) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_r \\ \tilde{\mathbf{J}}_\theta \\ \tilde{\mathbf{J}}_\phi \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi S(n,m)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{0}^{\pi} \overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta) \cdot \mathbf{J}(r,\theta,\phi) \cdot \sin\theta \cdot e^{-jm\phi} d\theta d\phi \tag{4-25a}$$

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

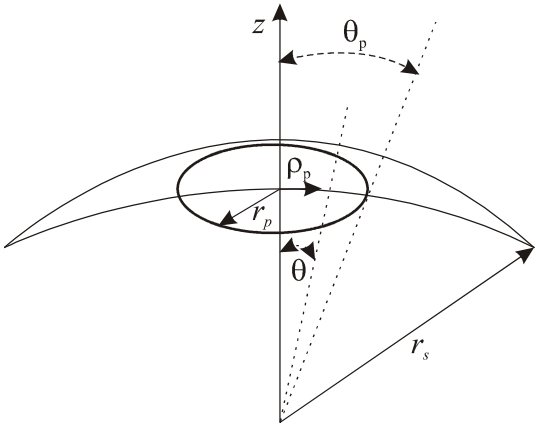
$$\overline{\overline{\mathbf{L}}}(n,m,\theta) = \begin{bmatrix} P_n^{|m|}(\cos\theta)\sqrt{n(n+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} & \dfrac{-jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \\ 0 & \dfrac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} & \dfrac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta} \end{bmatrix} \tag{4-25c}$$

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

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,

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:

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

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

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

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

Transformacijski par:

$$\tilde{f}(r,n,m) = \frac{1}{2\pi S(n,m)} \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi} \overline{\overline{\mathrm{L}}}(n,m,\theta)\mathbf{f}(r,\theta,\phi)\sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi \quad \text{(iz prostorne u frekvencijsku)}, \tag{4-28}$$

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

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.

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

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

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

po komponentama:

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

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

$$\tilde{J}_\theta(r,n,m) = \frac{1}{2\pi S(n,m)} \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi} \left(\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\cdot J_\theta - \frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\cdot J_\phi\right)\sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi, \text{ te} \quad (4\text{-}31)$$

$$\tilde{J}_\phi(r,n,m) = \frac{1}{2\pi S(n,m)} \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi} \left(\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\cdot J_\theta + \frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\cdot J_\phi\right)\sin\theta e^{-jm\phi} d\theta d\phi. \quad (4\text{-}32)$$

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

a) Theta komponenta struje:

$$\tilde{J}_\theta(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi}\left[\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\frac{1.84}{r_p}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\cos\phi\right]\sin\theta e^{-jm\phi}d\theta d\phi$$

$$-\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi}\left\{\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\left[-\frac{1}{r_s\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\phi\right]\sin\theta\right\}e^{-jm\phi}d\theta d\phi\,. \qquad (4\text{-}33)$$

Nadalje, integrali se mogu rješavati posebno:

$$\tilde{J}_\theta(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\cos\phi e^{-jm\phi}d\phi\int_{0}^{\pi}\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\frac{1.84}{r_p}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta$$

$$+\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\sin\phi e^{-jm\phi}d\phi\int_{0}^{\pi}\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\frac{1}{r_s\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta\,.$$

Integriranjem po phi, dobiju se rješenja integrala:

za $m=\pm1$, $\int_{-\pi}^{\pi}\cos\phi e^{-jm\phi}d\phi=\pi$,

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

za $m=-1$, $\int_{-\pi}^{\pi}\sin\phi e^{-jm\phi}d\phi=-\frac{\pi}{2}$, jer su integrali različiti od nule samo za $m=\pm1$.

Konačno se theta komponenta struje može zapisati:

$$\tilde{J}_\theta(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1.84}{r_p}\pi\int_{0}^{\pi}\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta$$

$$+\frac{1}{2\pi S(n,m)}(-2j)\frac{\pi}{2}\frac{1}{r_s}\int_{0}^{\pi}\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\frac{1}{\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta\,;\ \text{za } m=1, \qquad (4\text{-}34)$$

$$\tilde{J}_\theta(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1.84}{r_p}\pi\int_{0}^{\pi}\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta$$

$$+\frac{1}{2\pi S(n,m)}(-2j)\left(-\frac{\pi}{2}\right)\frac{1}{r_s}\int_{0}^{\pi}\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\frac{1}{\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta\,;\ \text{za } m=-1, \qquad (4\text{-}35)$$

0, inače.

b) Phi komponenta struje:

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

$$\tilde{J}_{\phi}(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi}\left[\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}\frac{1.84}{r_p}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\cos\phi\right]\sin\theta e^{-jm\phi}d\theta d\phi$$

$$+\frac{1}{2\pi S(n,m)}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi}\left[\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\left(-\frac{1}{r_s\theta}\right)J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\phi\right]\sin\theta e^{-jm\phi}d\theta d\phi. \qquad (4\text{-}36)$$

$$\tilde{J}_{\phi}(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1.84}{r_p}\pi\int_{0}^{\pi}\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta$$

$$-\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1}{r_s}(-2j)\frac{\pi}{2}\int_{0}^{\pi}\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\frac{1}{\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta;\ \text{za}\ m=1, \qquad (4\text{-}37)$$

$$\tilde{J}_{\phi}(r,n,m)=\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1.84}{r_p}\pi\int_{0}^{\pi}\frac{jmP_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta}J_1'\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta$$

$$-\frac{1}{2\pi S(n,m)}\frac{1}{r_s}(-2j)\left(-\frac{\pi}{2}\right)\int_{0}^{\pi}\frac{\partial P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\partial\theta}\frac{1}{\theta}J_1\left(\frac{1.84}{r_p}r_s\theta\right)\sin\theta d\theta;\ \text{za}\ m=-1, \qquad (4\text{-}38)$$

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

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

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

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

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

$\overline{\overline{\tilde{\mathbf{G}}}}(n,m,r|r_{patch})$ 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:

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

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

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

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

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

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

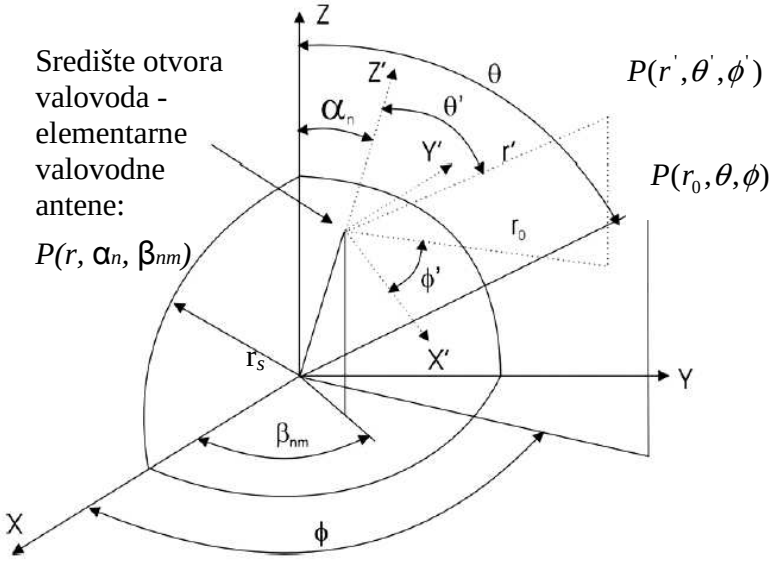
4.3. ZRAČENJE ANTENSKOG NIZA NA SFERNOJ PODLOZI

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 električka 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 lokani koordinatni sustav.



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

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]:

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

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

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

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

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:

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

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

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:

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

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.

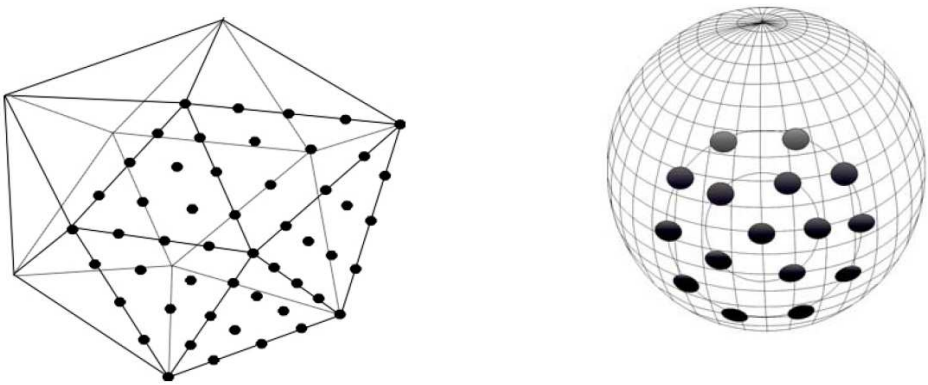
U okviru ovog istraživanja, obradit će se tri osnovne konfiguracije antenskih elemenata, uz dodatnu, slobodnu konfiguraciju na samom kraju istraživanja.

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.

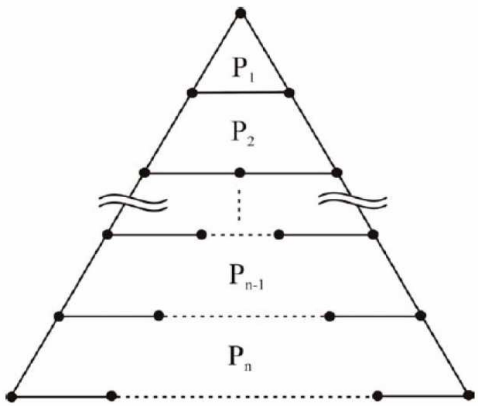
Situacija se može uvelike poboljšati, ako se svaki trokut podijeli u više jednakostraničnih trokuta i antenski elementi se postave u vrhove novodobivenih trokuta, a skoro je u potpunosti zadržana ideja raspodjele elemenata [6], [7]. Na Slici 4.10. prikazan je primjer takve raspodjele antenskih elemenata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



a) b)

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].

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

- elevacijski kut:

$$\alpha_n = 90° - \frac{30°}{P_n}(2n - \mathrm{sgn}(n)\cdot S) \tag{4-51}$$

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

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

sgn(n) - predznak od n.

Pri tome je:

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

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

- za azimutalni kut:

$$\beta_{nm} = \frac{72°m}{N_{max} - |n|}, \text{ za } n = N_{max-1},\ldots, B \tag{4-54}$$

$$\beta_{nm} = 180° + \frac{72°m}{N_{max} - |n|}, \text{ za } n = -N_{max-1},\ldots, B \tag{4-55}$$

$$\beta_{nm} = \beta_{\pm nm} + \frac{180°}{M(B)+1|}K, \text{ za } n = \pm 1,\ldots, \pm(B\text{-}1) \text{ za } S\text{=}1$$

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

gdje je:

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

$$B = \frac{P_n + S}{2}, \tag{4-58}$$

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

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

Ako je raspodjela elemenata dana prethodnim relacijama, broj antenskih elemenata korištenih za različite vrijednosti α dan je Tablicom 4.2. kada je θ_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:

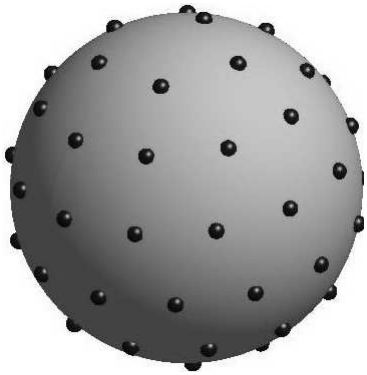
$$d = \frac{2\pi}{3P_n\sqrt{3}} r_s , \tag{4-60}$$

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:

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

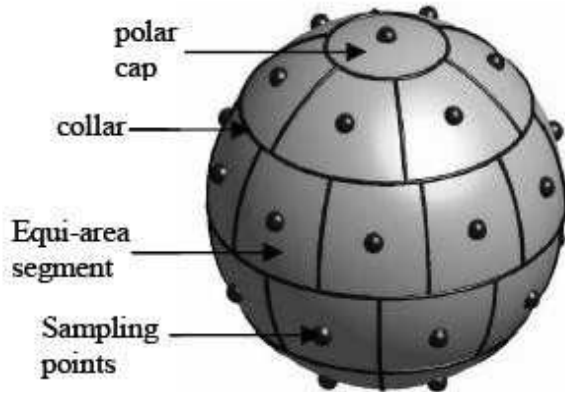
$$\phi_k = \left(\phi_{k-1} + \frac{3.6}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{1-h_k}} \right) (\mathrm{mod}\, 2\pi),\ 2 \leq k \leq N\text{-}1, \tag{4-62}$$

$\phi_k = \phi_N = 0$.

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 (θ_{k-1}, φ_{k-1}) preko meridijana do sljedeće latitude 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;

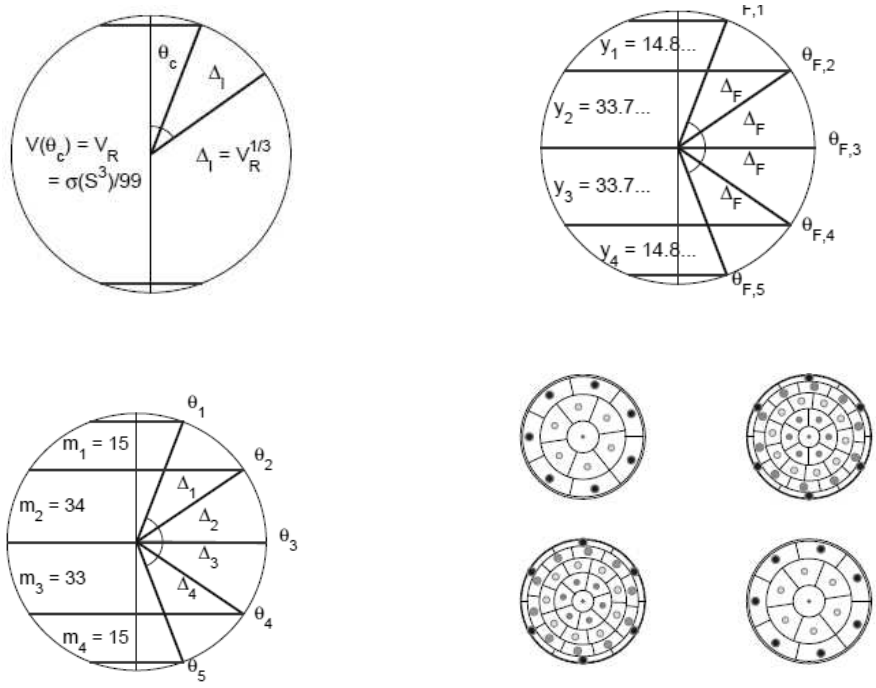
else

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

1. Odrediti kolatitude 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 kolatitude 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:

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

gdje je Ω površina S^d. (4-64)

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

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

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:

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

3. Određivanje idealnog broja pojasa.

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

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

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, round(n_I)),

gdje je, za $x \geq 0$,

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

gdje je $\lfloor\ \rfloor$ 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:

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

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

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

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

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

$$y_i := \frac{\nu(\theta_{F,i+1}) - \nu(\theta_{F,i})}{\nu_R}. \tag{4-70}$$

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 $i \in \{1,..., n+1\}$. Definira se niz a i m polazeći od $a_0 := 0$, a za $i \in \{1,..., n+1\}$,

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

7. Odrediti kolatitude svake zone.

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

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

Za $i \in \{1,..., n+1\}$, koristi se Z za definiranje zone i+1 kako bi bilo $Z(\theta_i, \theta_{i+1})$. Na kraju, za $i \in \{1,..., n\}$, 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 DIREKTNOG 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 jednomodnog režima rada, frekvencija ne mjenja 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 najraširenij 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

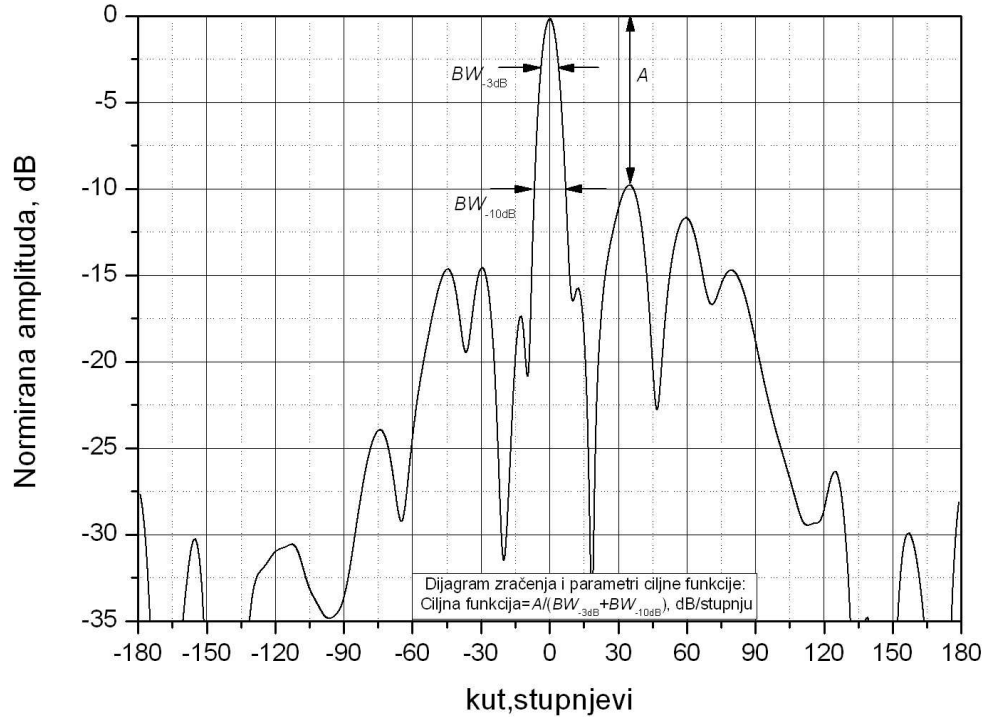
geometriju izvedbe antenskog niza od kojih su za analizu odabrani: radijus sfere, broj elemenata, te njihov raspored na podlozi. Podloga niza je idealna vodljiva sfera na koju su postavljene mikrotrakaste antene polumjera 2,65 cm ili otvoreni valovodi polumjera 6 cm. Problem sprege riješen je tako da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

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 fitnes 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:

$$\mathrm{CF}_1 = \frac{A}{BW_{\text{-3dB}} + BW_{\text{–10dB}}}, \tag{5-1}$$

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:

$$\mathrm{CF}_2 = \frac{\left(\frac{A}{BW_{\text{-3dB}} + BW_{\text{–10dB}}}\right)_E + \left(\frac{A}{BW_{\text{-3dB}} + BW_{\text{–10dB}}}\right)_H}{2} \tag{5-2}$$

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 zračeća 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]:

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

gdje je:

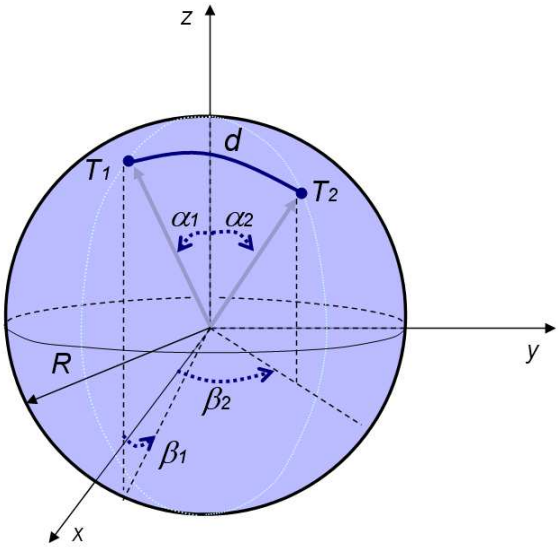
- $\mathrm{haversin}(\theta) = \sin^2(\theta/2) = (1-\cos(\theta))/2$
- d je udaljenost između dvije točke (T_1 i T_2) na sferi radijusa R;

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

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

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

gdje je:
- h = 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 (1,7λ) i r_s = 52,9 cm (3λ);
- selekcijski kut konusa α_{sel} = 45° (broj antena unutar konusa: 31);
- frekvencija pobude je 1,7 GHz i osigurava jednomodni režim rada.

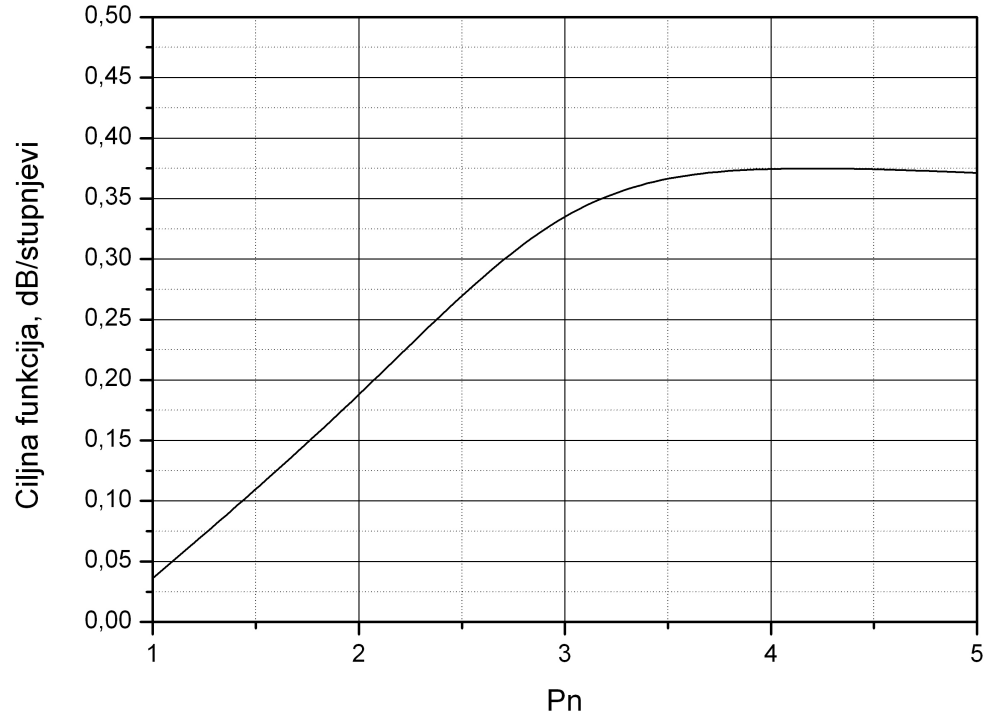
Selekcijski kut konusa je elevacijski kut kojim su selektirani antenski elementi koji su aktivni (pobuđeni) i koji tako formira aktivni konus niza. Tako su pobuđeni svi antenski elementi čiji je elevacijski kut manji ili jednak ovom selekcijskom kutu konusa.

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

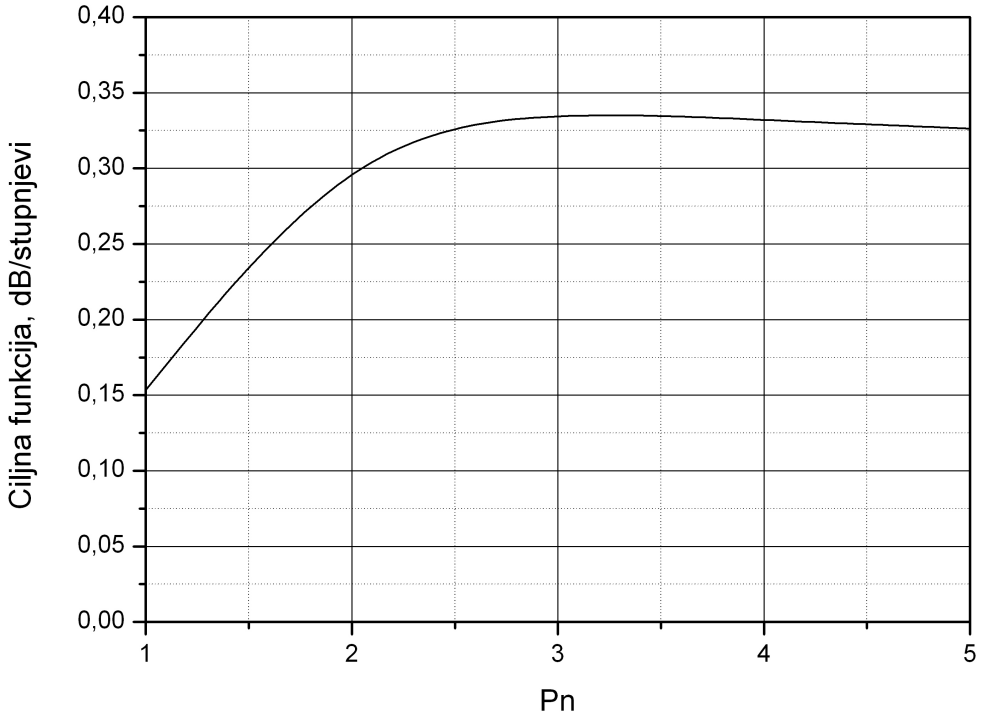
5.1.1. **Utjecaj promjene broja elementarnih antena na dijagram zračenja - ciljnu funkciju**

U poglavlju 4.4.2. koje govori o ikosaedarskoj konfguraciji 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 Pn=1, te se na taj način na hemisferi može rasprediti 6 antenskih elemenata. Pn=2 podrazumijeva podjelu jedne stranice na dva dijela (tri jednakostranična trokuta) i broj antenskih elemenata je 26. Tako Pn=3 podrazumijeva 46, za Pn=4 je to 91 i na kraju Pn=5 podrazumijeva 126 elemenata na hemisferi.

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

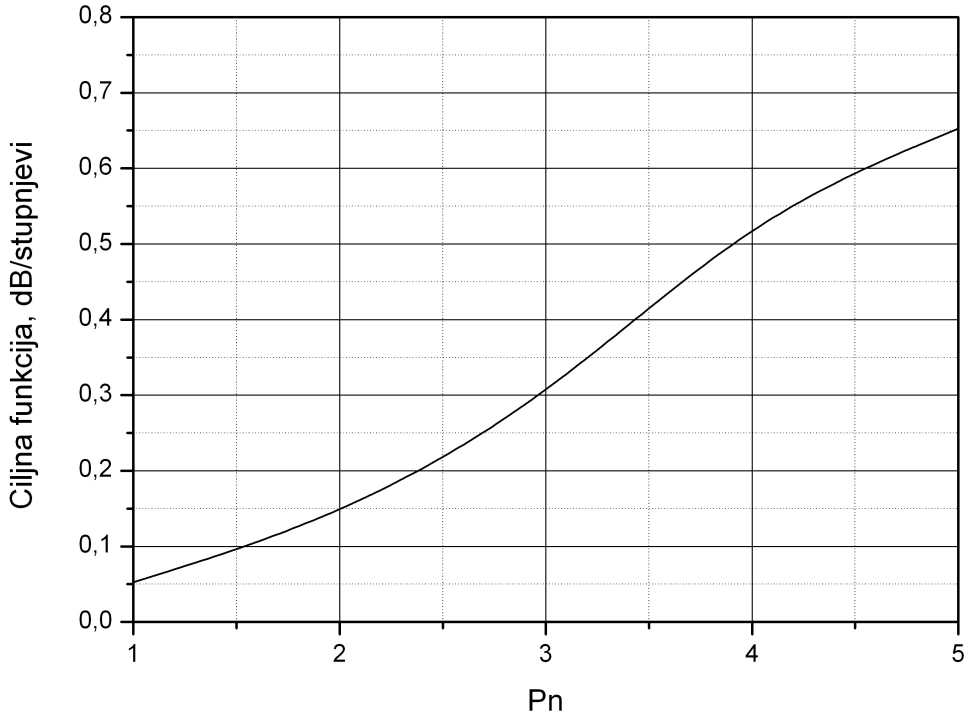


a)

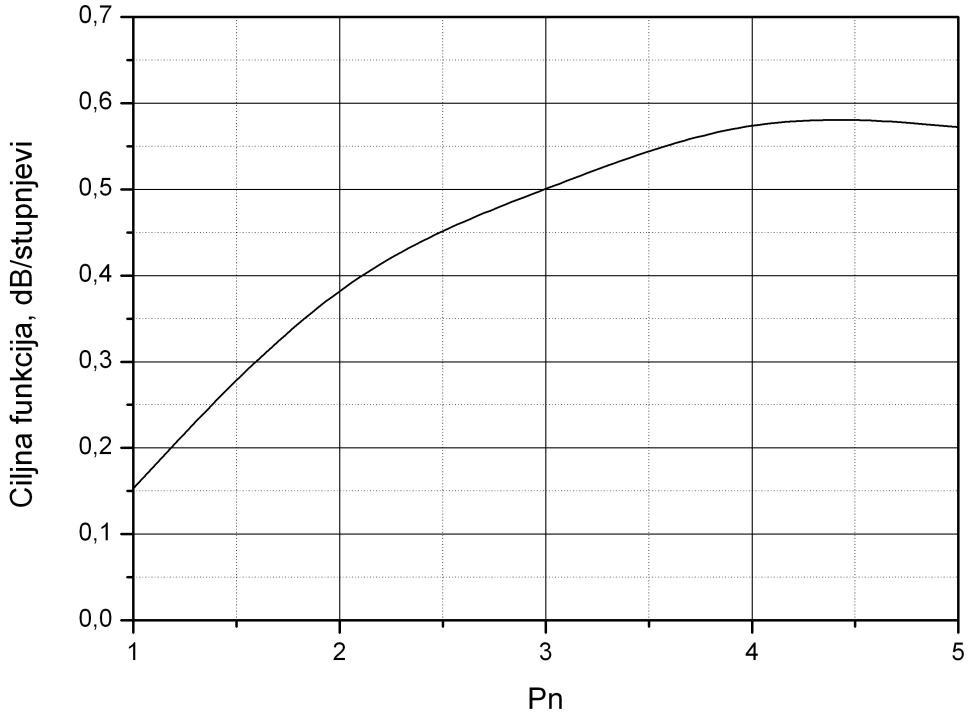


b)

Slika 5.3. Ovisnost vrijednosti ciljne funkcije CF_1 o promjeni broja elementarnih antena – broja podjela elementarnog trokuta Pn 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 Pn 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 Pn=4, a u H ravnini 0,338 dB/stupnju za Pn=3. Ipak ova vrijednost u H ravnini je vrlo bliska maksimumu za Pn = 4 u iznosu od 0,336 dB/stupnju. Ako se radijus sfere promijeni na 52,9 cm, ciljna funkcija će postići maksimalnu vrijednost za Pn=5 0,652, a u H ravnini za Pn=4 0,592 dB/stupnju.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da ciljna funkcija raste s porastom Pn, tj. s porastom broja elemenata na sferi. No, nakon određenog broja i gustoće, ciljna funkcija će postupno opadati. Vrijednost Pn za koju bi se moglo zaključiti da u većini slučajeva koji su razmatrani daje maksimalnu vrijednost ciljne funkcije jest vrijednost Pn=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 Pn kao optimalne za sve radijuse, a u daljnjim analizama i optimizacijama, vrijednost Pn=4 će pri ikosaedarskoj konfiguraciji definirati broj antena na sfernoj podlozi. Za druge konfiguracije rasporeda antena po sferi je broj antena definiran sa Pn=4 (91 antena na polusferi) orjentacijski broj antenskih elemenata.

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

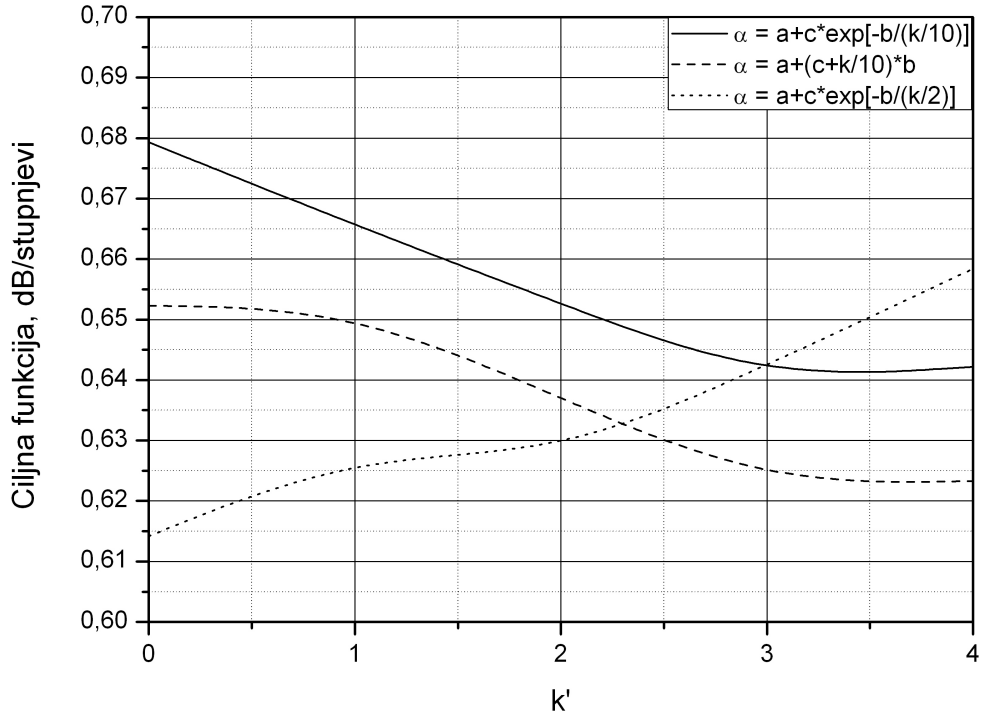
Pod pojmom rasporeda antenskih elemenata na sferi misli se na njihov međusobni položaj i ova je promjena povezana s gustoćom, pri čemu se broj elementarnih antena ne mijenja. Promjena rasporeda elemenata na sferi u ovom dijelu istraživanja ide za tim da se elementi rasporede na sfernoj podlozi neuniformno, uz zadržavanje ikosaedarske strukture za optimalan broj podjela osnovnog trokuta ikosaedra Pn=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 zraženja (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 0,4λ do 0,5λ, 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)

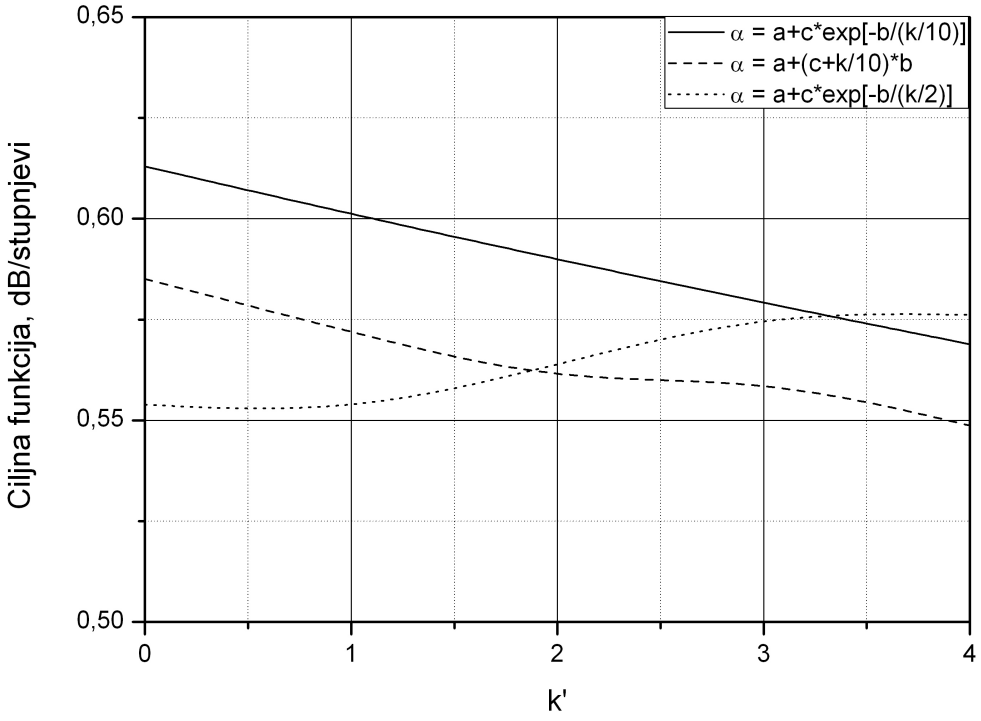
koji osigurava nepreklapanje dva antenska elementa. Selekcijski kut α od 65° osigurava obuhvaćanje svih elemenata čiji je položaj funkcijski ovisan.

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}=0,5λ.

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

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

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

gdje je:

a = -1171,17046,

c = 1229,16784,

$b \in$ [0:6],

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

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

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

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:

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

gdje je:

a = 974,45287,

c = -914,44424,

$b \in$ [0:6],

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

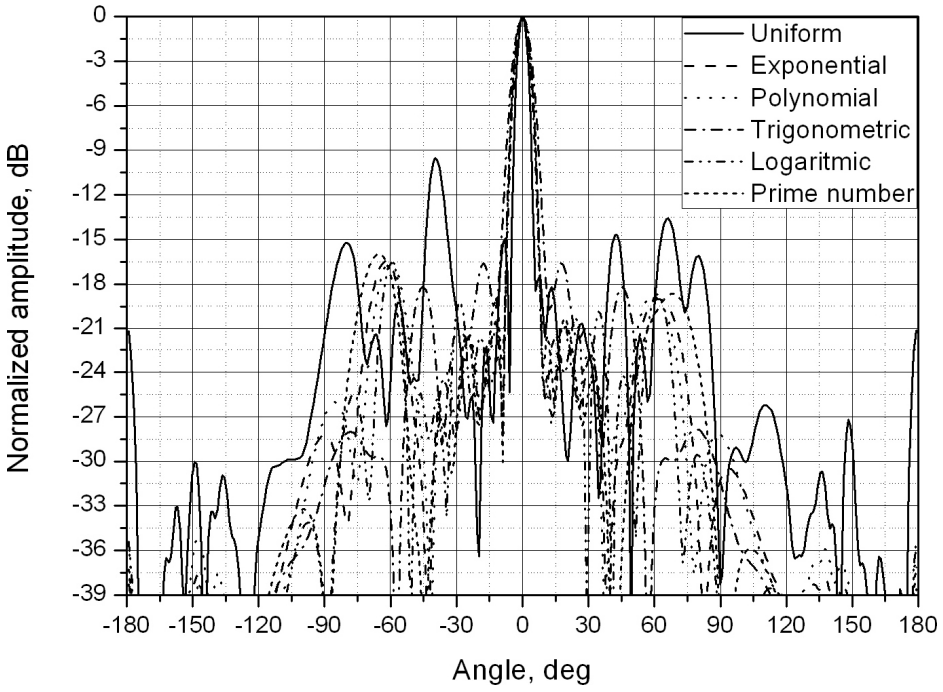
Ako se usporede jednadžbe po kojima se mijenja položaj antena i odgovarajući dijagrami, može se uočiti razlika između koeficijenata k. Na x-osi dijagrama nalaze se prilagođeni koeficijenti k' kako bi grafovi bili usporedivi. Za sva tri slučaja prilagođeni koeficijent k' predstavlja razliku između trenutne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

$$k' = k_{tren} - k_{min}. \tag{5-8}$$

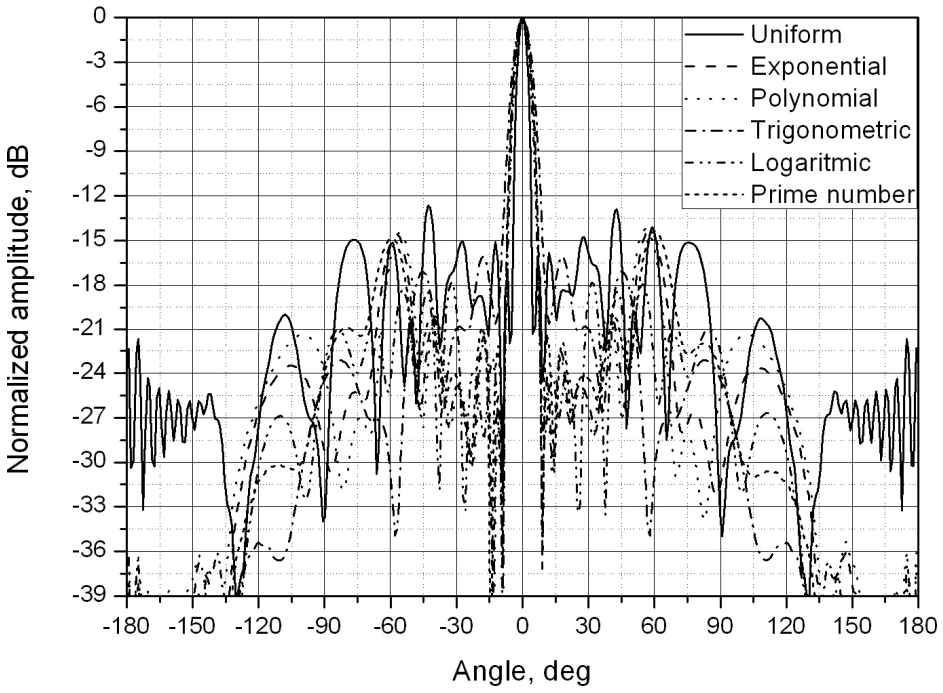
Na taj je način krivulje moguće usporediti. Sve tri funkcije različito djeluju na pomak prstenova. Granice koeficijenata definirane su očuvanjem strogog uvjeta minimalnog razmaka između dva elementa. U E ravnini, ciljna funkcija postiže svoju maksimalnu vrijednost za eksponencijalnu promjenu položaja prstena 0,679, te u H ravnini, za istu funkciju promjene 0,613 dB/stupnju. Međutim, niti jedna funkcija ne pokazuje očekivno 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 raspodređenih 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:

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

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

$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0{,}007) \rightarrow$ obrnuto eksponencijalna promjena amplitude, (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 Pn=4, elevacijski kut α može poprimiti vrijednosti 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°.

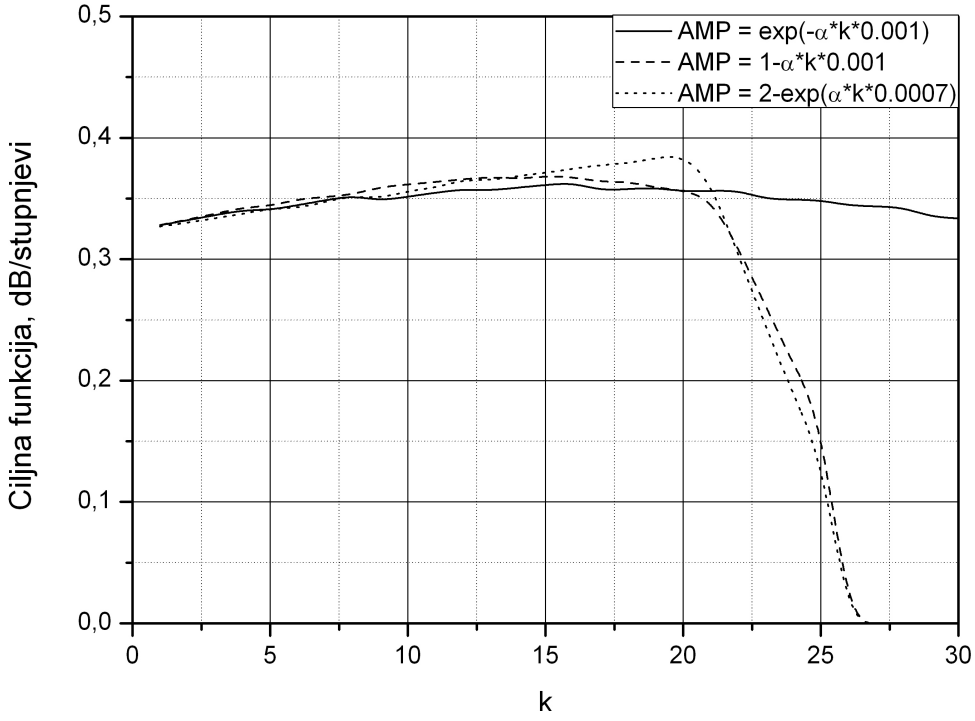
Za sve tri funkcijske ovisnosti vidljivo je da je u pitanju monotono opadajuća funkcija promjene amplitude. Važno je postaviti maksimalnu vrijednost amplitude za antenski element koji se nalazi u smjeru (ili najbliže smjeru) maksimalnog zračenja. Udaljavanjem od smjera maksimuma zračenja, amplituda opada.

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

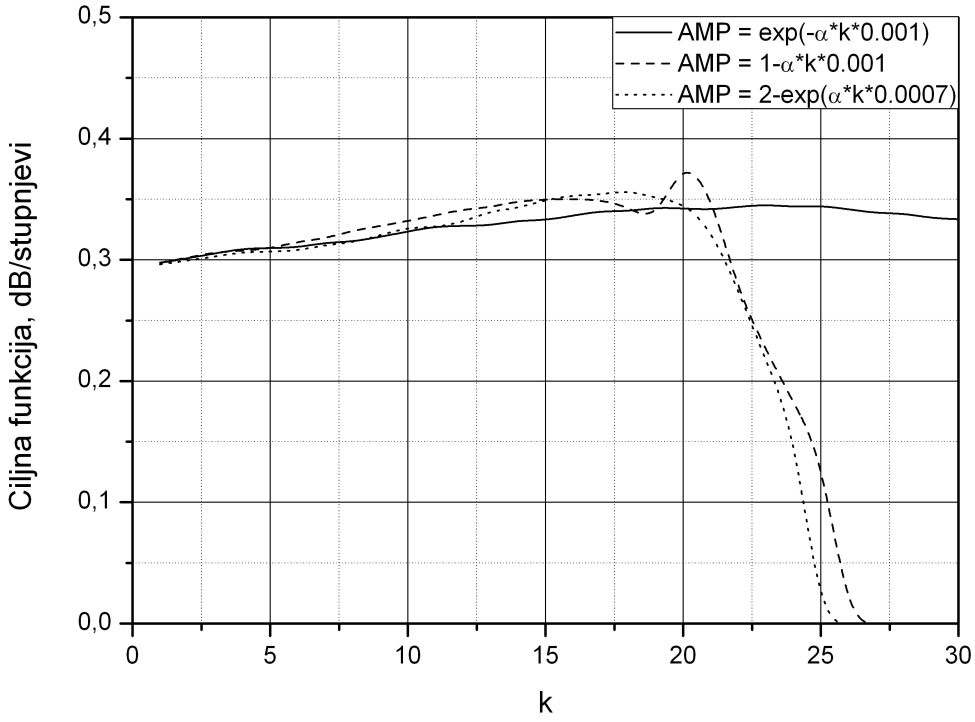
Amplituda pobude se ne mijenja za svaki od antenskih elemenata, već je promjena vezana uz elevacijski kut prstena α na kojem se nalaze antenski elementi, tako da svi antenski elementi na istom elevacijskom kutu imaju identičnu amplitudu pobude.

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 ravnini za obrnuto eksponencijalnu promjenu amplitude vrijednost ciljne iznosi 0,341 dB/stupnju za vrijednost koeficijenta 17.

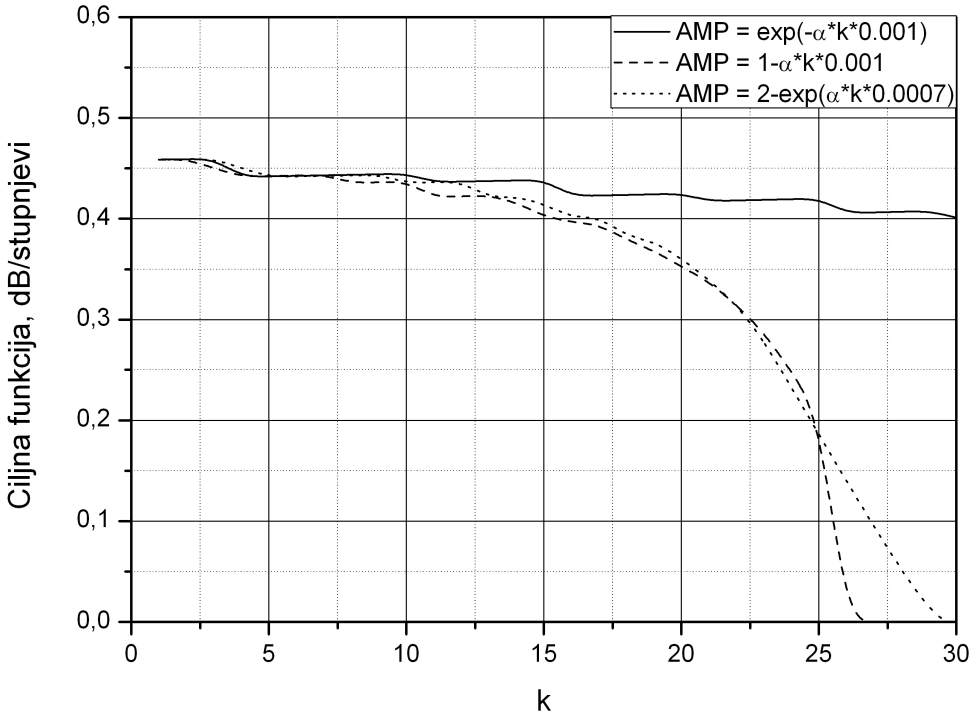


a)

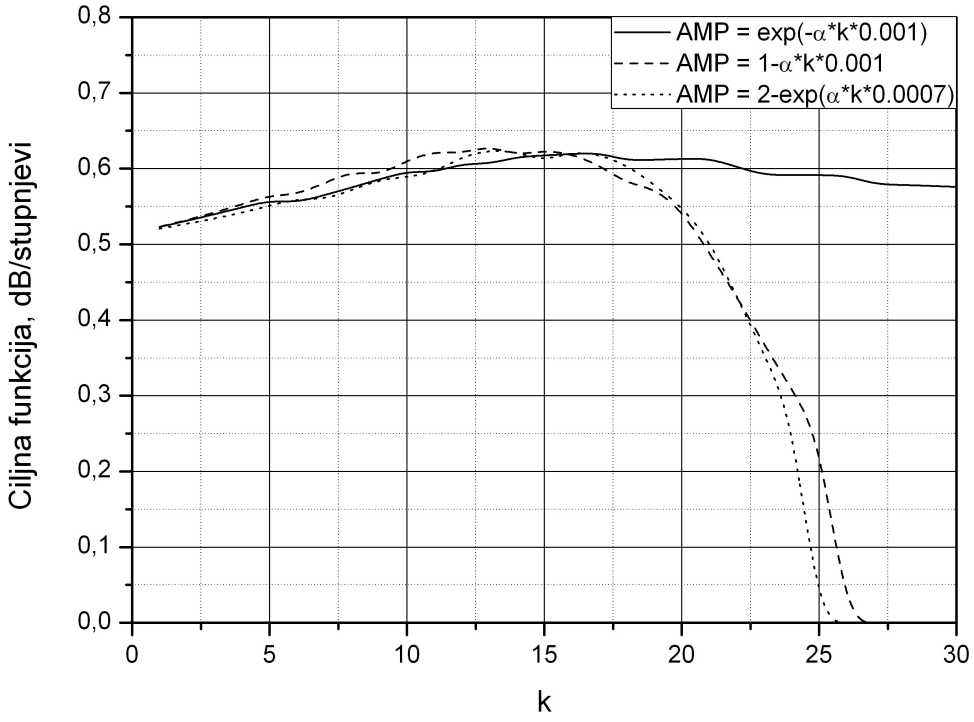


b)

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:

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

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

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

gdje je:

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

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

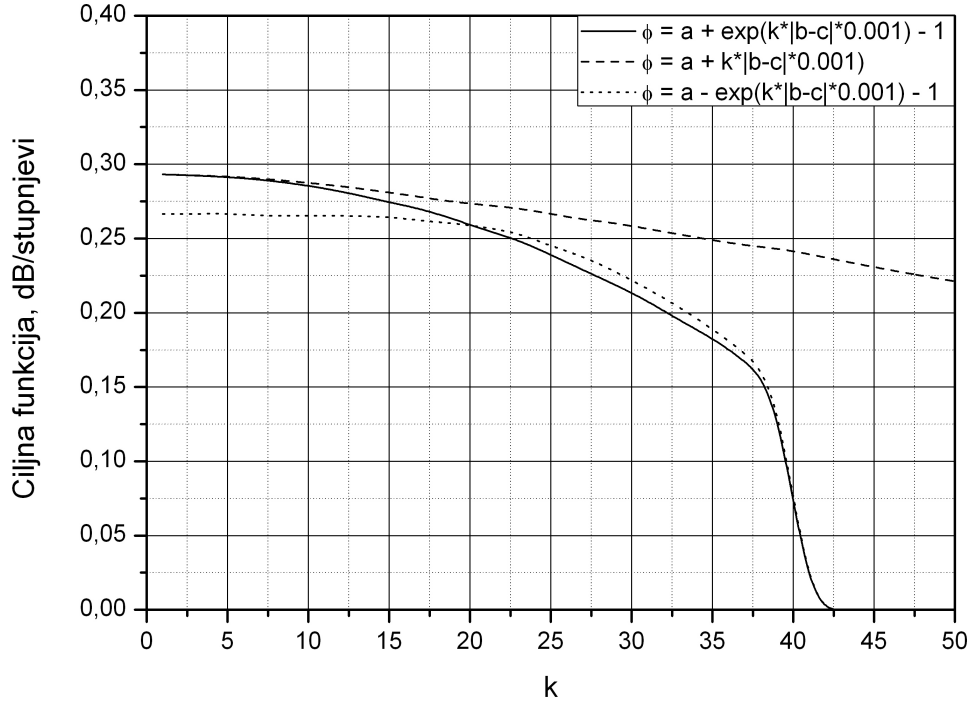
b – brojač po prstenovima elemenata, $b \in [0;c]$,

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

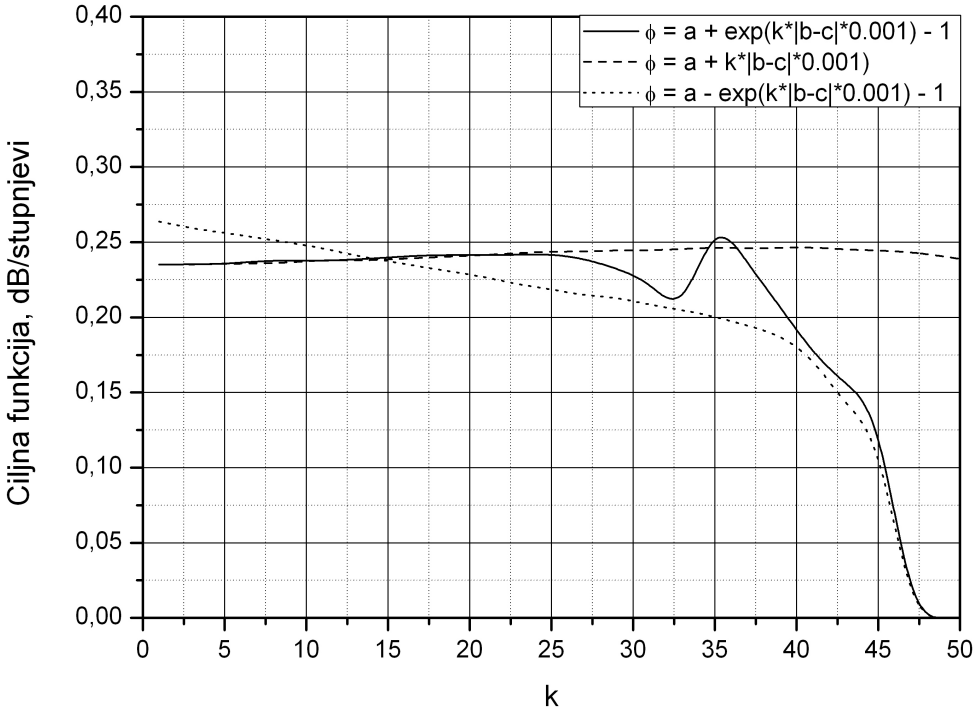
Pitanje polarizacije dosta je kompleksna stvar i iz tog razloga ispitivana je samo promjena pobude kad se polarizacija mijenja na isti način kao i amplituda, dakle po elevacijskom kutu prstena na kojem se nalaze mikrostrip antene. Promjena se odvija po monotono opadajućoj funkciji.

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.

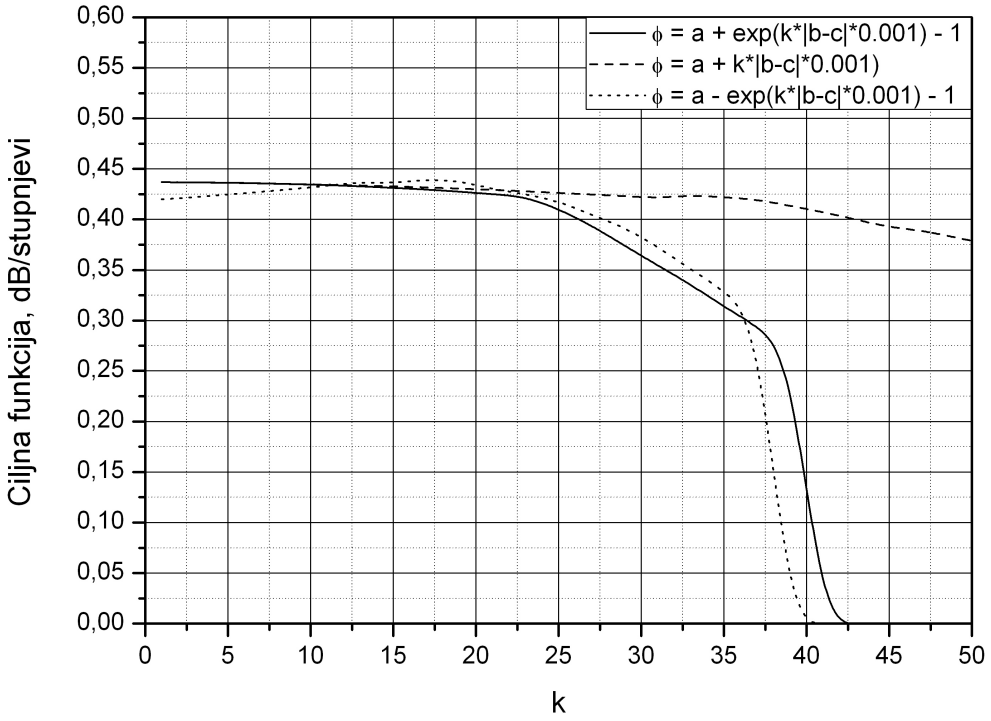


a)

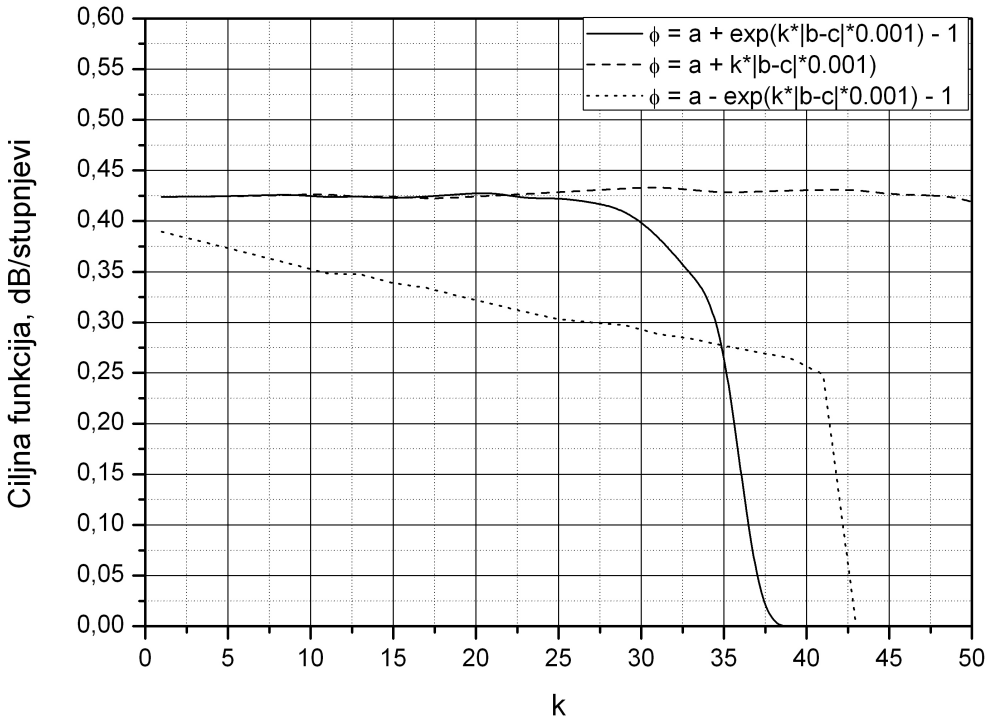


b)

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.

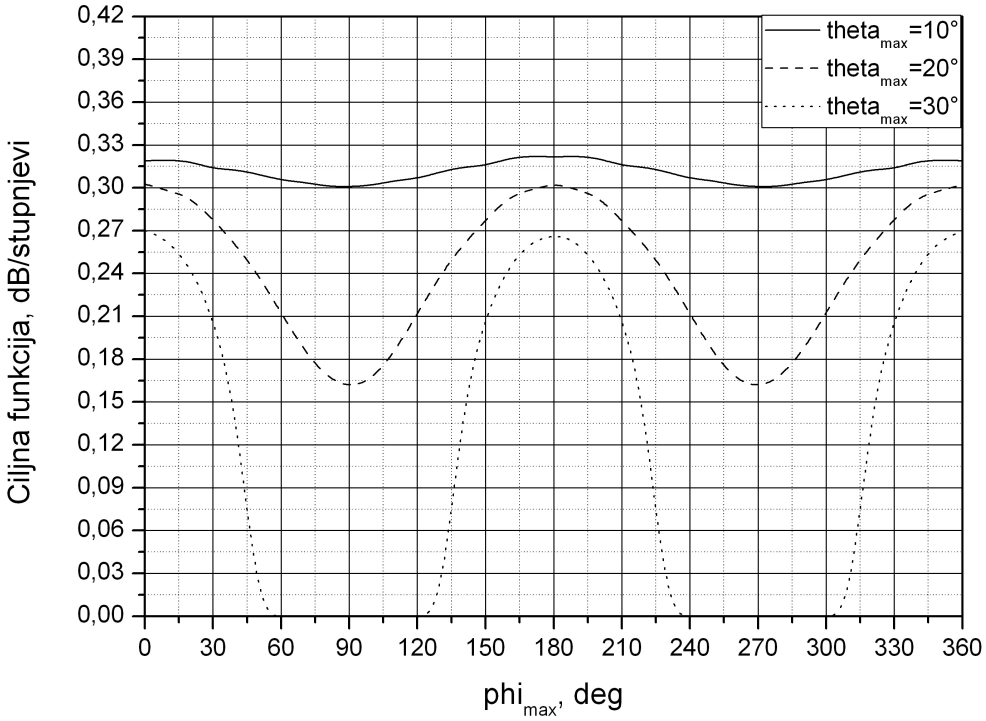
Dijagrami ovisnosti polarizacije elemenata zračenja pokazuju minimalni porast vrijednosti ciljne funkcije za eksponencijalne i obrnuto eksponencijalne promjene polarizacije po elevacijskim prestenovima, na dijelu krivulja prikazanih na slikama 5.9. b), te 5.10. a) i b). To znači da polarizacijsko oblikovanje 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**

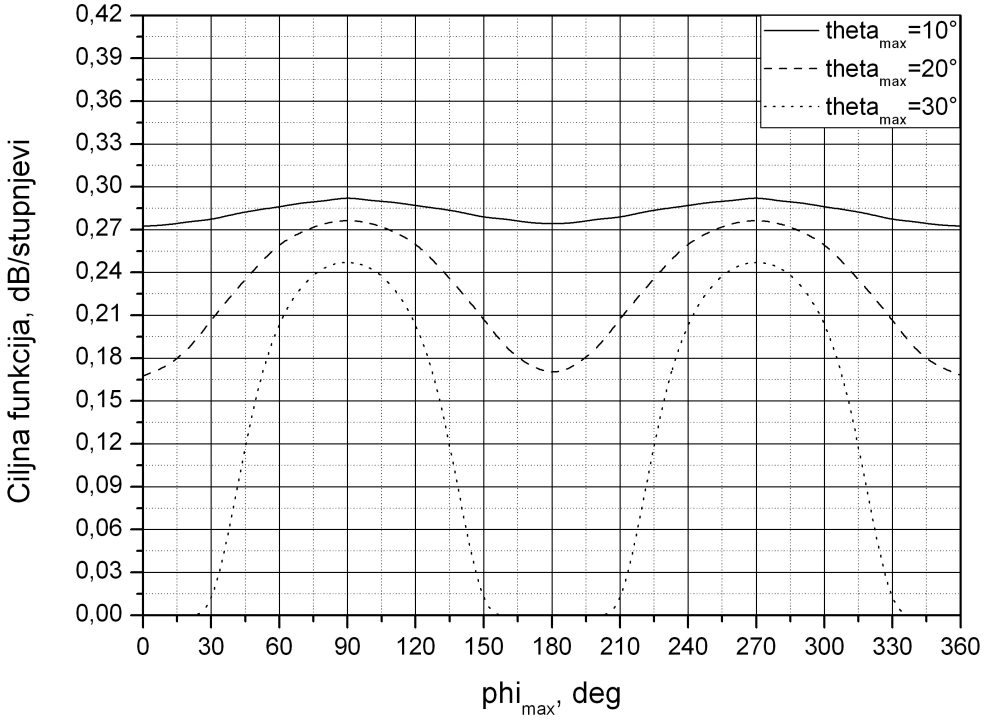
Kutevi maksimalnog zračenja ($theta_{max}$, phi_{max}) predstavljaju elevacijski i azimutalni smjer maksimalnog zračenja antenskog niza, odnosno željeni smjer maksimalnog zračenja ili smjer maksimuma glavne latice dijagrama zračenja (*eng*. main beam).

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

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

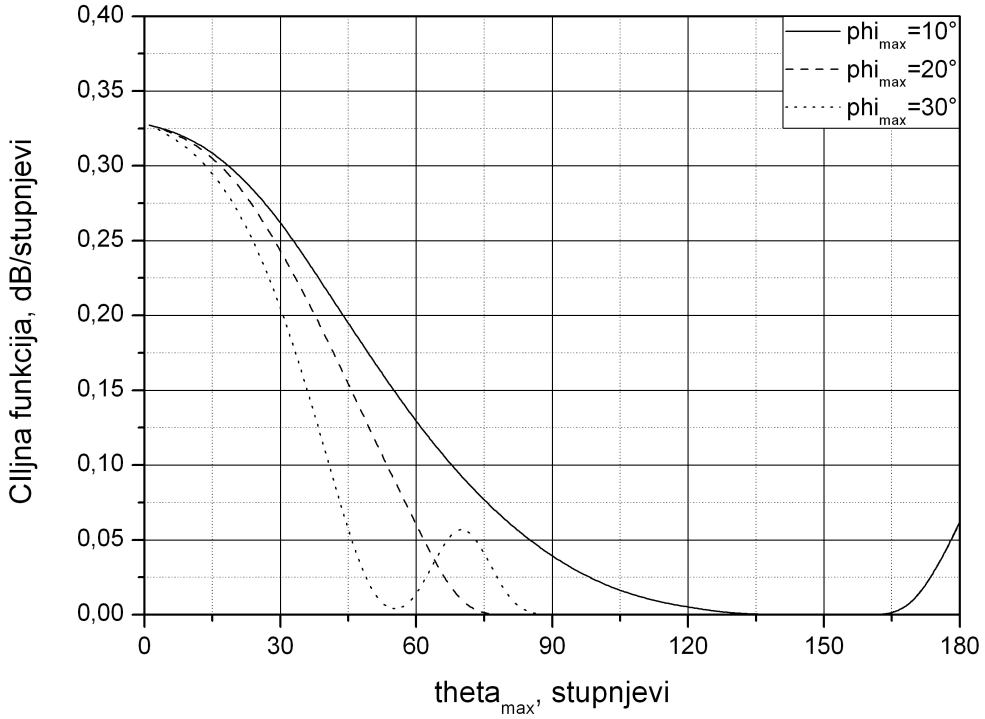


a)

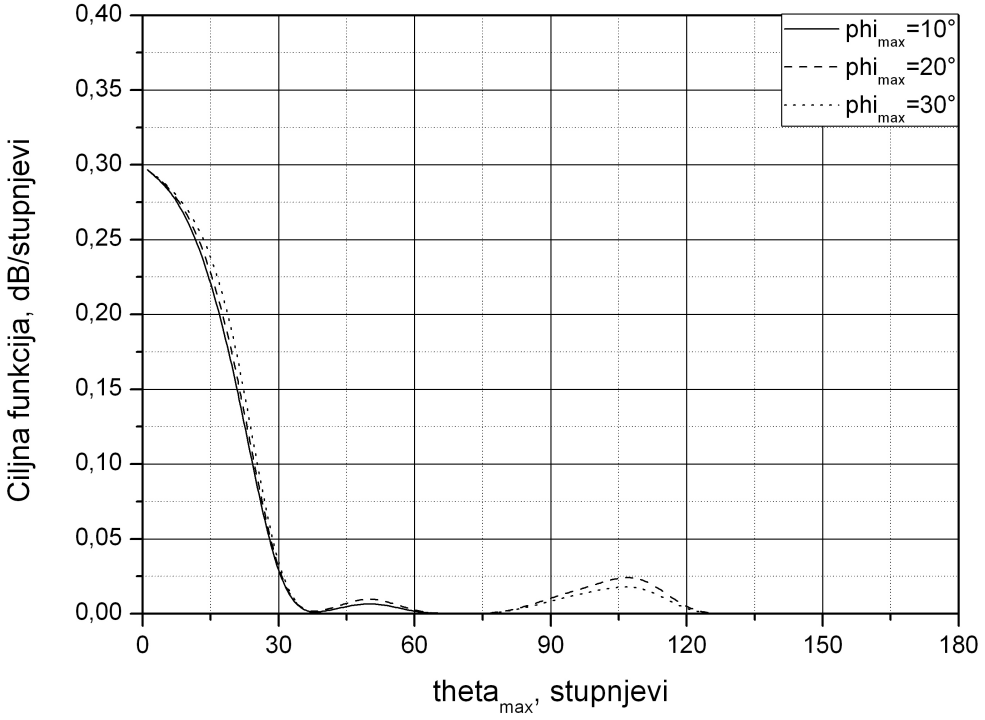


b)

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

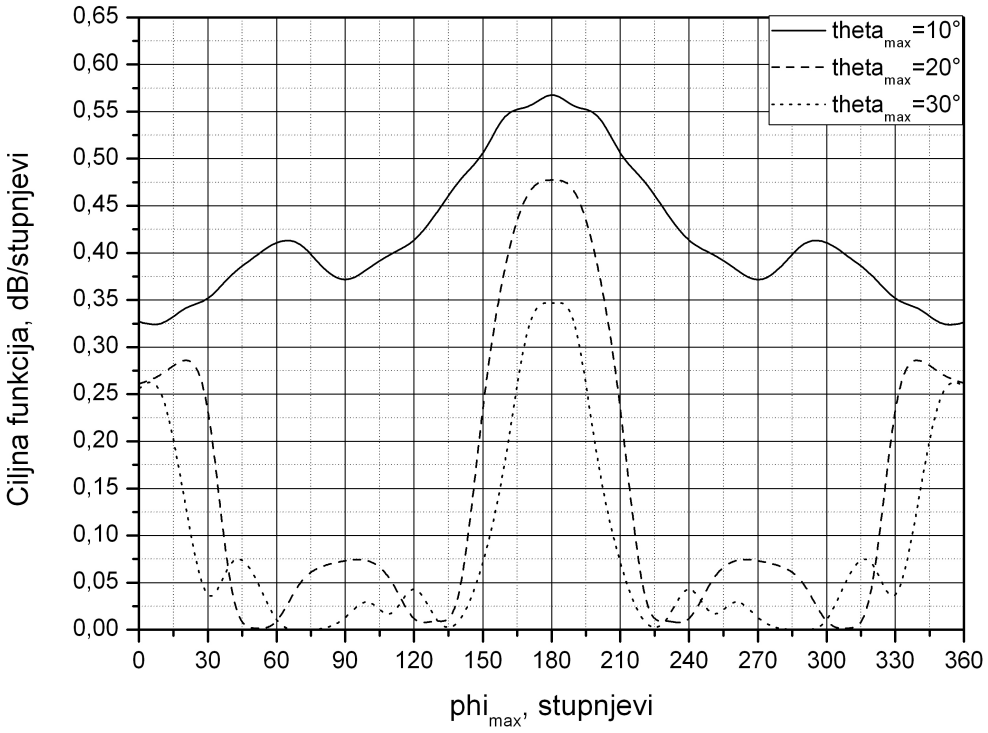


a)

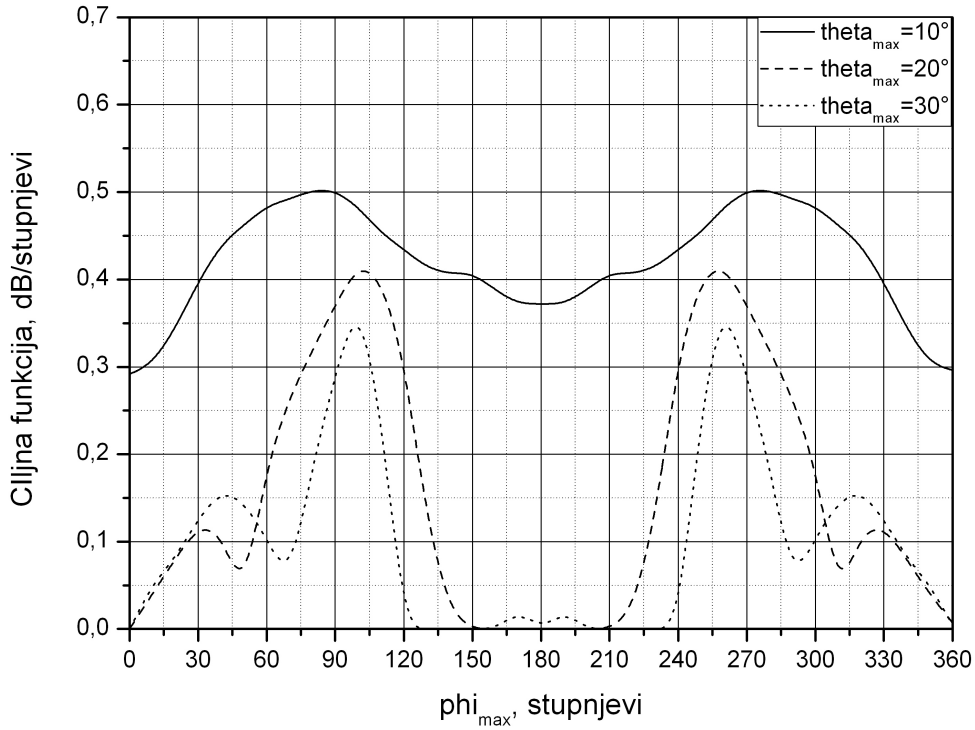


b)

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

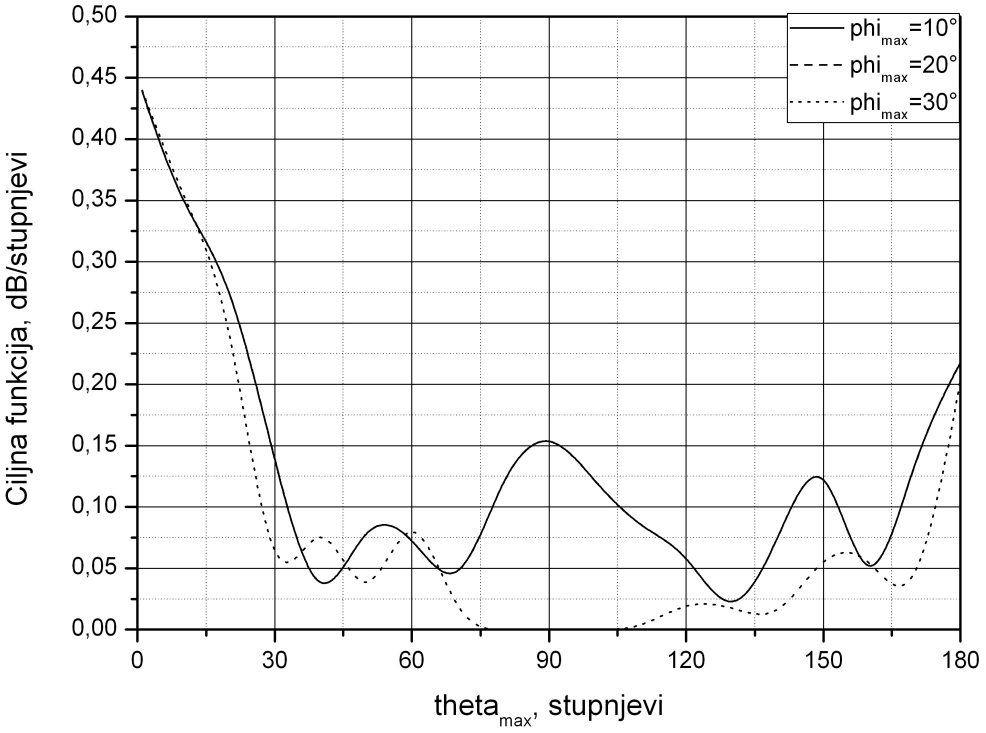


a)

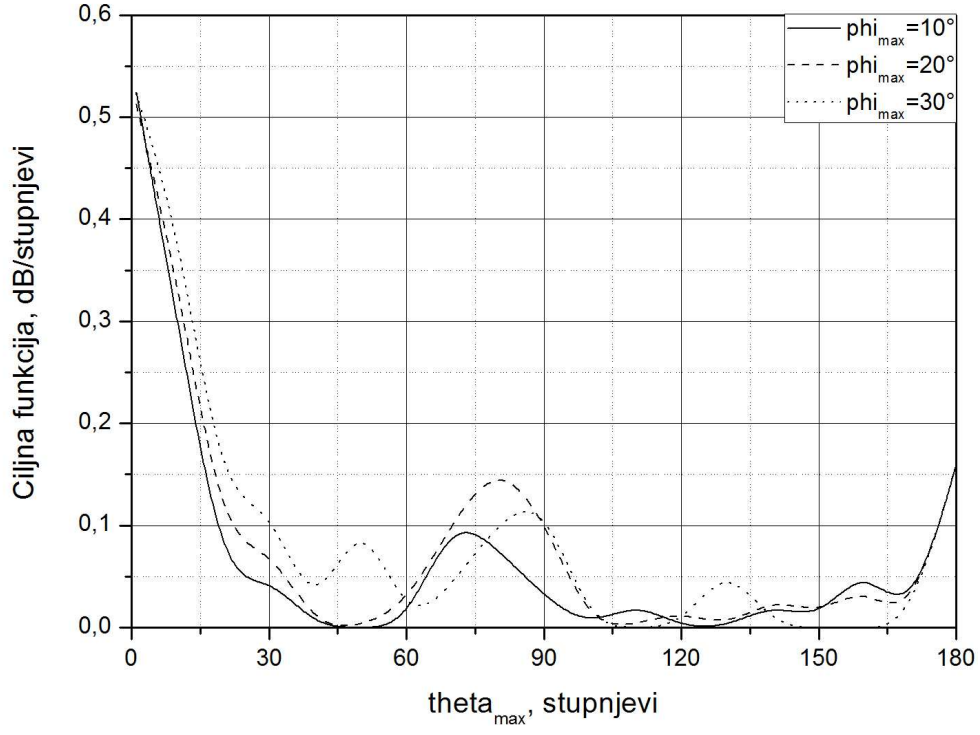


b)

Slika 5.13. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni kuta maksimalnog zračenja (phi_{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 (theta$_{max}$ 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 phi_{max} (Slika 5.10.), a $theta_{max}$ je konstantan, ciljna funkcija postiže svoj maksimum pri $theta_{max}$=10°, na phi_{max}= 0° i phi_{max}=180°. 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° i phi_{max}=270° 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 ($theta_{max}$) unutar opsega 0:180° uz radijus sfere od 30cm, rezultati simulacije pokazuju da je maksimalna vrijednost ciljne funkcije 0,327 pri $theta_{max}$=0° u sva tri slučaja phi_{max}=10°, phi_{max}=20° i phi_{max}=30° (E - ravnina). Za H – ravninu, ciljna funkcija poprima vrijednost 0,297 dB/stupnju na phi_{max}=10°.

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

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

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.

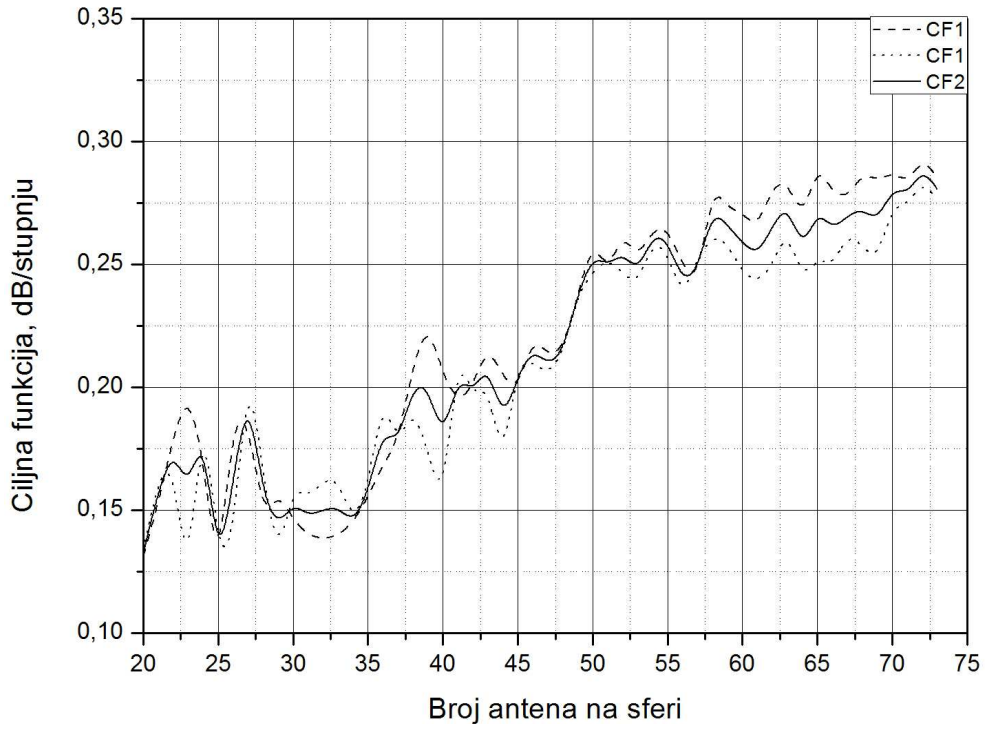
Postavke simulacije svakog od nabrojanih slučajeva spiralne konfiguracije:

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

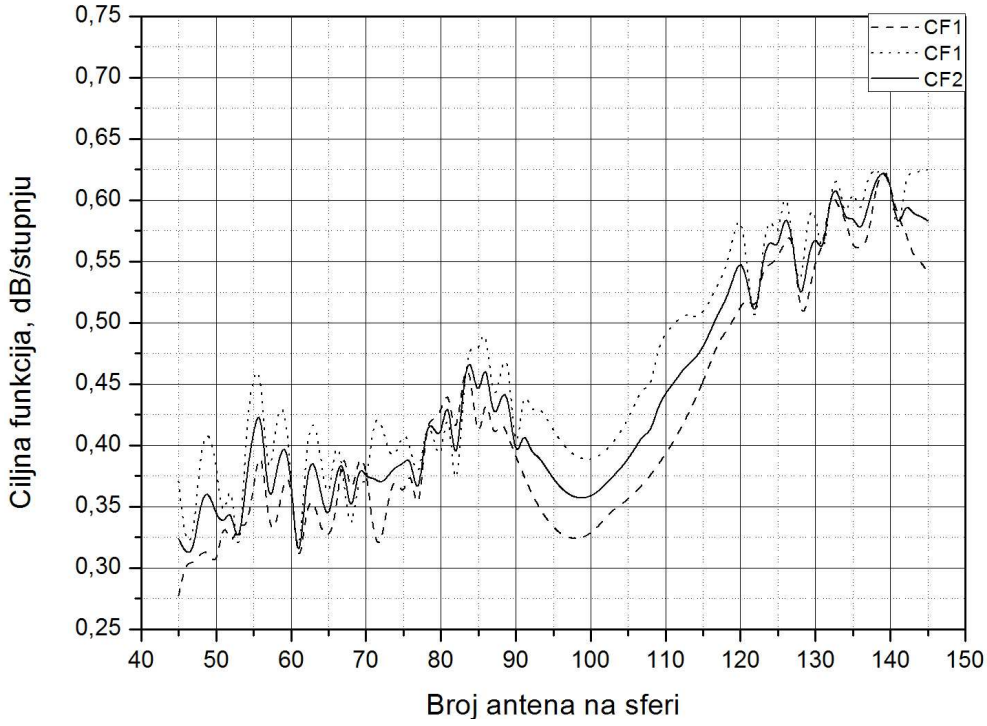
podrazumijeva 31 odabranu antenu (72 ukupno antene na sferi radijusa 30 cm i i 139 ukupno antena na sferi radijusa 52,9 cm) za optimizaciju dijagrama zračenja po parametrima pobude;
- frekvencija pobude je 1,7 GHz i osigurava jednomodni režim rada.

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 latice i snižavanja vrijednosti bočnih latica, 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**

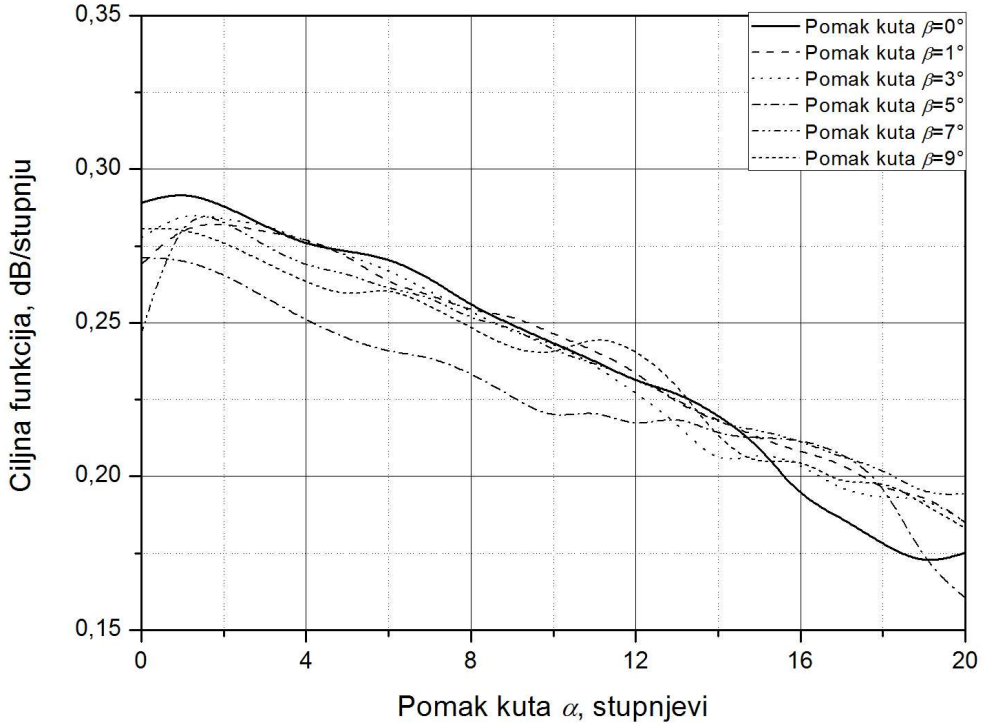
Pod pojmom promjene elevacijskog i azimutalnog kuta misli se na α i β promjenu položaja antene na sferi. Pošto se antena 'fizički' pomicala, program je računao minimalnu udaljenost dva elementa, a kretala se u granicama između $0{,}4\lambda$ i $0{,}5\lambda$ te se na taj način poštovao uvjet za ograničenje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

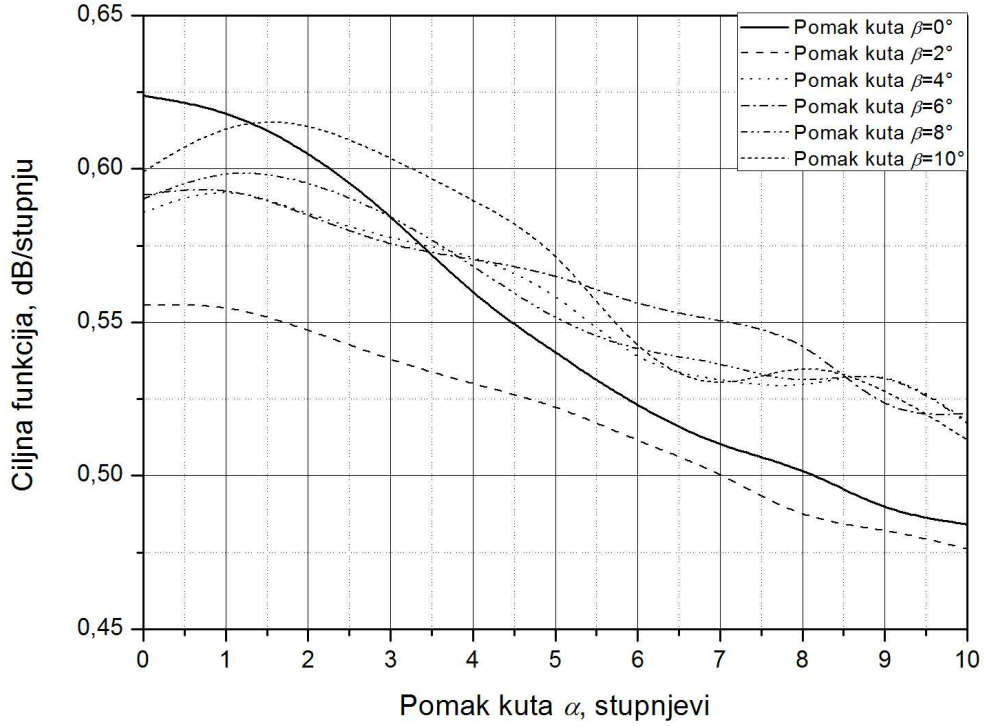
Ako je radijus sfere 30 cm, izvorni položaj antena dan algoritmom prema [41] nije optimalna konfiguracija. Istraživanja su pokazala da je maksimalna vrijednost ciljne funkcije postignuta za pomak elevacijskog α=1° i azimutalnog kuta β=0°, a njena vrijednost iznosi 0,293 dB/stupnju.

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)



b)

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

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

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

gdje je:

$b \in$ [0: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

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

gdje je:

$b \in$ [0: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

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

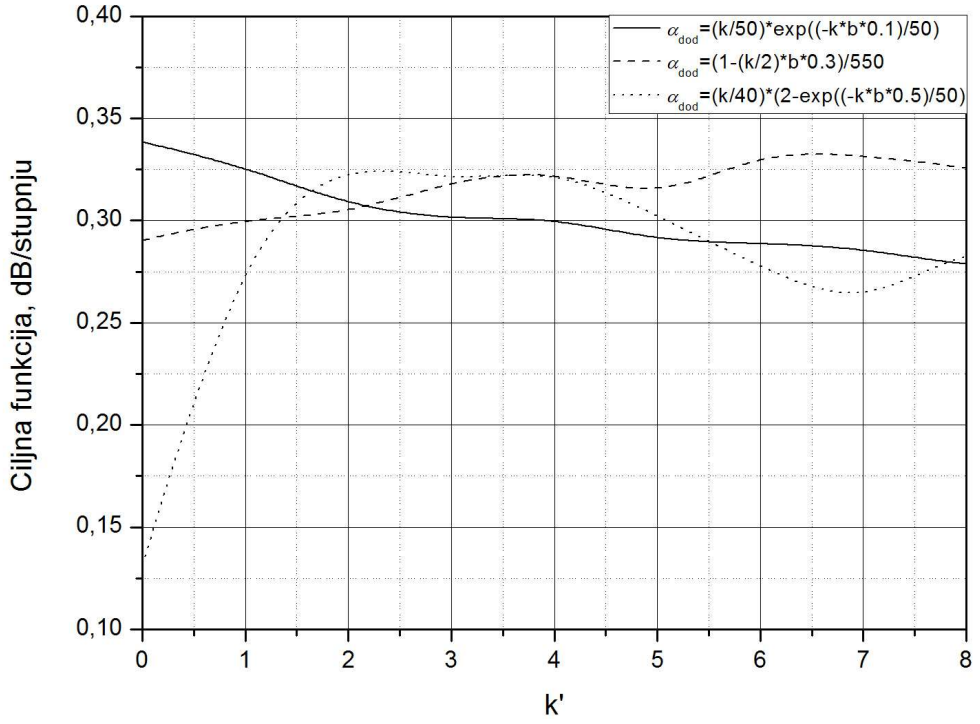
gdje je:

$b \in$ [0:broj antena],

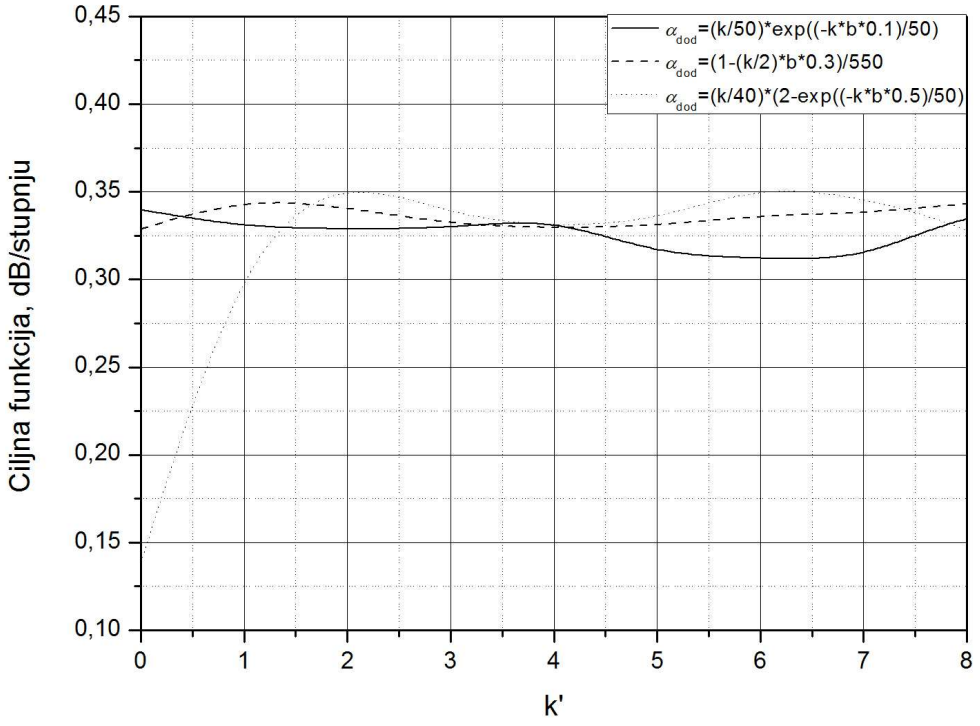
k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in$ [-4:10] za r_s=30 cm i $k \in$ [-1:10] za r_s=52,9 cm.

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, $k' = k_{tren}-k_{min}$. 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_{min}=0,4λ, a na slici 5.18. za sferu radijusa 52,9 cm s minimalnim razmakom elemenata d_{min}=0,5λ.

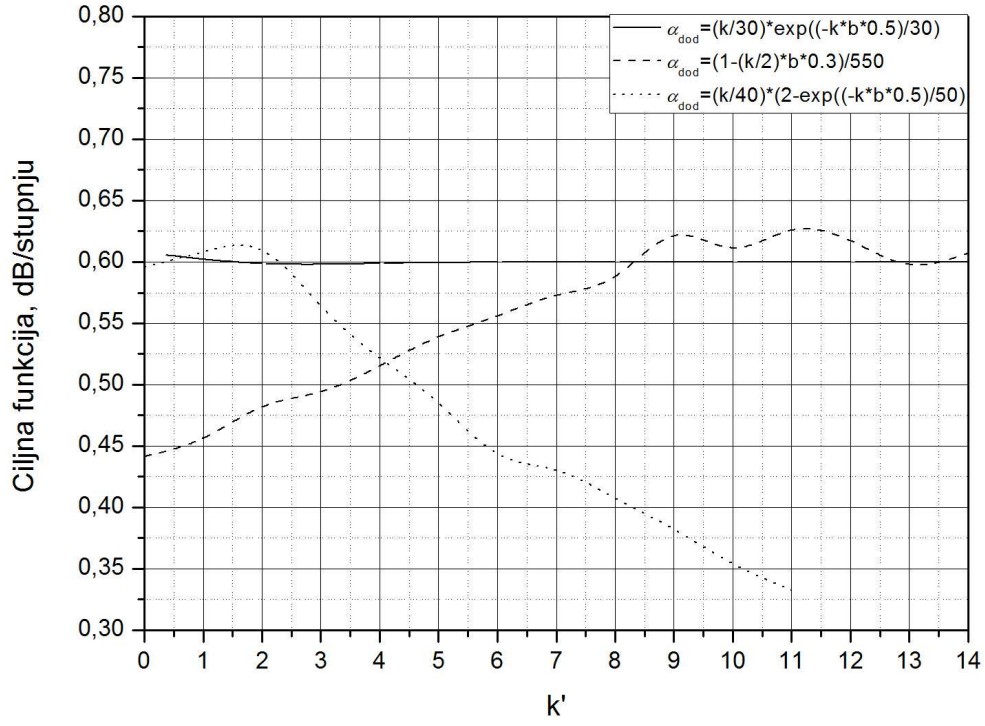


a)

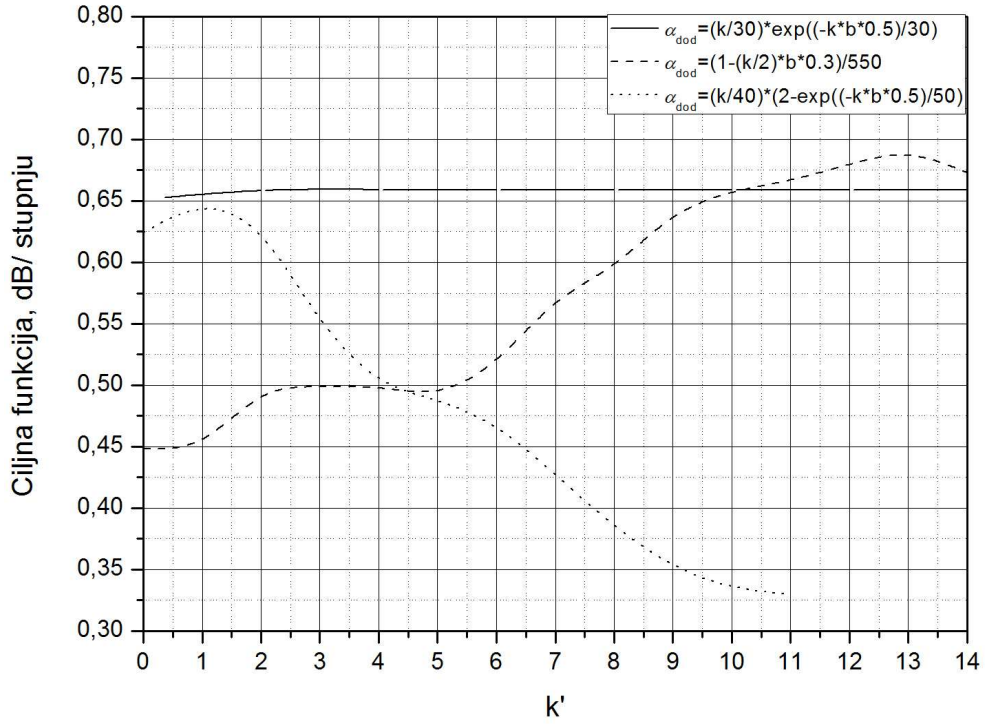


b)

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}=0,4λ.



a)



b)

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}=0,5λ.

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:

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

→ eksponencijalna promjena amplitude;

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

→ linearna promjena amplitude;

$AMP = 2-\exp(\alpha\cdot k\cdot 0.0007)$ za oba radijusa sfere (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),

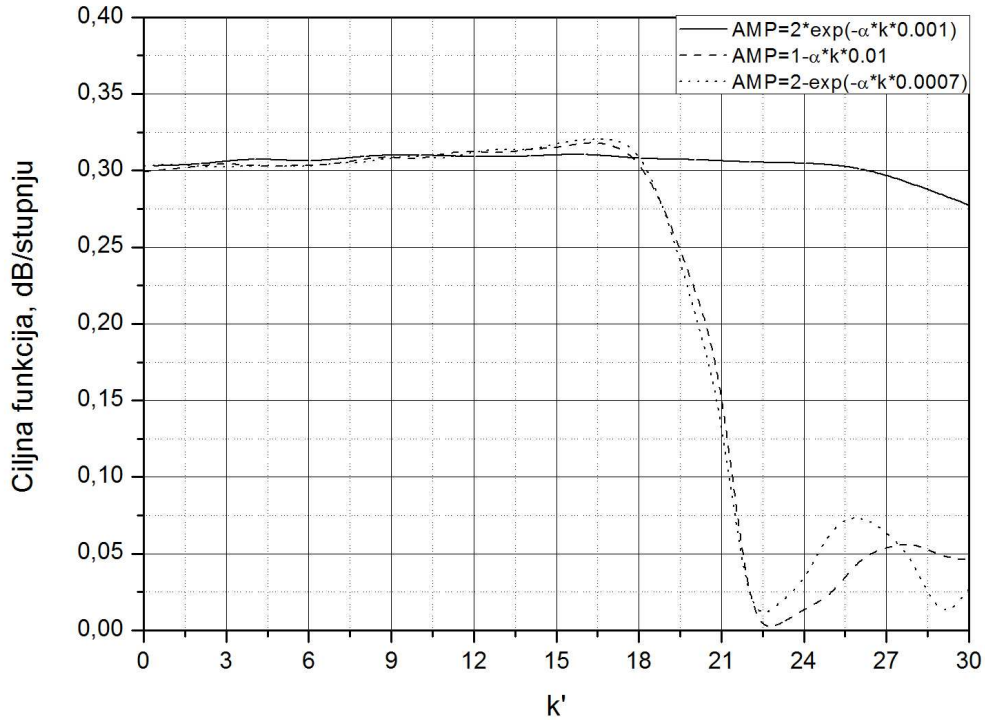
α – elevacijski kut prstena na kojemu je smješten antenski element.

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°.

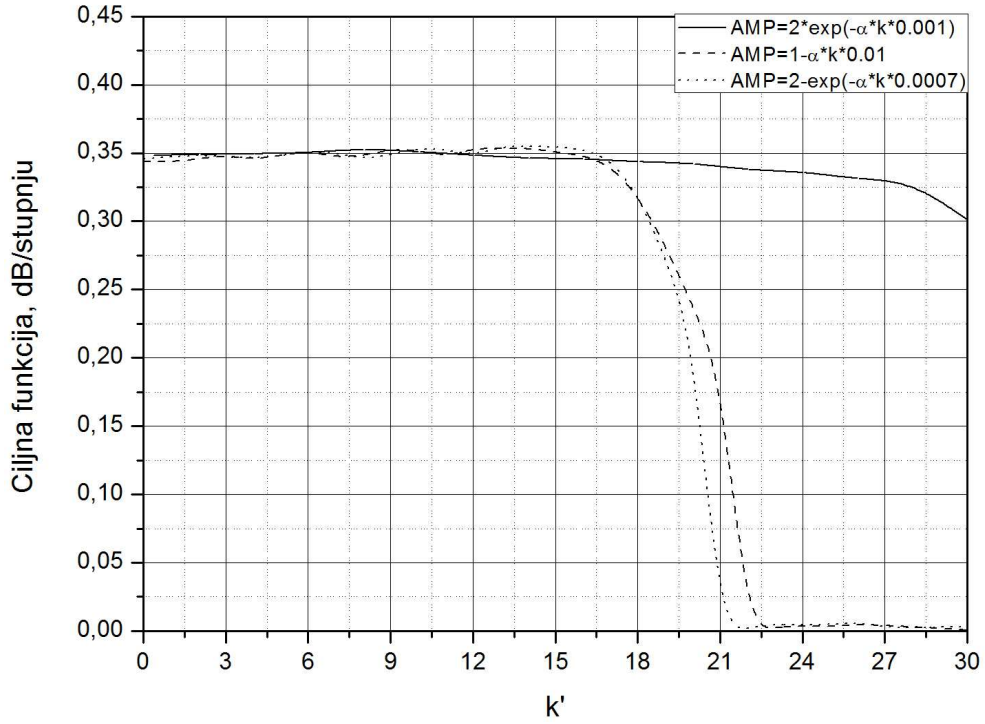
Za r_s = 52,9 cm, α poprima vrijednosti: 55,58261°, 54,56984°, 53,54417°, 52,50475°, 51,45066°, 50,38087°, 49,29429°, 48,18969°, 47,06569°, 45,92079°, 44,75329°, 43,56128°, 42,34261°, 41,09479°, 39,81500°, 38,49995°, 37,14580°, 35,74802°, 34,30115°, 32,79861°, 31,23226°, 29,59185°, 27,86418°, 26,03178°,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

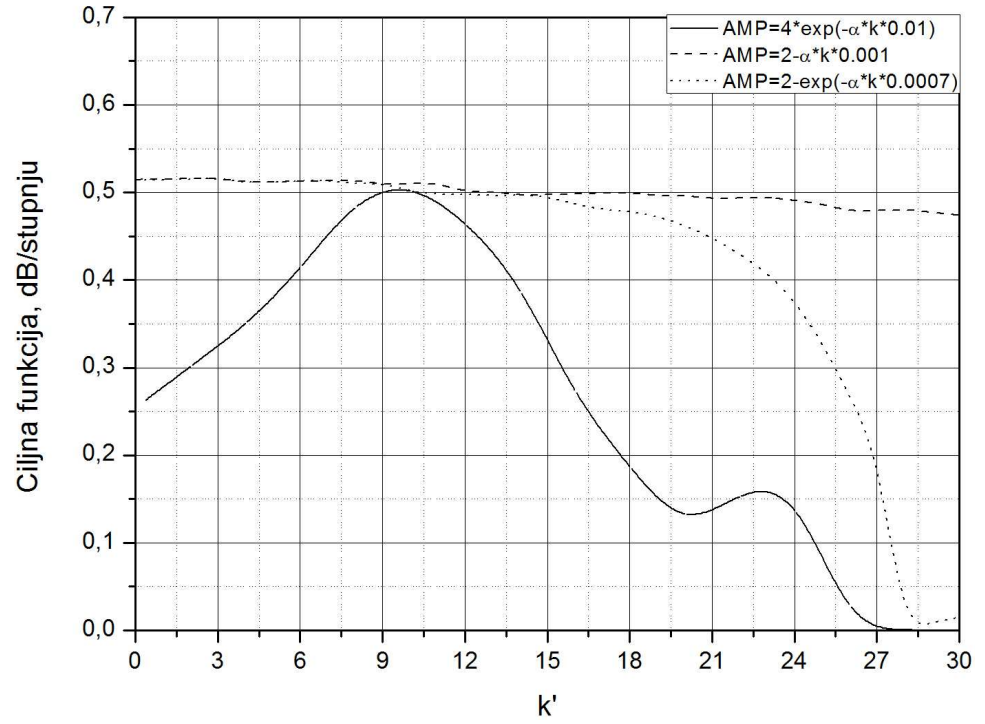


a)

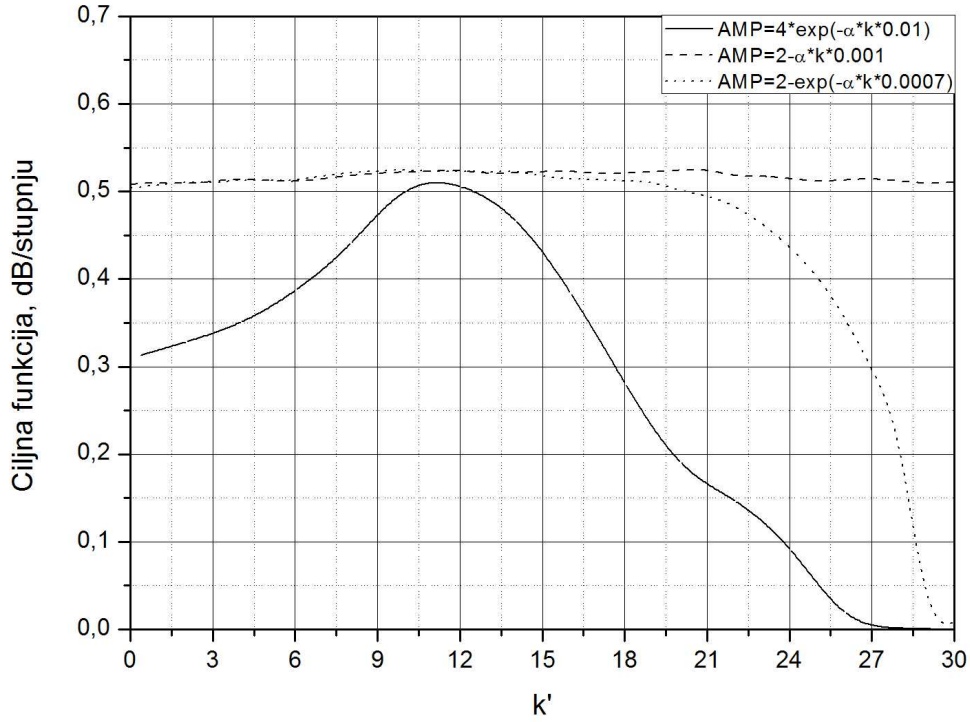


b)

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:

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

→ eksponencijalna promjena polarizacije;

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

→ linearna promjena polarizacije;

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

→ obrnuto eksponencijalna promjena polarizacije,

gdje je:

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

b – brojač po elemenata, $b \in [0{:}c]$,

c – ukupni broj elemenata i

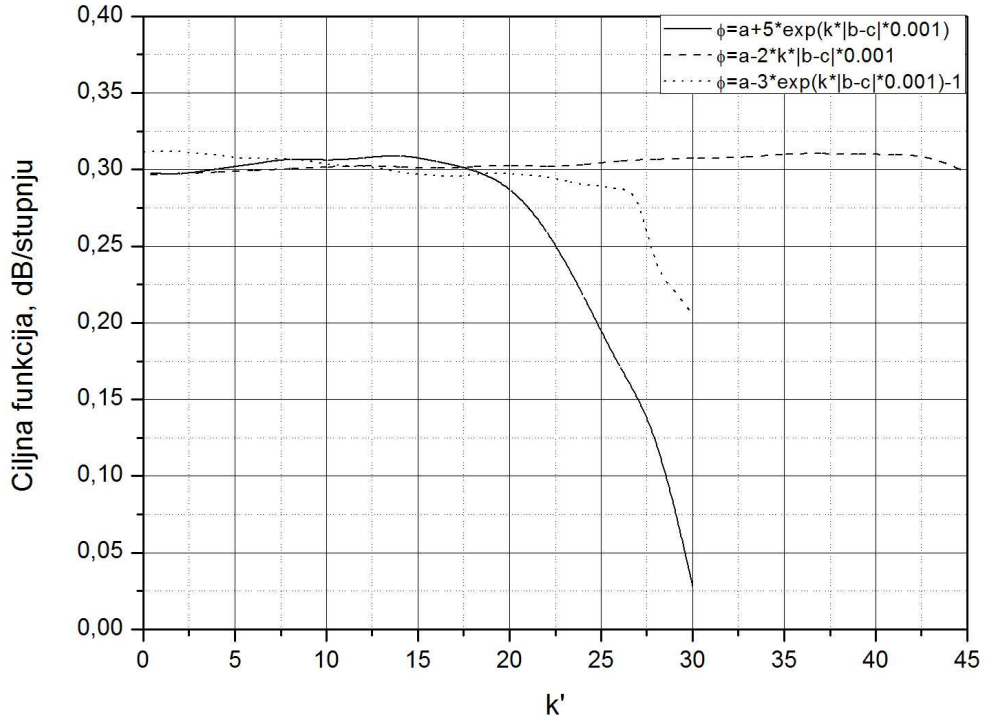
k - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda:

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

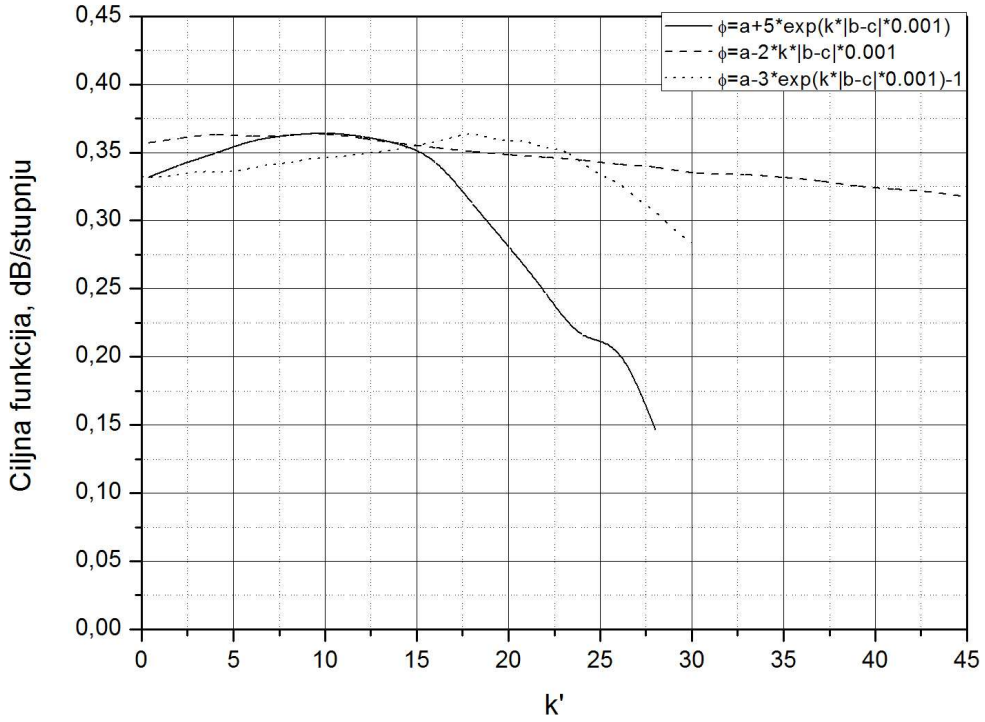
$k \in$ [-20:26] za r_s=30 cm i $k \in$ [-12:12] za r_s=52,9 cm (linearna promjena polarizacije)

$k \in$ [-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.



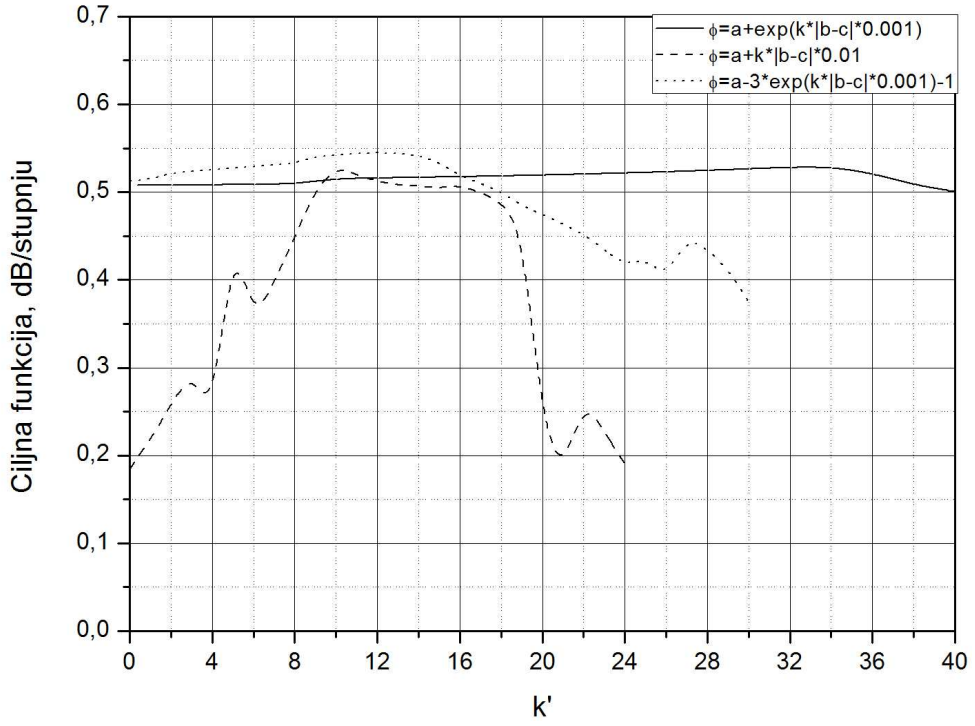
a)



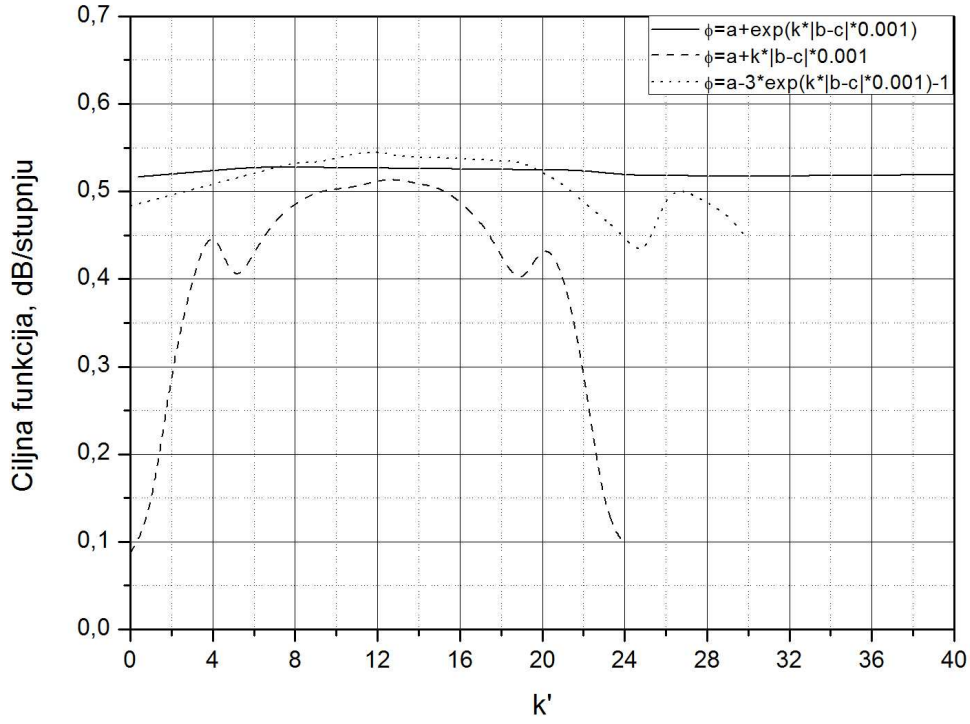
b)

Slika 5.21. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije:

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



a)



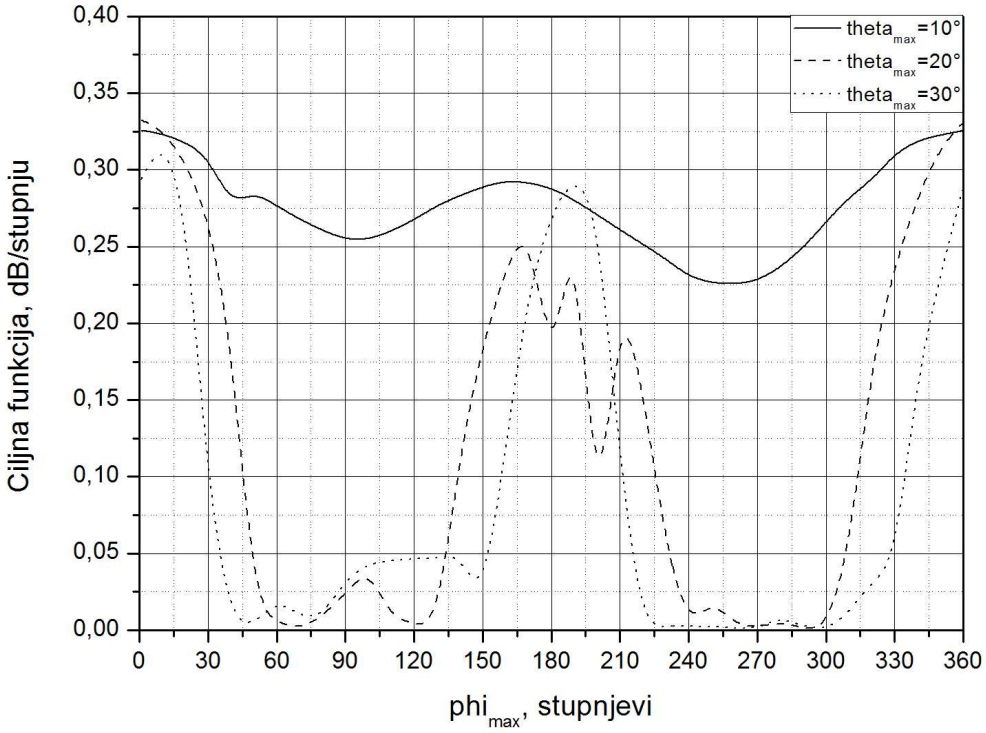
b)

Slika 5.22. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni polarizacije:
a) E – ravnina, b) H – ravnina za r_s = 52,9 cm.

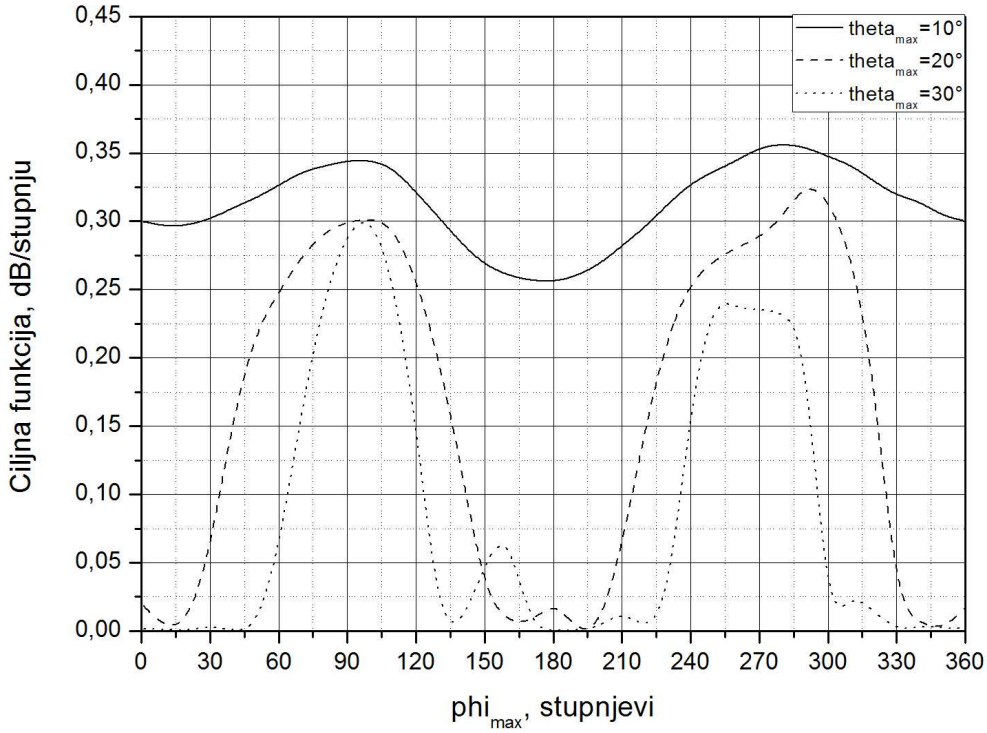
Iz dijagrama na slikama 5.21. i 5.22. vidljivo je da ciljna funkcija raste pri povećanju koeficijenta *k*' do određene vrijednosti na kojoj postiže svoj maksimum, a nakon toga opada. Paramerar *k*', pri radijusu sfere od 30 cm, mijenja se u opsegu [0:45]. Za sferu radijusa 30 cm, u E ravnini maksimum 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 (phi_{max}) promjenjiv u svojim granicama 0:360°, a elevacijski kut ($theta_{max}$) je postavljen na svoju vrijednost i konstantan je za tu iteraciju. U sljedećem slučaju, elevacijski kut ($theta_{max}$) mijenja se od 0:180°, dok je azimutalni kut (phi_{max}) konstantan.

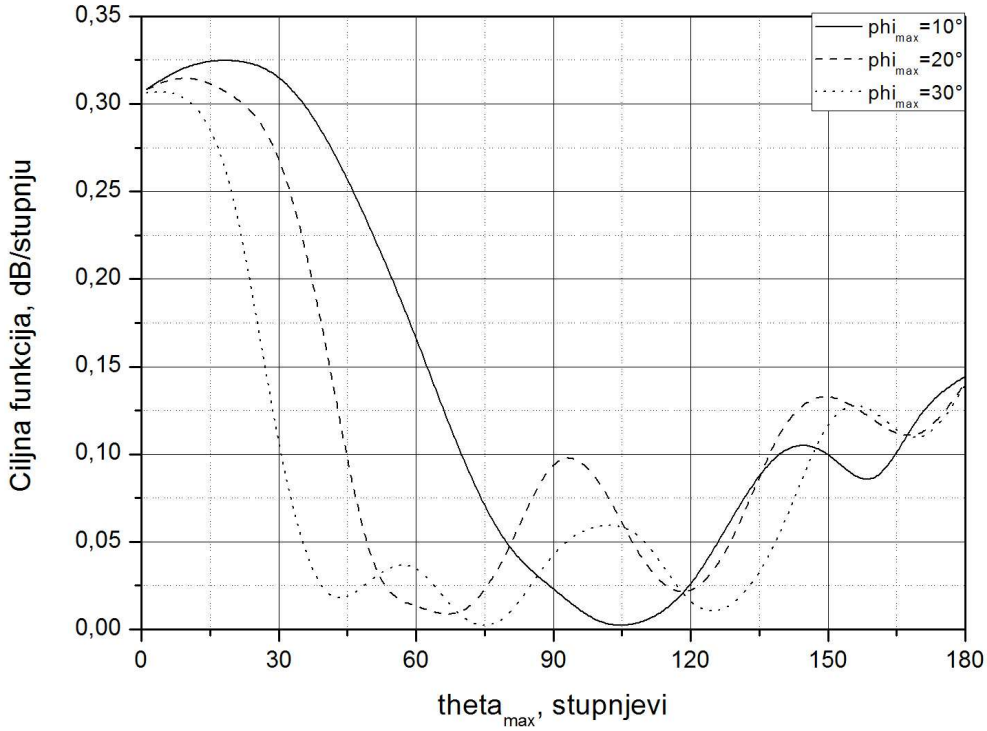


a)

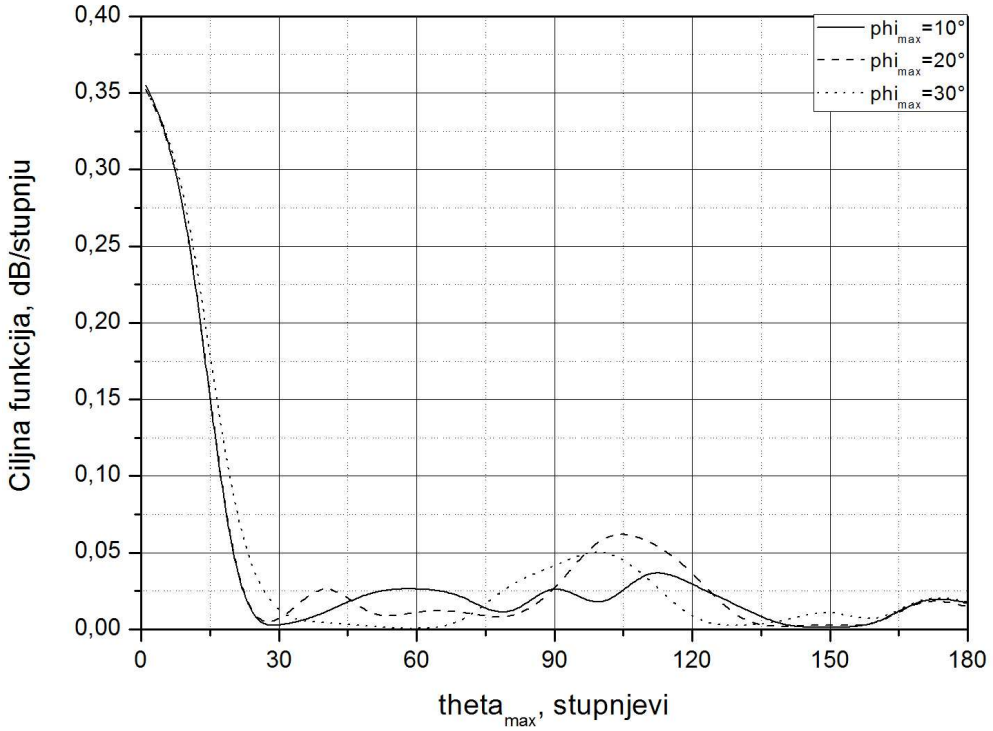


b)

Slika 5.23. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja:
a) E – ravnina, b) H – ravnina za r_s = 30 cm.

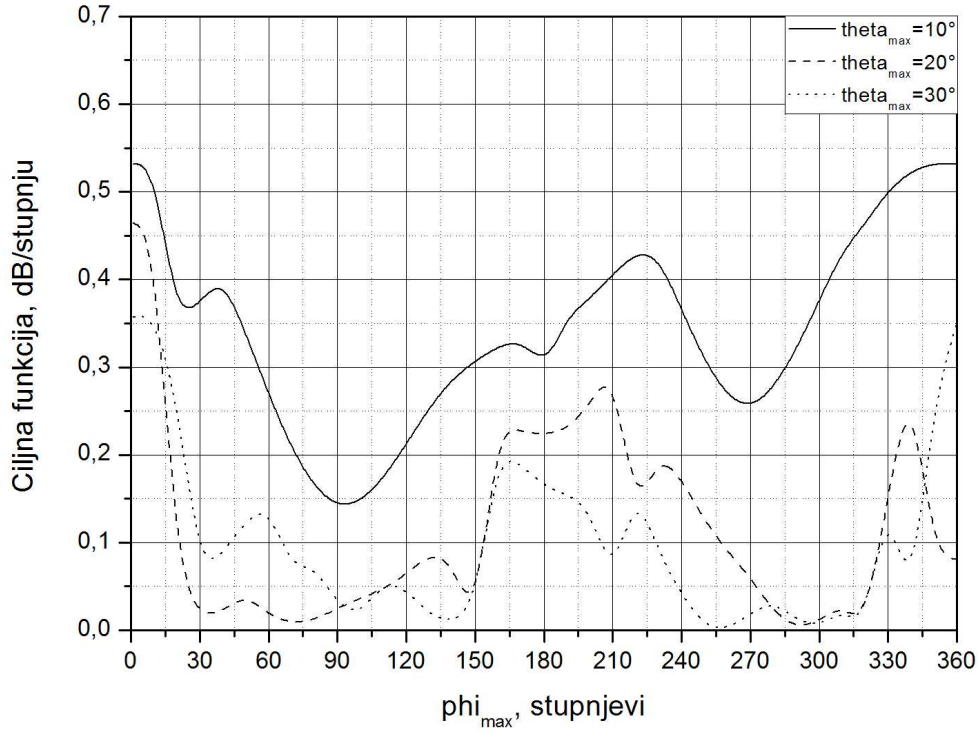


a)

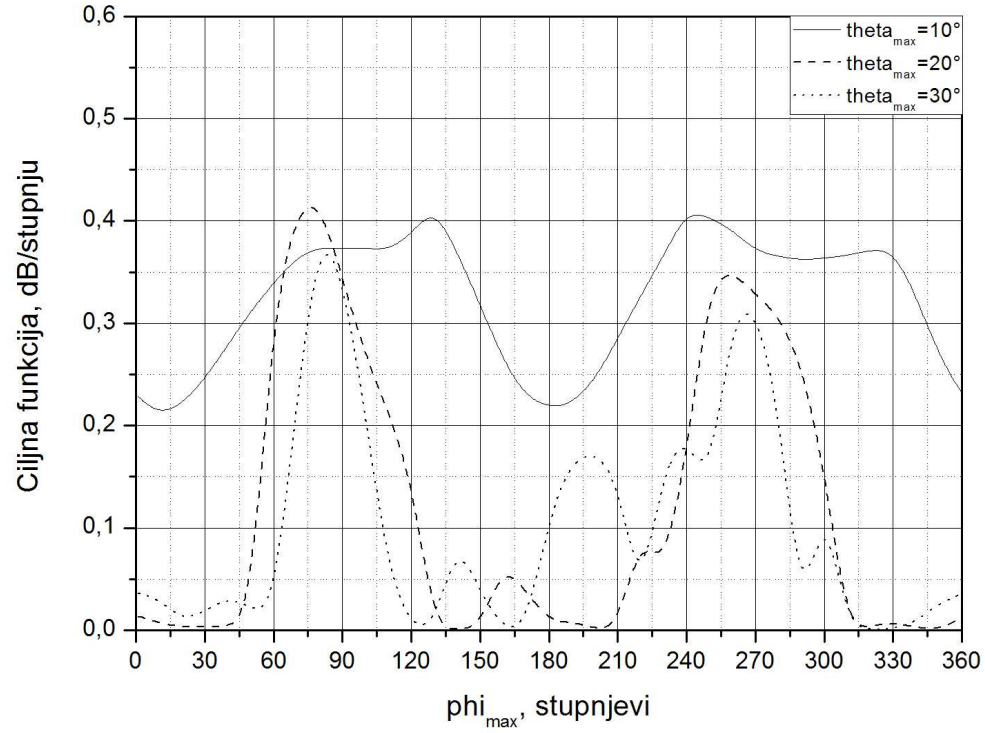


b)

Slika 5.24. Promjena ciljne funkcije CF_1 pri promjeni kuta maksimalnog zračenja: a) E – ravnina, b) H – ravnina za r_s = 30 cm.

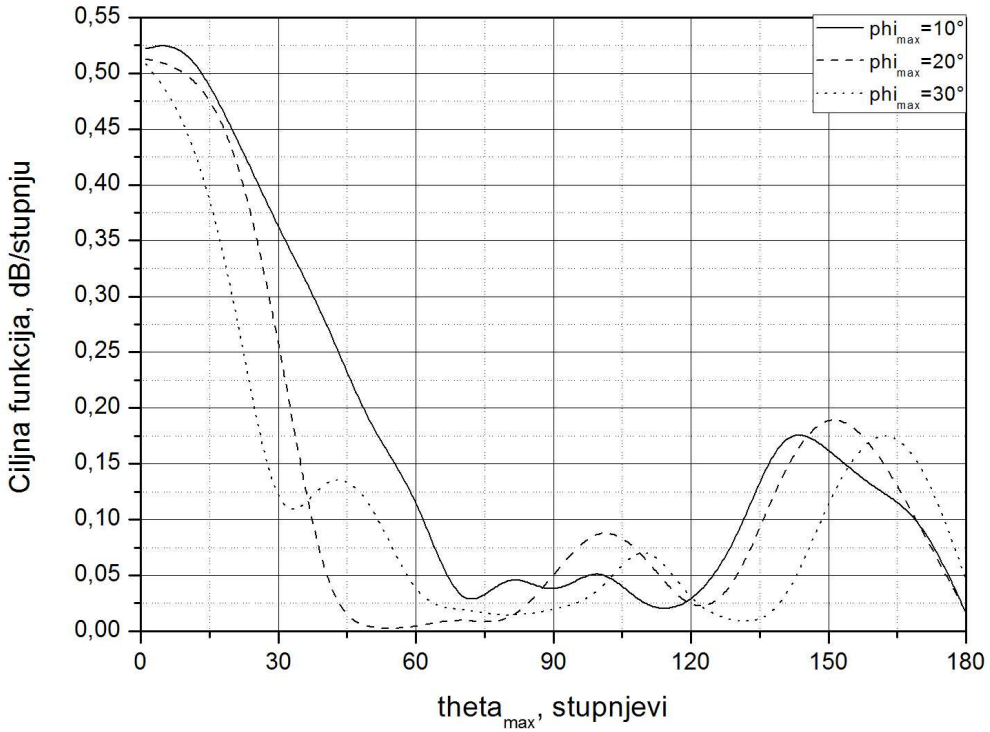


a)

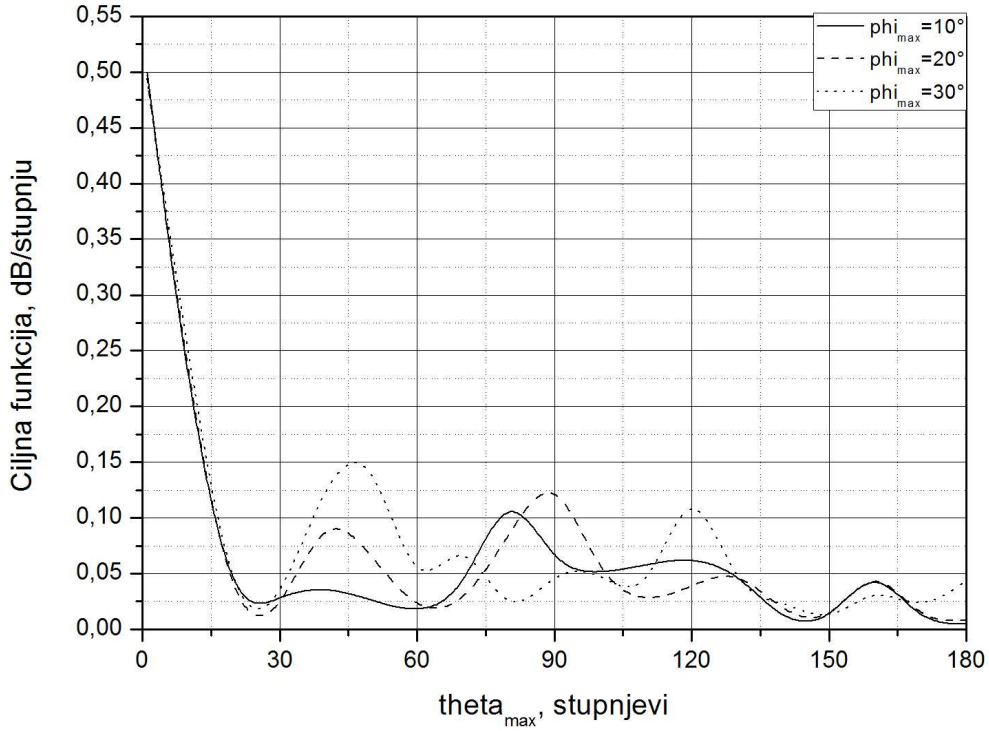


b)

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°, te 0,293 dB/stupnju theta$_{max}$=10°) što je i za očekivati ako su simulacije izvedene za E – ravninu. Maksimalne vrijednosti ciljne funkcije na theta$_{max}$=10° i H ravninu pri 100° i 280° su 0,344 i 0,357 dB/stupnju.

U sljedećem ispitivanju promjenjiv je bio elevacijski kut theta$_{max}$, a radijus sfere također 30cm. Na theta$_{max}$=20° vrijednost ciljne funkcije je maksimalna i pri phi$_{max}$=10° postiže 0,326 dB/stupnju. Za H – ravninu situacija je nešto drukčija, pri phi$_{max}$=10° 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:

- phi$_{max}$ promjenjiv, E – ravnina → 0,532 dB/stupnju (phi$_{max}$=0°, theta$_{max}$=10°) i 0,431 dB/stupnju (phi$_{max}$=220°, theta$_{max}$=10°);
- phi$_{max}$ promjenjiv, H – ravnina → 0,422 dB/stupnju (phi$_{max}$=80°, theta$_{max}$=20°) i 0,410 dB/stupnju (phi$_{max}$=240°, theta$_{max}$=10°);
- theta$_{max}$ promjenjiv, E – ravnina → 0,530 dB/stupnju (theta$_{max}$=10°, phi$_{max}$=10°);
- theta$_{max}$ promjenjiv, H – ravnina → 0,499 dB/stupnju (theta$_{max}$=0°, phi$_{max}$=10°).

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 kofiguriranje 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 broja 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 funkcijamom 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:

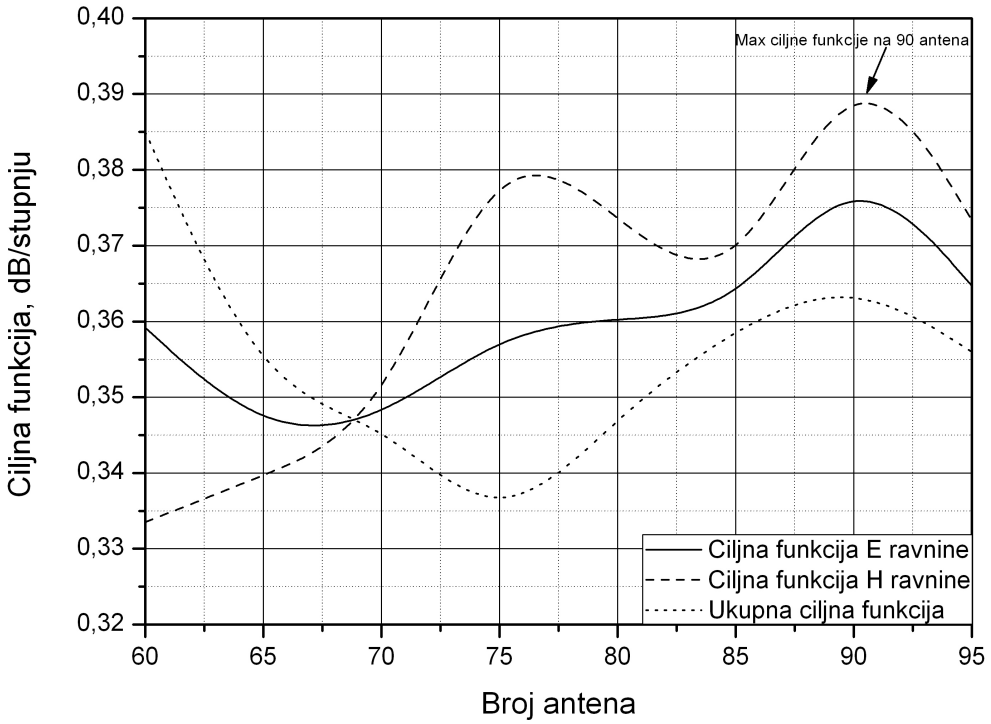
- promjena faze pobude s promjenom elevacijskih kuteva antenskih elemenata na sferi;
- izračun je načinjen za dva radijusa sfere: r_s = 30 cm i r_s = 52,9 cm;
- ukupan broj antena: 90 (za r_s = 30 cm) i 145 (za r_s = 52,9);
- selekcijski kut konusa α_{sel} = 90° u slučaju promjene gustoće elemenata i za r_s = 30 i za r_s = 52,9, α_{sel} = 72° (33 antene unutar konusa za r_s = 30 cm) i α_{sel} = 57° (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**

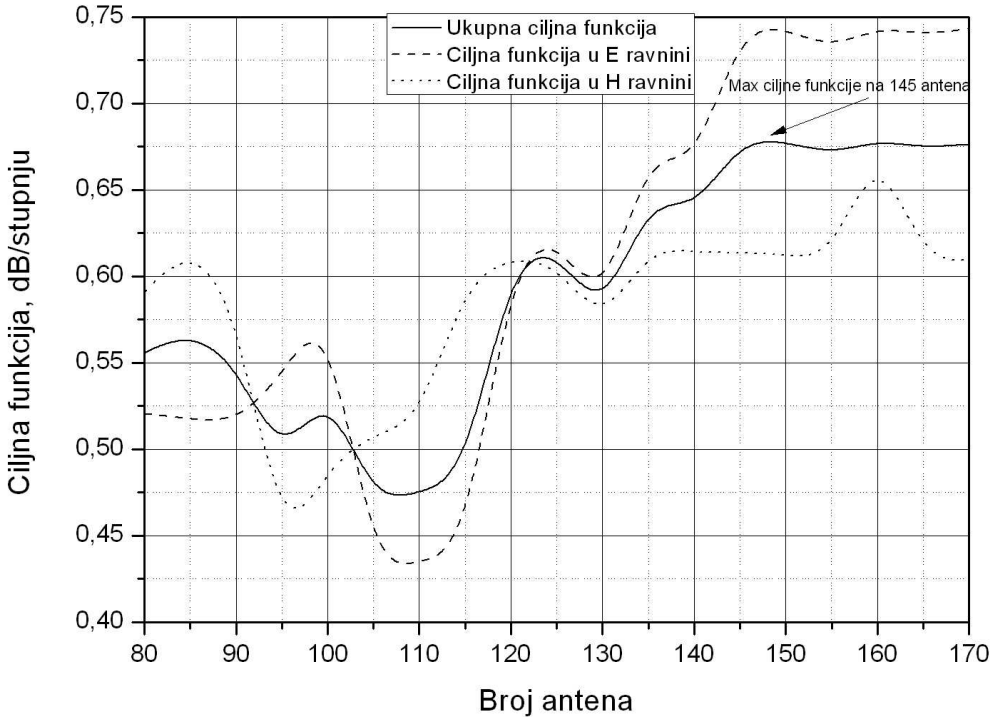
Kao za prethodne dvije konfiguracije, i u ovom slučaju istražen je utjecaj broja antena na dijagram zračenja za različite radijuse sfera. Za očekivati je da iznos ciljne funkcije raste s porastom broja antena.

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 0,4λ.

Za sferu radijusa 52,9 cm ukupna ciljna funkcija ima maksimun 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 λ, a to je bio uvjet očuvanja stanja sa zanemarivom spregom između antenskih elemenata.

Tablica 5.2. Pozicijski kutevi 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 0,4λ, 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

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

gdje je:

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

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

b) linearna promjena položaja

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

gdje je:

$b \in$ [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

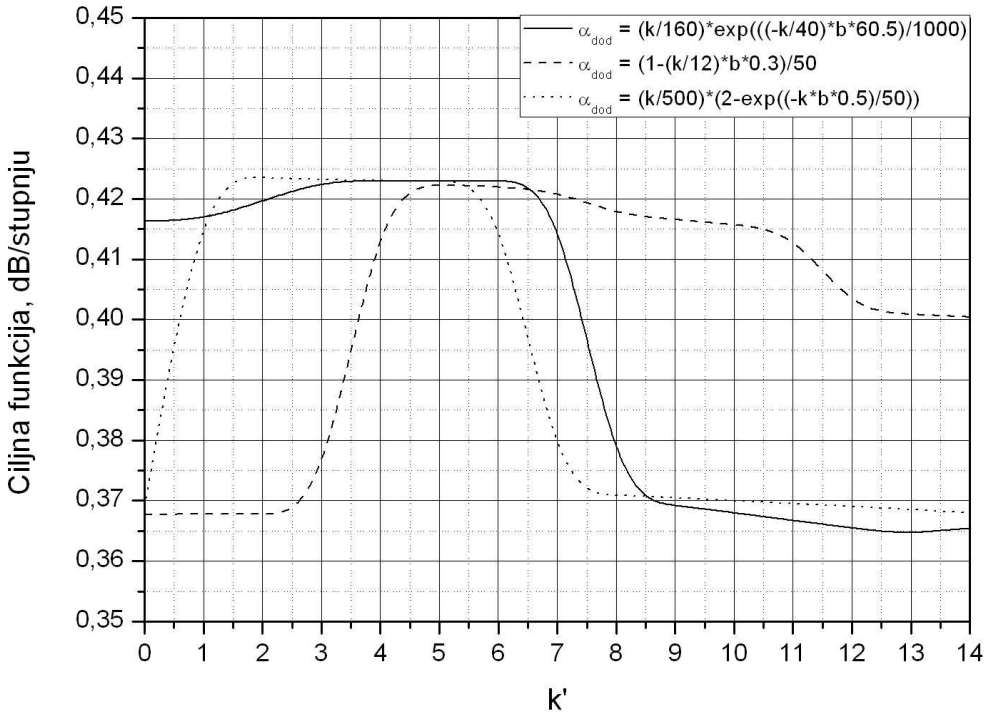
$$\alpha_{dod} = \left(\frac{k}{500}\right) \cdot \left[2 - \exp\left(\frac{-k \cdot b \cdot 0{,}5}{50}\right)\right], \tag{5-26}$$

gdje je:

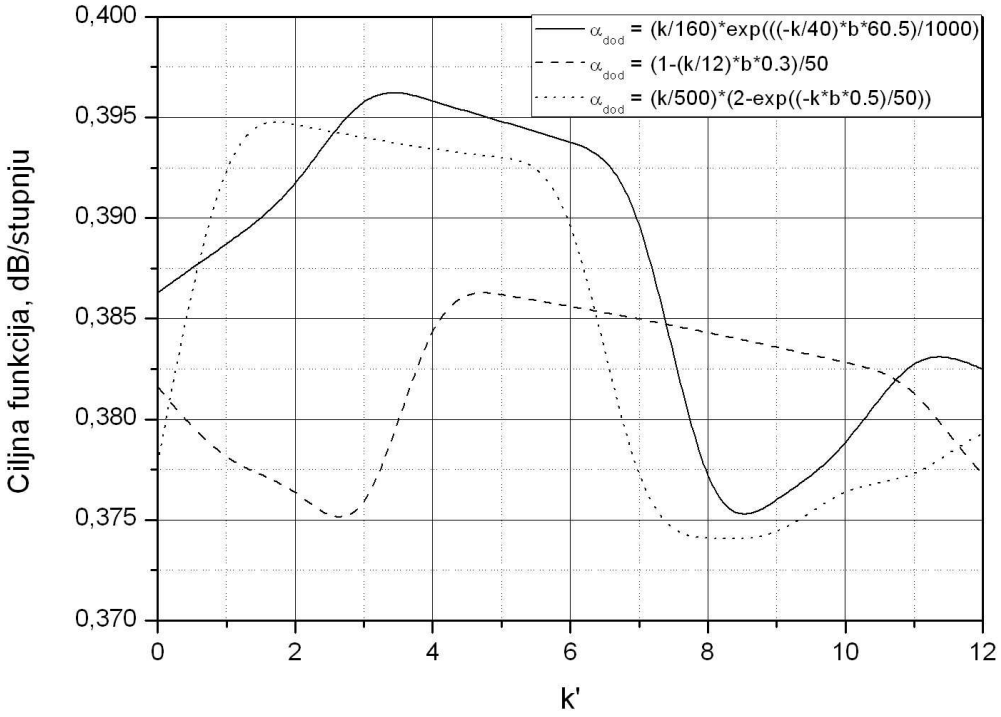
$b \in$ [broj prstenova:0] ili [25:0] za r_s=30 cm;

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

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

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

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

gdje je:

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

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

c) obrnuto eksponencijalna promjena položaja

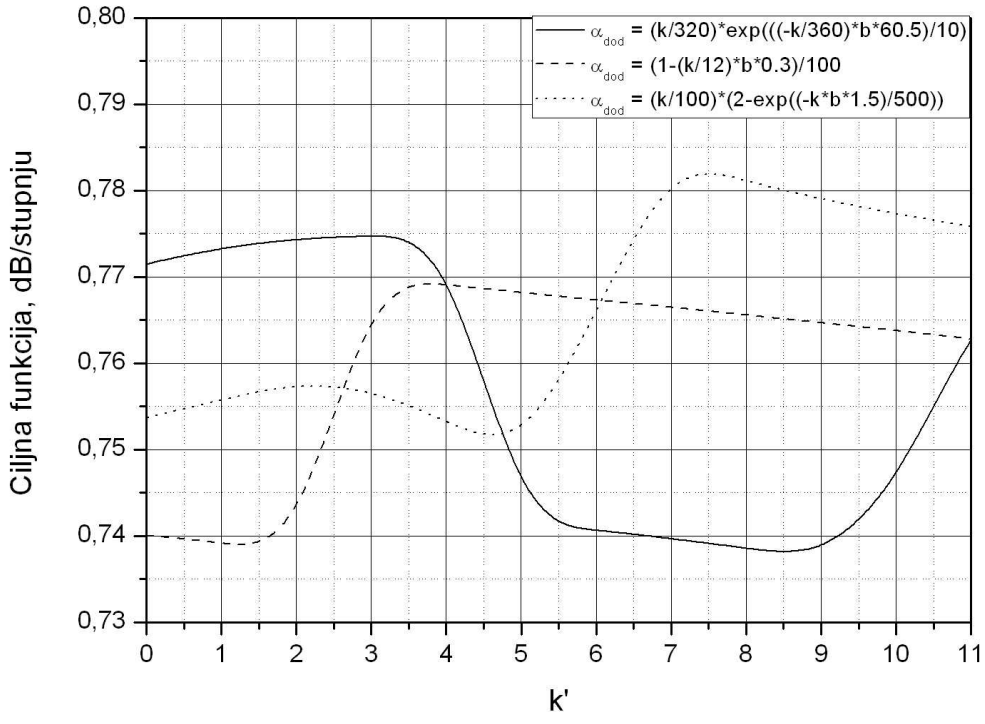
$$\alpha_{dod} = \frac{k}{100} \cdot \left[2 - \exp\left(\frac{-k \cdot b \cdot 1{,}5}{500} \right) \right], \tag{5-29}$$

gdje je:

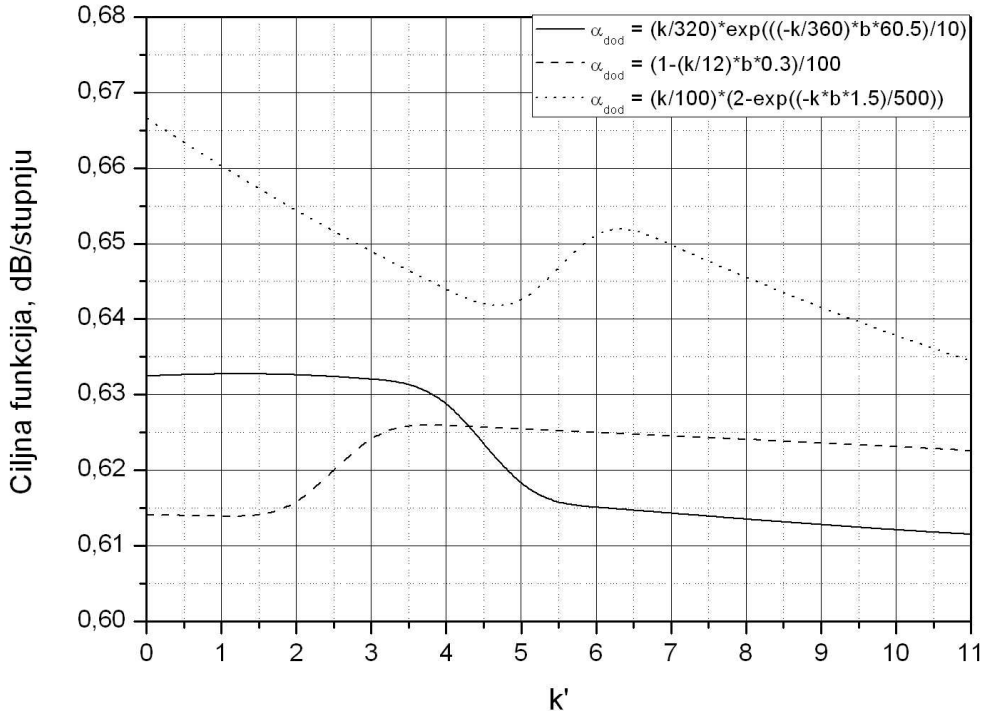
$b \in$ [broj prstenova:0] ili [19:0] za r_s=52,9 cm;

k - koeficijent po kojemu se mijenja položaj prstena, $k \in$ [-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)



b)

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

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

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

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0{,}001 \tag{5-31}$$

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

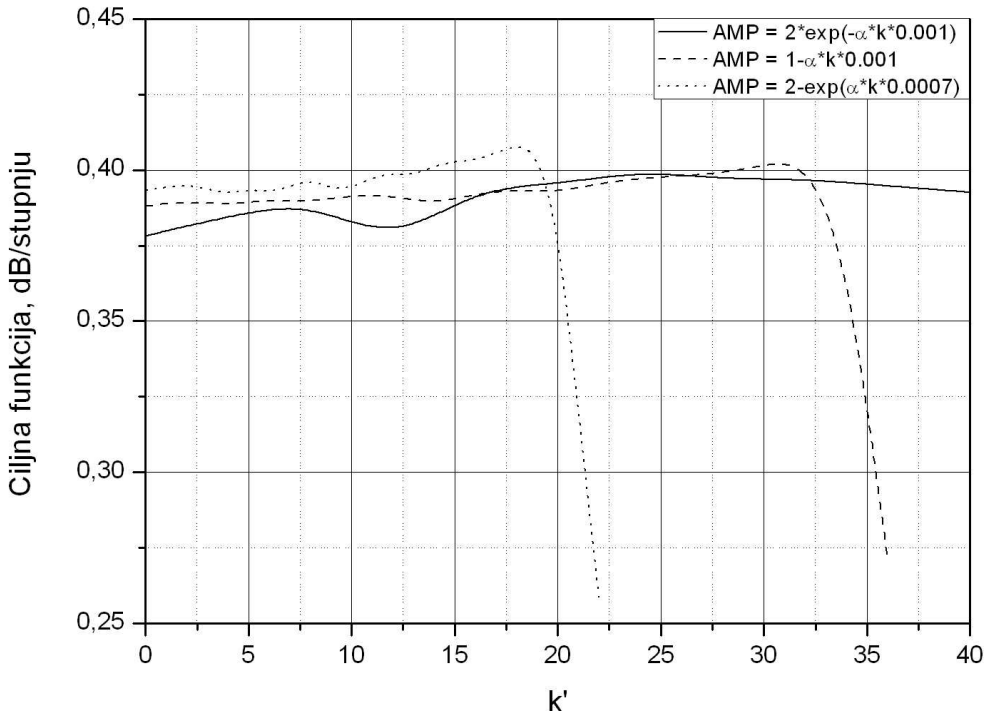
$$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0{,}0007) \tag{5-32}$$

gdje je:

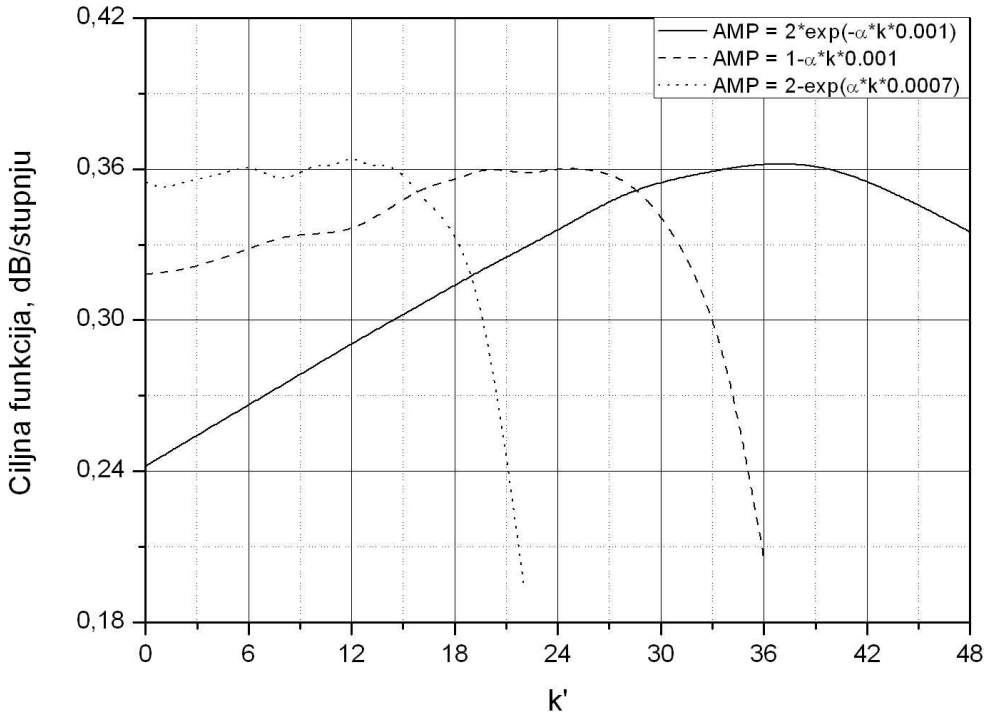
α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

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

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

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

$$AMP = 1 - \alpha \cdot k \cdot 0{,}001 \tag{5-34}$$

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

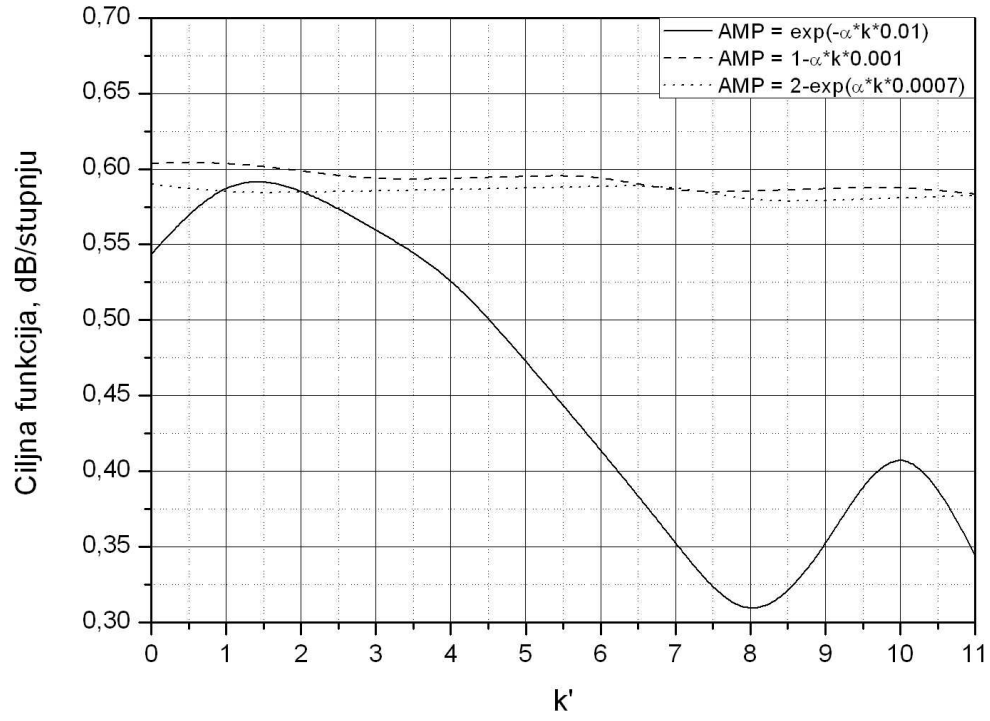
$$AMP = 2 - \exp(\alpha \cdot k \cdot 0{,}0007) \tag{5-35}$$

gdje je:

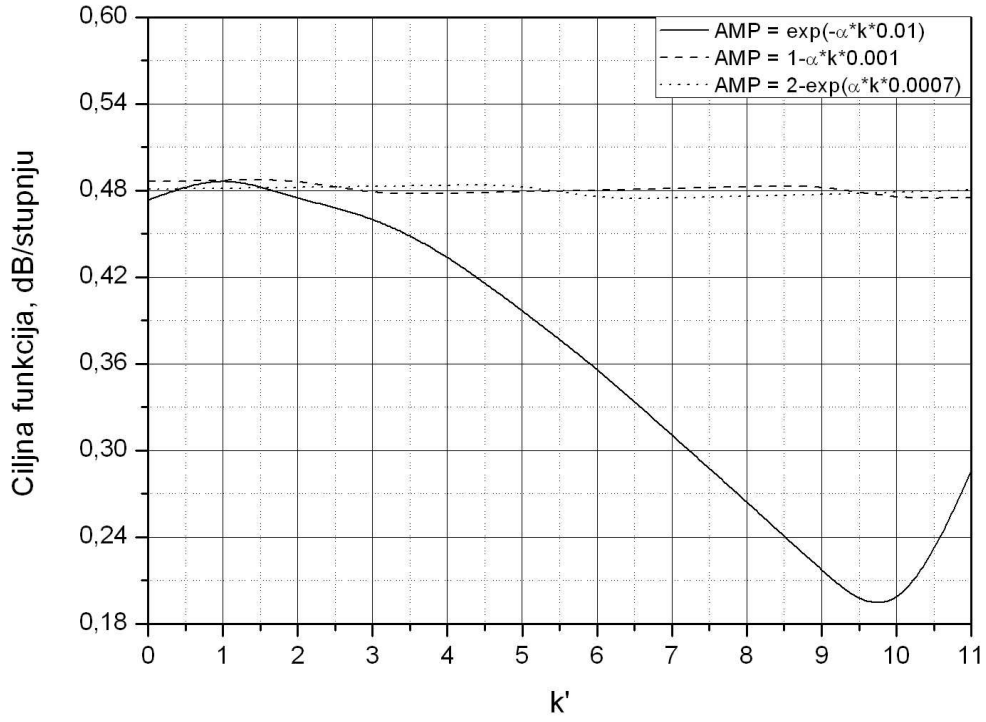
α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

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

U E ravnini, maksimum ciljne 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 – CF_1:
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

$$\phi = a + \exp\left(k \cdot |b - c| \cdot 0{,}01\right) \tag{5-36}$$

b) linearna promjena amplitude pobude

$$\phi = a + k \cdot |b - c| \cdot 0{,}01 \tag{5-37}$$

c) obrnuto eksponencijalna promjena amplitude pobude

$$\phi = a - 0{,}5 \cdot \exp\left(k \cdot |b - c| \cdot 0{,}01\right) \tag{5-38}$$

gdje je:

α – elevacijski kut pozicije antenskog elementa;

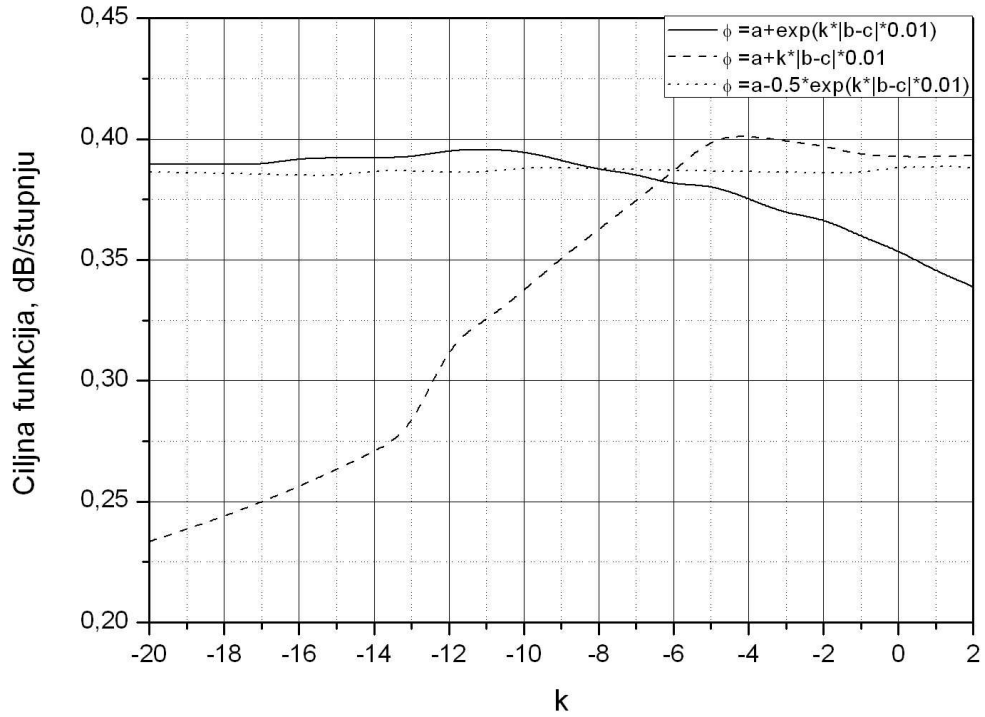
k - koeficijent po kojemu se mijenja polarizacija i kreće se u intervalu $k \in$ [-20:2] za r_s= 30 cm te $k \in$ [-13:3] za za r_s= 52,9 cm;

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

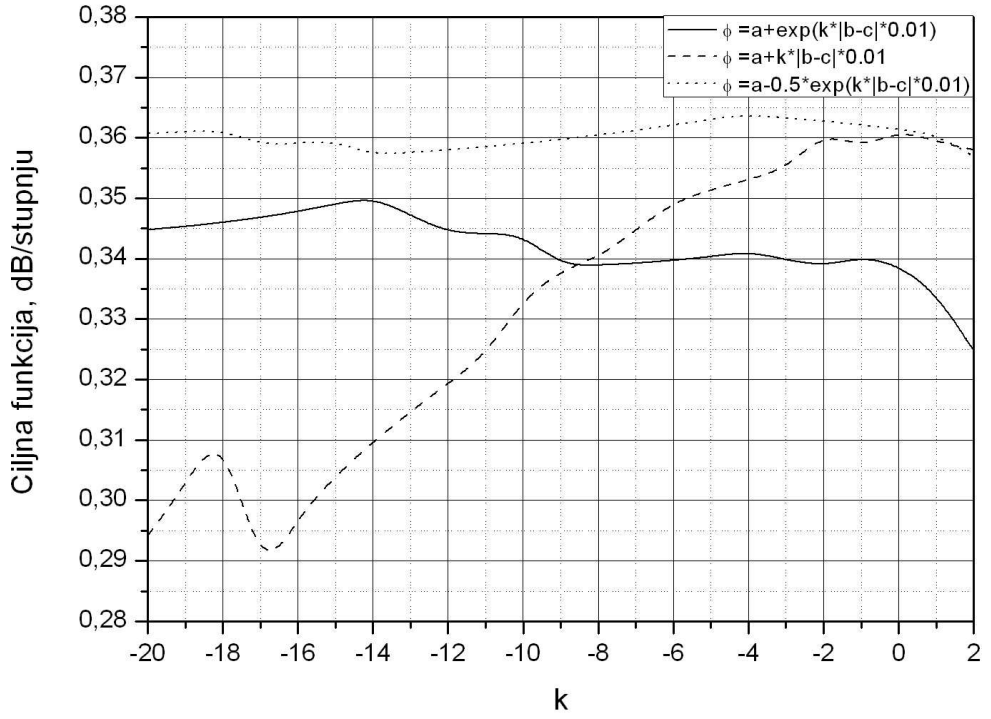
c – ukupni broj pojaseva na koje je podijeljena sfera.

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 - ravnini. U H – ravnini maksimum je postignut za obrnuto eksponencijalnu promjenu i iznosi 0,364 dB/stupnju za k = -4.



a)

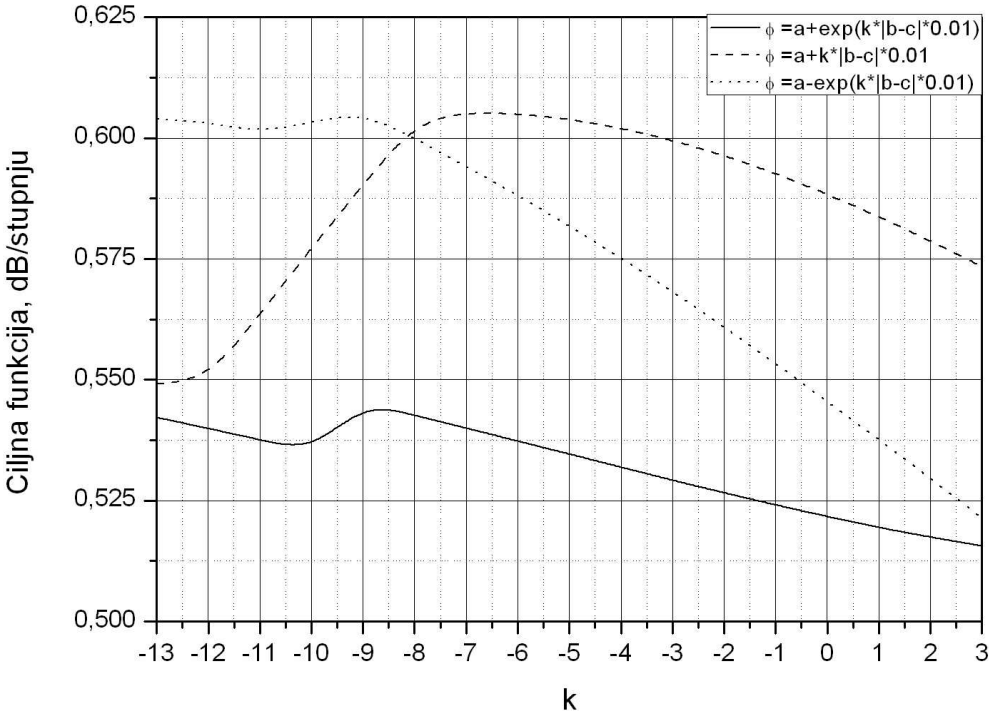


b)

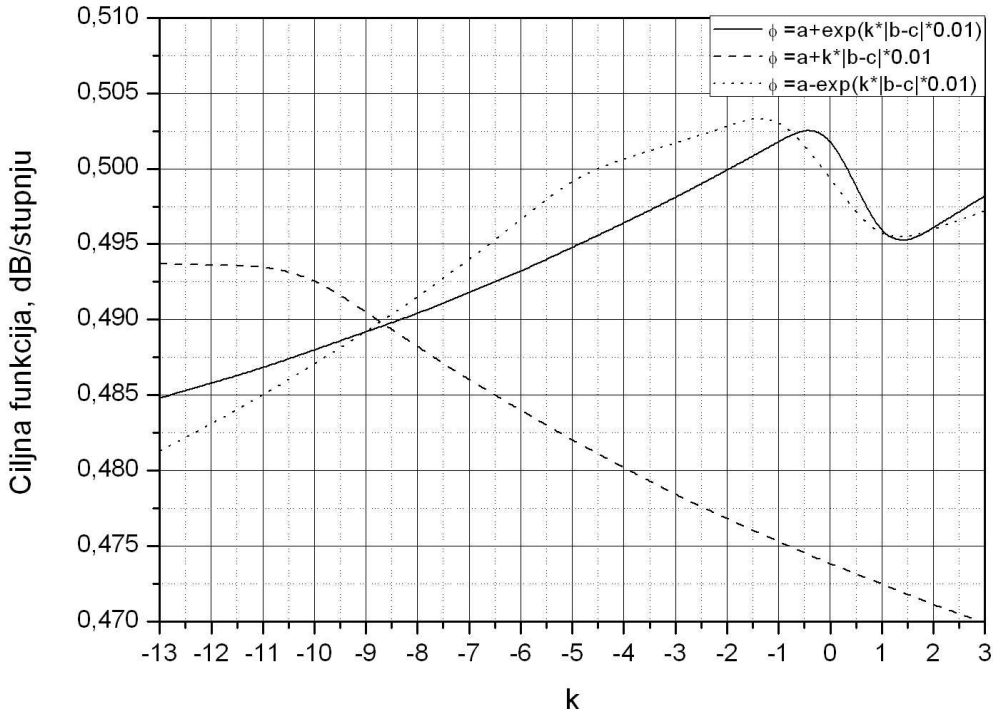
Slika 5.33. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta *k*:

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)



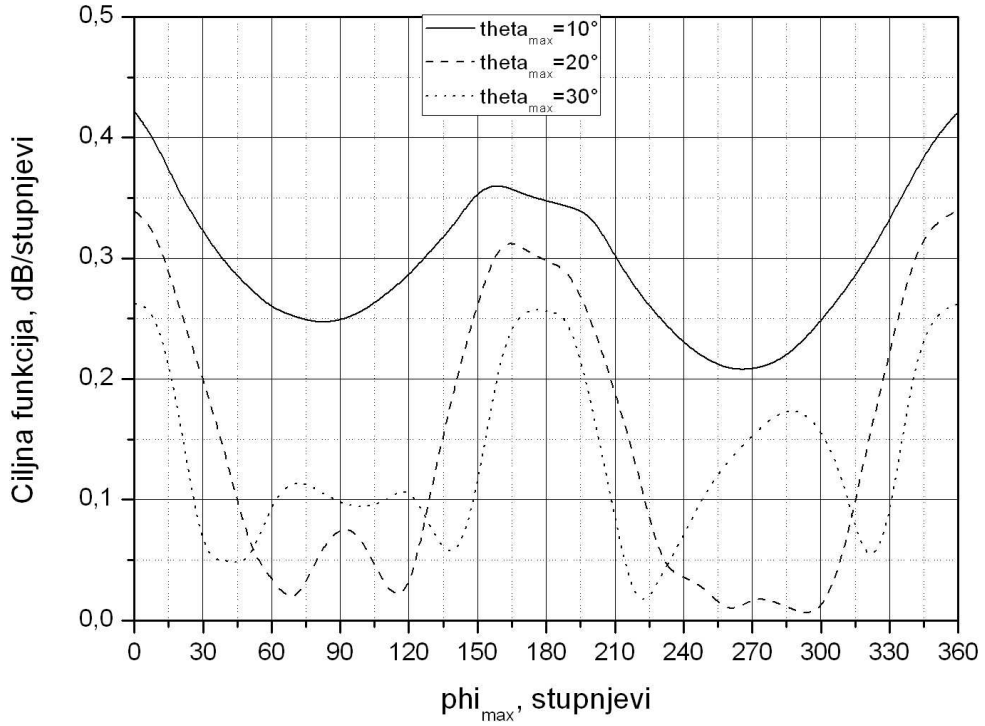
b)

Slika 5.34. Ovisnost ciljne funkcije CF_1 o promjeni koeficijenta *k*:
a) E – ravnina, b) H – ravnina za r_s = 52,9 cm.

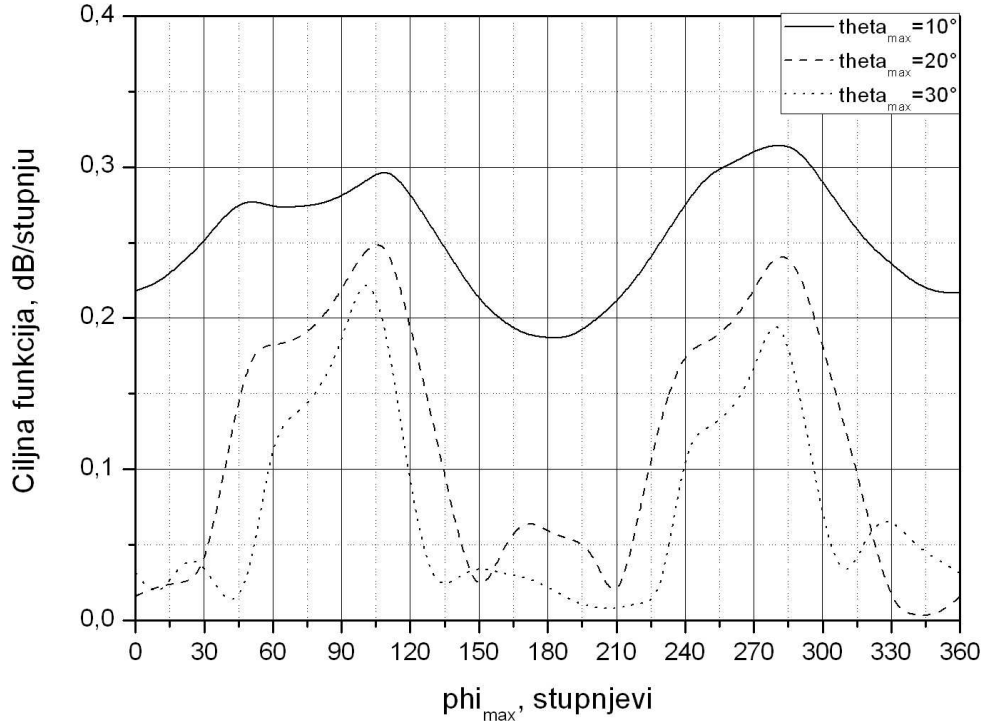
U E ravnini, za dvije funkcije promjene polarizacije, linearna, i obrnuto eksponencijalna, ciljna funkcija CF_1 ima maksimalnu vrijednost od 0,605 dB/stupnju za k = -7 i k = -9 pojedinačno. U H ravnini, obrnuto eksponencijalna promjena polarizacije pobude daje najveću vrijednost ciljne funkcije CF_1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

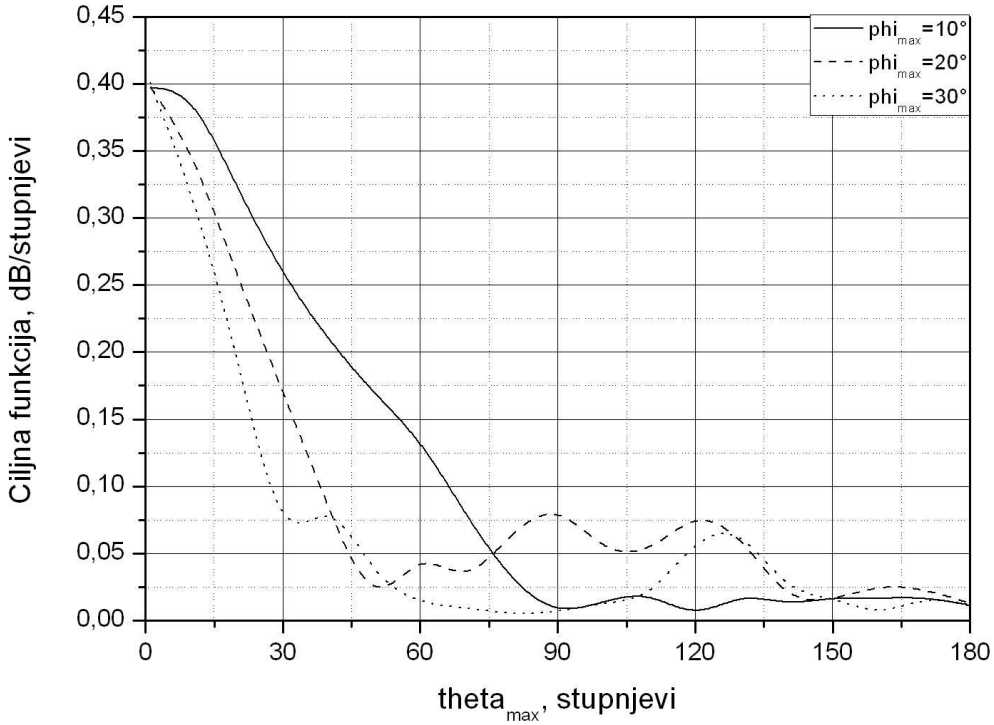


a)

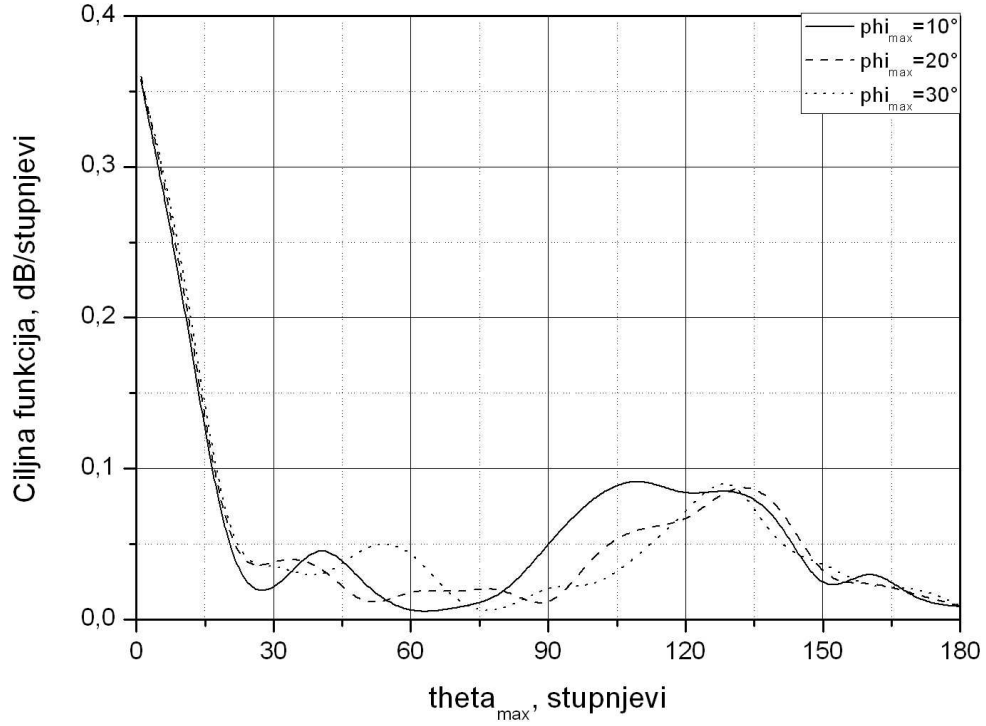


b)

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



a)



b)

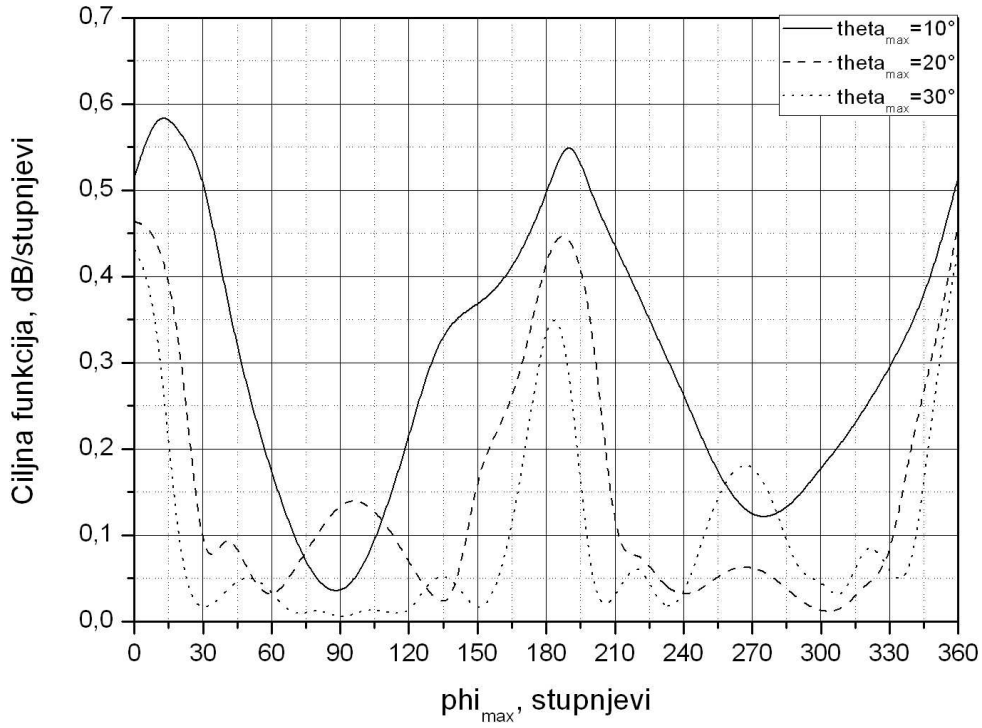
Slika 5.36. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja theta$_{max}$ na promjenu ciljne funkcije, a) E – ravnina, b) H – ravnina za r_s = 30 cm.

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

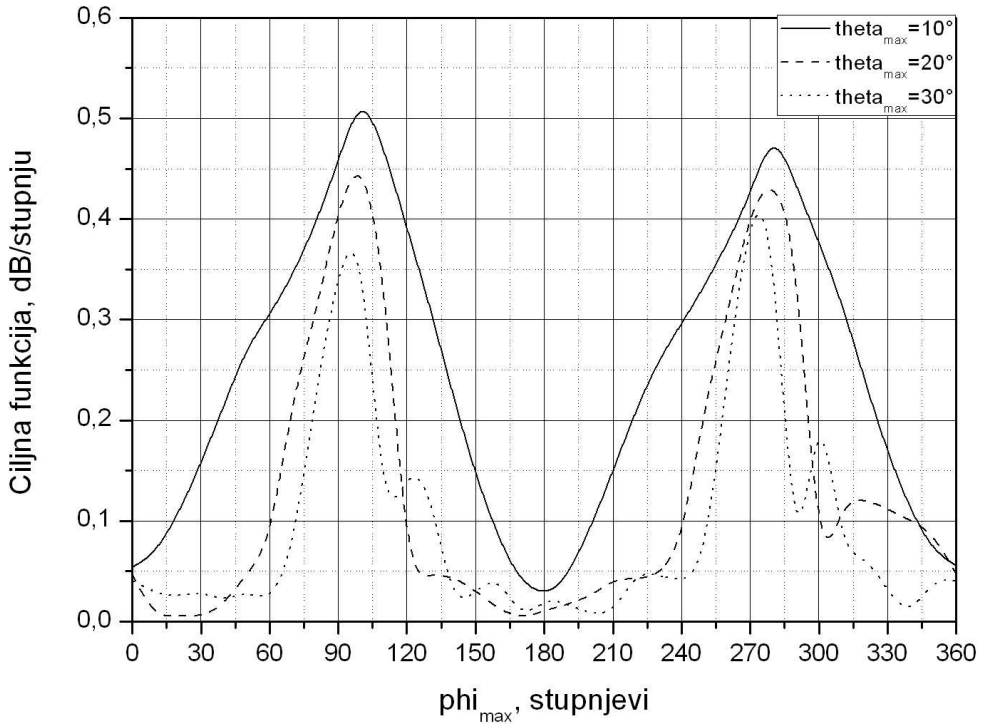
Istraživanje provedeno na sferi radijusa 30 cm daje sljedeće rezultate:

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

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

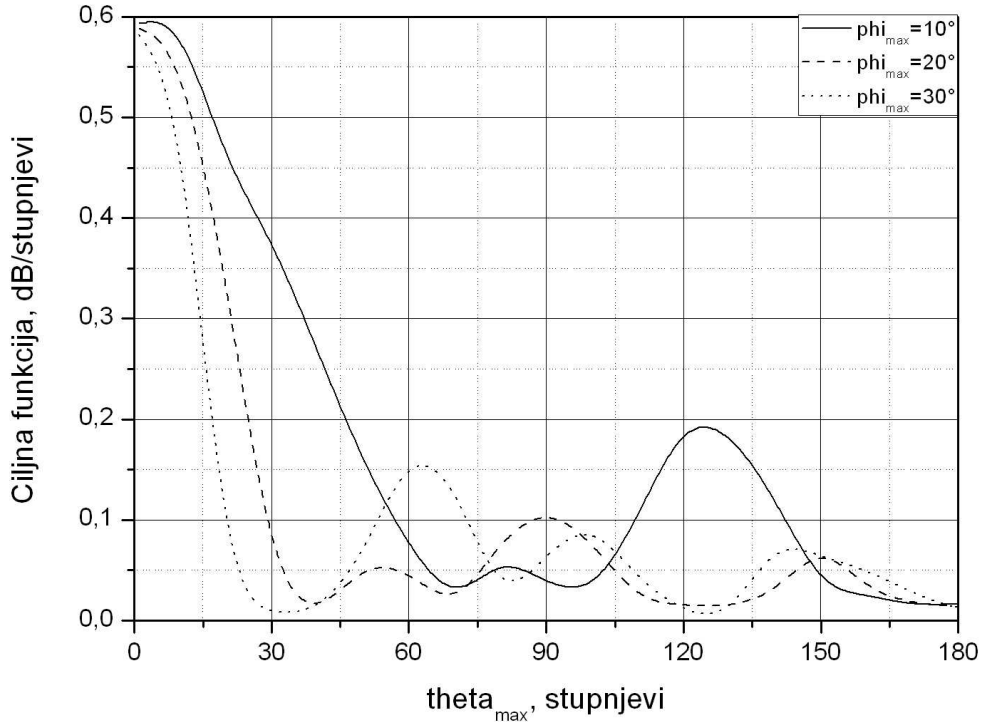


a)

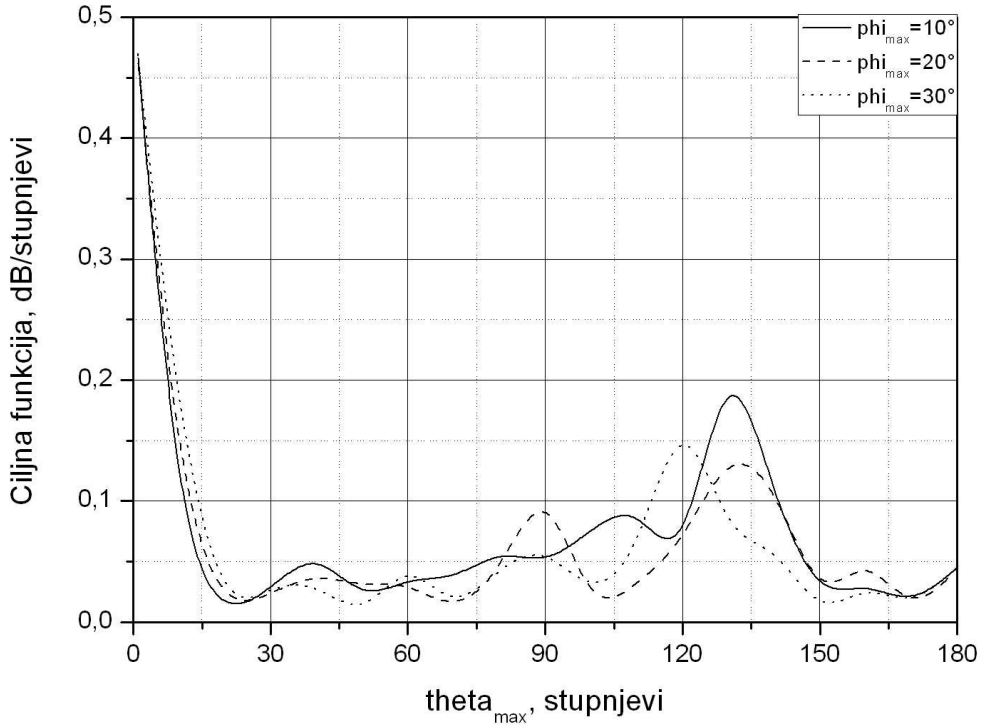


b)

Slika 5.37. Utjecaj promjene kuta maksimalnog zračenja phi_{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 $theta_{max}$ 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:

- phi_{max} promjenjiv, E – ravnina → 0,5986 dB/stupnju (phi_{max}=10°, $theta_{max}$=10°) i 0.575 dB/stupnju (phi_{max}=90°, $theta_{max}$=10°);
- phi_{max} promjenjiv, H – ravnina → 0,5279 dB/stupnju (phi_{max}=100°, $theta_{max}$=10°) i 0.4911 dB/stupnju (phi_{max}=280°, $theta_{max}$=10°);
- $theta_{max}$ promjenjiv, E – ravnina → 0,5986 dB/stupnju ($theta_{max}$=10°, phi_{max}=10°);
- $theta_{max}$ promjenjiv, H – ravnina → 0,4697 dB/stupnju ($theta_{max}$=0°, phi_{max}=30°).

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 DIREKTNOG PRETRAŽIVANJA PROSTORA

Pojedini ispitivani parametari 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 parameti 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 / **PARAMETAR**		**IKOSAEDARSKA**	**LEOPARDI**	**SPIRALNA**
GEOMETRIJSKI	**Broj antena**	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji:Pn=4 (r_s=52,9cm)	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: 145 antena 90 za r_s=30 cm 145 za r_s=52,9 cm Raspon vrijednosti:	Utjecaj:ZNAČAJAN Najbolji: 139 antena 72 za r_s=30 cm 139 za r_s=52,9 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=52,9cm i Pn=4) Raspon vrijednosti:	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: EXP promjena (r_s=52,9cm i 145 ant) Raspon vrijednosti:	Utjecaj:ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena (r_s=52,9cm 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=52,9cm	Najbolji: r_s=52,9cm	Najbolji: r_s=52,9cm
POBUDNI	**Amplituda pobude** Ciljna Funkcija (dB/°)	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: EXP I LIN promjena (r_s=52,9cm i Pn=4) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,460 za E rav 0,623 za H rav	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: LIN I EXP promjena (r_s=52,9cm i 145 ant) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,605 za E rav 0,493 za H rav	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena (r_s=52,9cm i 139 ant) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,516 za E rav 0,526 za H rav
	Faza pobude Ciljna funkcija	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE Nije zasebno istraživan. Ovaj parametar je uvijek korišten.	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE Nije zasebno istraživan. Ovaj parametar je uvijek korišten.	Utjecaj: ZNAČAJAN Najbolji: PO ELEV. KUTU PREMA GEOMETRIJI SFERE Nije zasebno istraživan. Ovaj parametar je uvijek korišten.
	Polarizacija antenskih elemenata Ciljna Funkcija (dB/°)	Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: LIN promjena (r_s=52,9cm i Pn=4) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,439 za E rav 0,434 za H rav	Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: LIN i OBR. EXP promjena (r_s=52,9cm i 145 ant) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,605 za E rav 0,504 za H rav	Utjecaj: MANJE ZNAČAJAN Najbolji: OBR. EXP promjena (r_s=52,9cm i 139 ant) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,545 za E rav 0,546 za H rav
	Elevacijski kut maksimuma zračenja Ciljna Funkcija (dB/°)	Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: θ_{max}=0° i φ_{max}=30° (r_s=52,9cm i Pn=4) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,440 za E rav 0,524 za H rav	Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: θ_{max}=10° i φ_{max}=10° (E rav); θ_{max}=0° i φ_{max}=30° (H rav) Vrsta: CF_1 Max: 0,599 za E rav 0,470 za H rav	Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: θ_{max}=10° i φ_{max}=10° (E rav); θ_{max}=0° i φ_{max}=10° (H rav) Vrsta: CF_1 Max: 0,530 za E rav 0,499 za H rav
	Azimutalni kut maksimuma zračenja Ciljna Funkcija (dB/°)	Utjecaj:NIJE ZNAČAJAN Najbolji: φ_{max}=180° i θ_{max}=10° (E rav); φ_{max}=90° i 270°, θ_{max}=10° (H rav) (r_s=52,9cm i Pn=4) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,568 za E rav 0,502 za H rav	Utjecaj:NIJE ZNAČAJAN Najbolji: φ_{max}=10° i θ_{max}=10°; φ_{max}=90° i θ_{max}=10° (E rav); φ_{max}=10° i θ_{max}=10°; φ_{max}=280° i θ_{max}=10° (H rav) (r_s=52,9cm i 145 ant) Raspon vrijednosti: Vrsta: CF_1 Max: 0,599 i 0,575 za Erav 0,528 i 0,491 za Hrav	Utjecaj: NIJE ZNAČAJAN Najbolji: φ_{max}=0° i θ_{max}=10°; φ_{max}=220° i θ_{max}=10° (E rav); φ_{max}=80° i θ_{max}=10°; φ_{max}=240° i θ_{max}=10° (H rav) (r_s=52,9cm i 139 ant) Raspon vrijednosti: 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 paramtru 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 paramatara 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 višeparametarska 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 - Pn), 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:

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

gdje je:

a = -1171,171,

c = 1229,168,

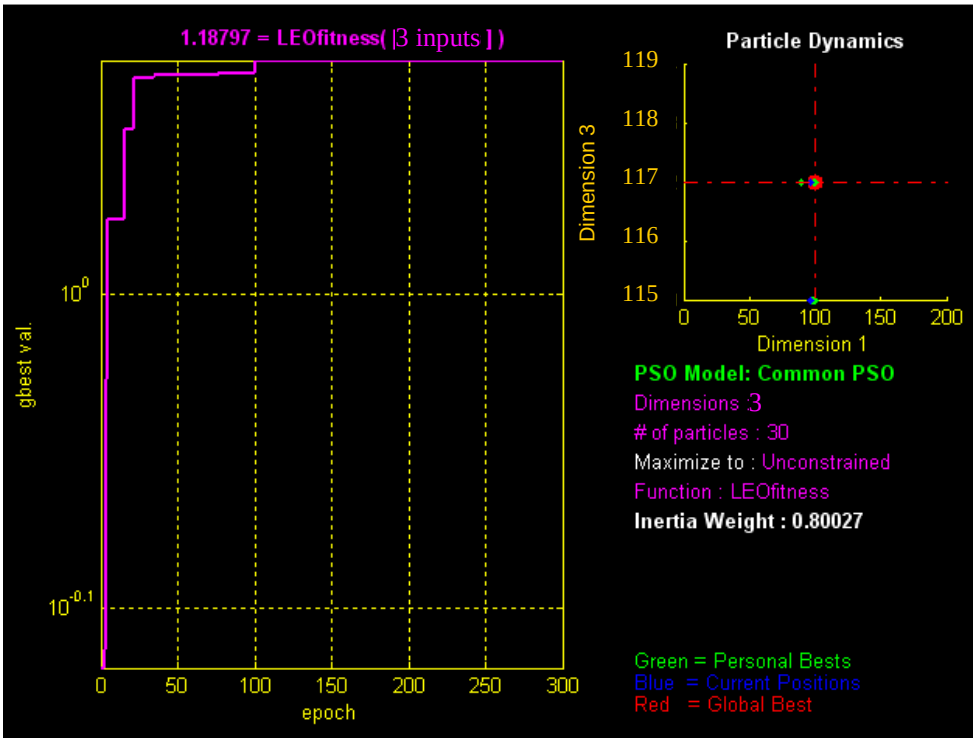
$b \in$ [0:6],

$k=k_g$ - 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: Pn $\in$ [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 Pn 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 $\alpha_{sel} = 90°$ što uvjetuje razliku krajnje vrijednosti ciljne funkcije u odnosu na krajnu 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, Pn= 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:

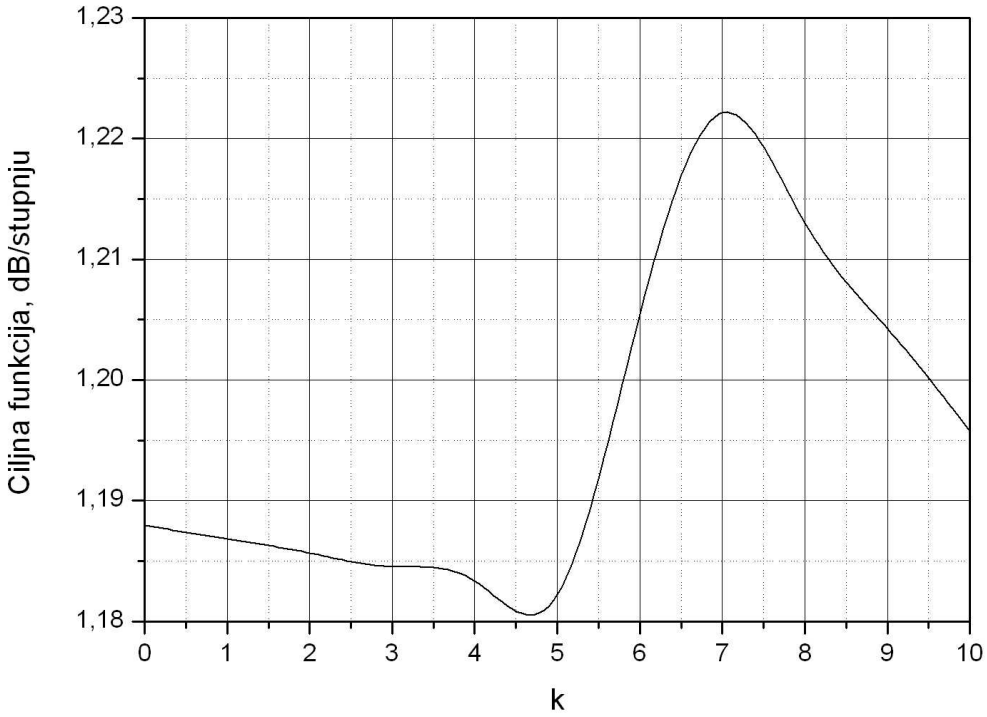
$$A = \exp(\alpha \cdot k \cdot 0.0007). \qquad (6\text{-}2)$$

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 Pn}**	**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**

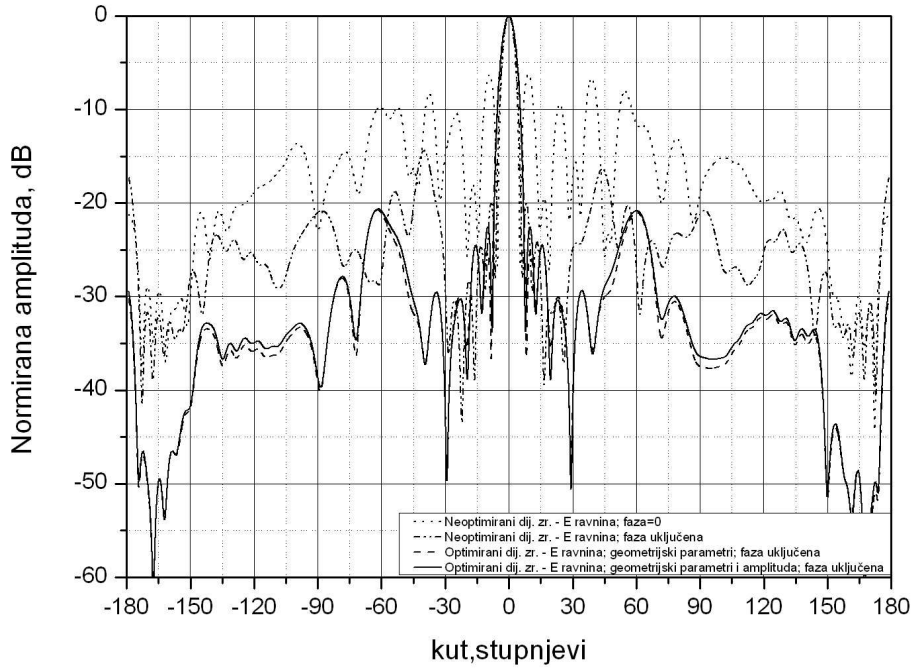
Ovaj porast vrijednosti ciljne funkcije postignut je za eksponencijalnu promjenu amplituda pobude antenskih elemenata po elevacijsko-pozicijskim kutevima. Promjena amplitude pobude na neki drukčiji način (ne po elevacijsikm kutevima pozicije), možda može i poboljšati dijagram zračenja te povećati vrijednosti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

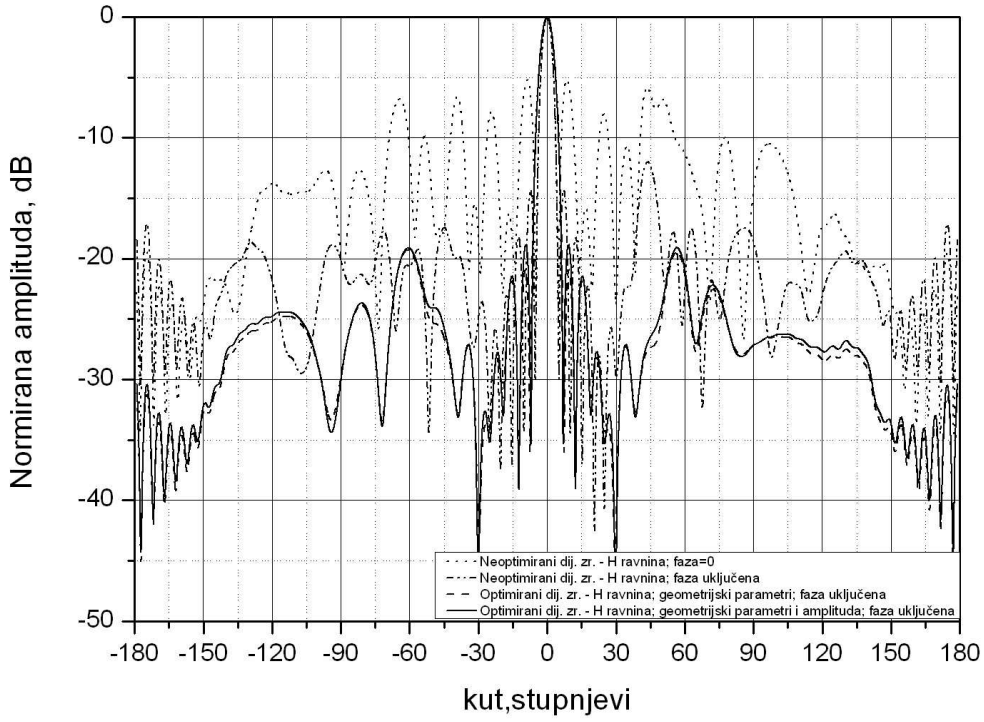
Tablica 6.4. Elevacijski kutevi i pripadajuće amplitude pri eksponencijalnoj promjeni amplitude antenskih elemenata za 91 antenu; na sferi radijusa 100 cm uz koeficijent amplitude k_a=7.

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, Pn=4, α_{sel}=90°):

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**
Vrijednnost 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 α_{sel} = 180 ° (obuhvaćena cijela sfera), a broj antena pri svakoj optimizaciji je fiksan. 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.

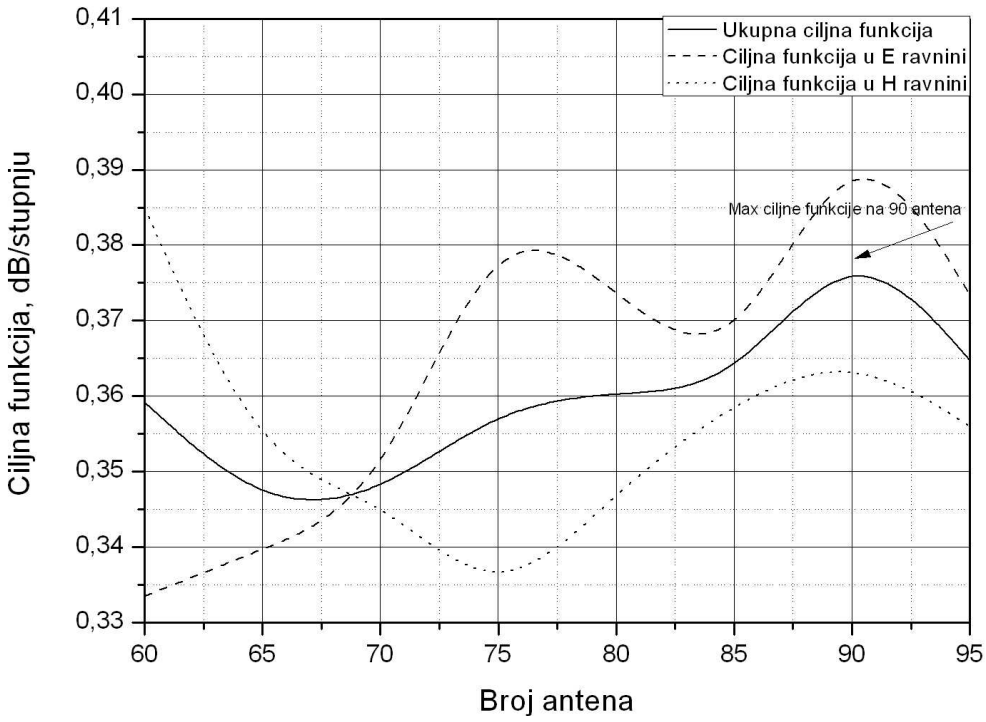
A) Optimizacija niza radijusa r_s = 30 cm (1,7λ)

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 α_{sel} = 180°;
- jednomodni režim rada uz frekvenciju f = 1,7 GHz.

Ove postavke vrijede za sve kofiguracije 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=30cm.

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

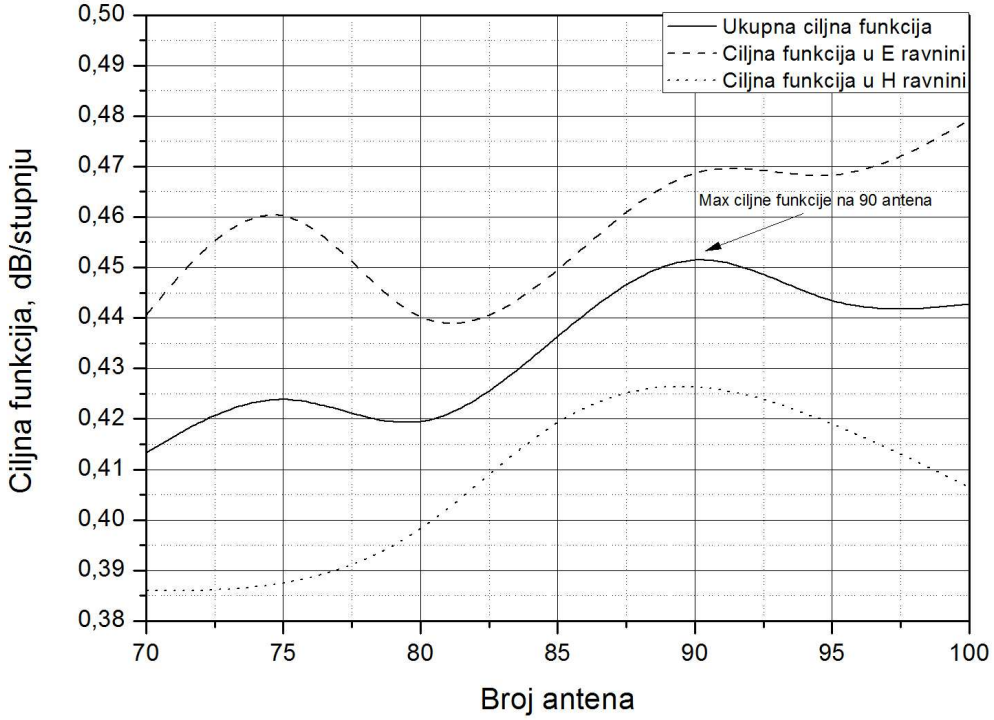
15	95,74817	69,76161
15	95,74817	141,76161
15	95,74817	213,76161
15	95,74817	285,76161
15	95,74817	357,76161
16	102,20751	52,24406
16	102,20751	124,24407
16	102,20751	196,24407
16	102,20751	268,24406
16	102,20751	340,24406
17	108,83106	54,47169
17	108,83106	126,47169
17	108,83106	198,47169
17	108,83106	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 kutevi) 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.

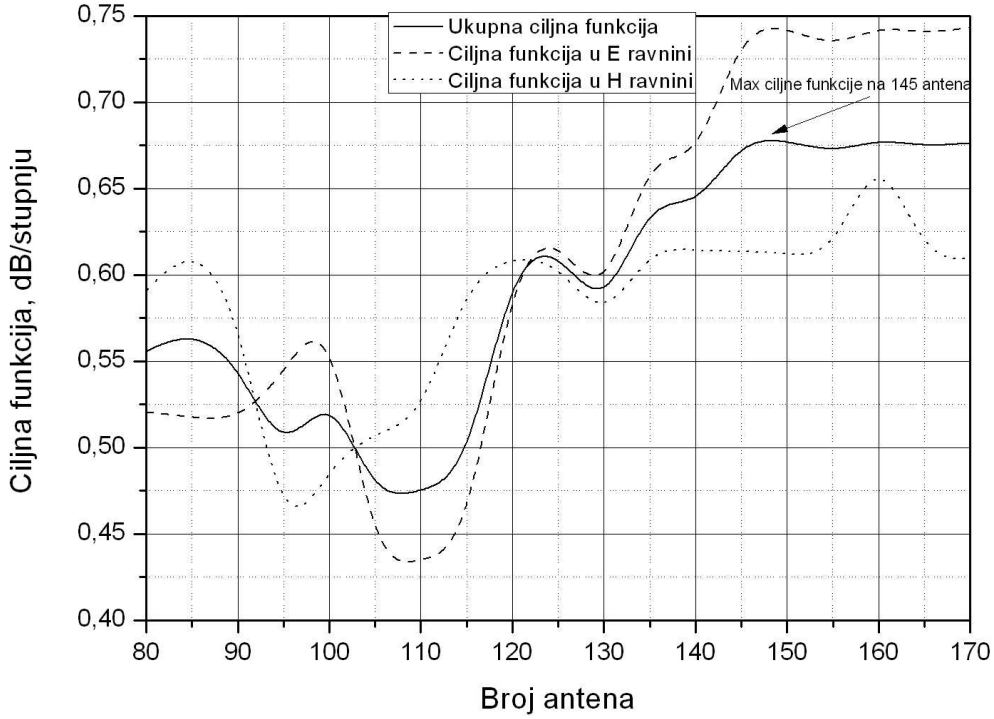
Tablica 6.7. Raspored 90 antena na sferi radijusa 35,3 cm Leopardi konfiguracije.

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 poštivanje 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
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

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):

$$A = 2\text{-}\exp(\alpha \cdot k \cdot 0.0007), \tag{6-3}$$

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 (1,7λ)**

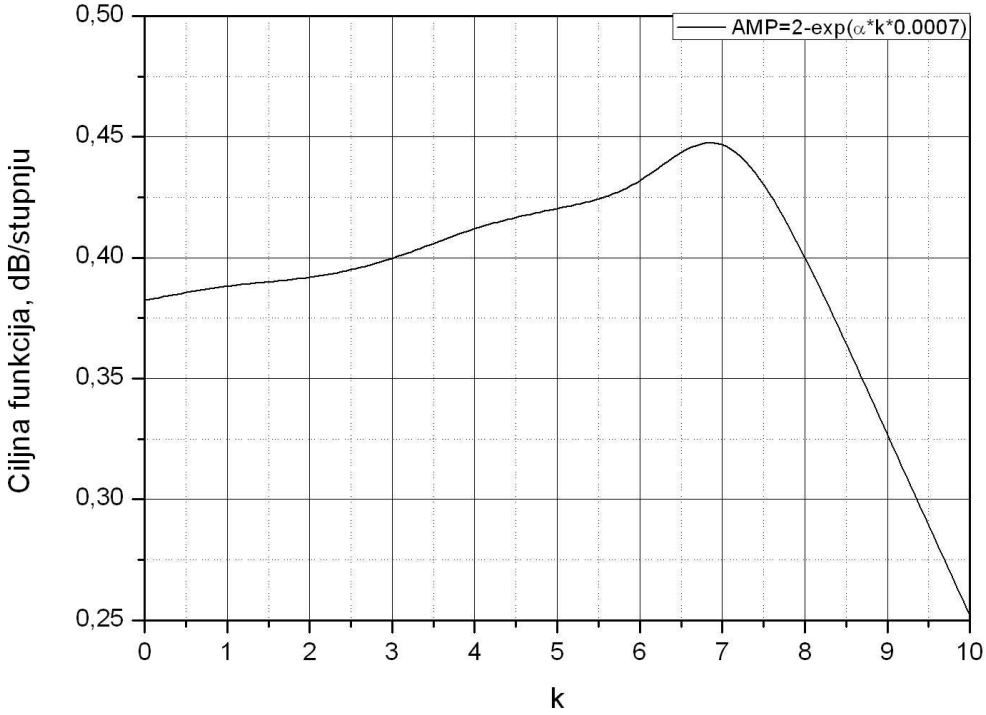
Postavke izračuna su slijedeće:

- promjena faze pobude;
- r_s = 30 cm;
- selekcijski kut konusa α_{sel} = 180°;
- 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.

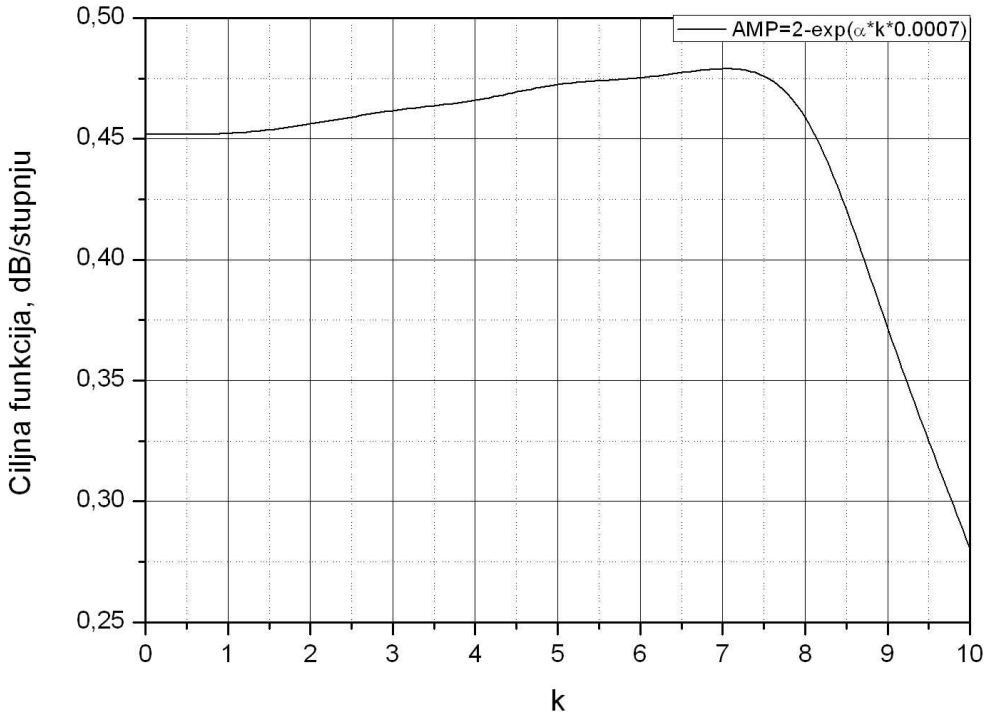
Tablica 6.9. Amplitude pobude uz vrijednost $k=k_a=7$ za sferu radijusa 30 cm Leopardi konfiguracije.

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.

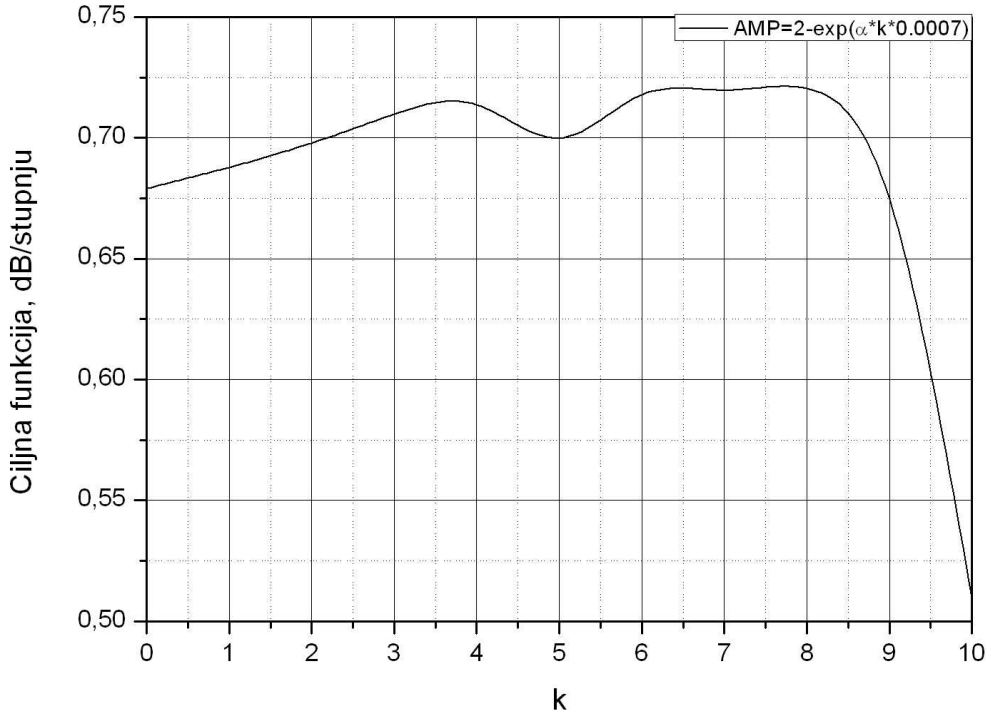
R. br. prstena	Alfa, °	$k=k_a$	Amplituda
1	0,0000	7,0000	1,0000
2	16,5705	7,0000	0,9154
3	24,1528	7,0000	0,8744
4	30,9791	7,0000	0,8361
5	37,8091	7,0000	0,7965
6	45,4010	7,0000	0,7508
7	53,0635	7,0000	0,7031
8	59,9316	7,0000	0,6587
9	67,7430	7,0000	0,6063
10	75,1684	7,0000	0,5547
11	82,3202	7,0000	0,5031
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.

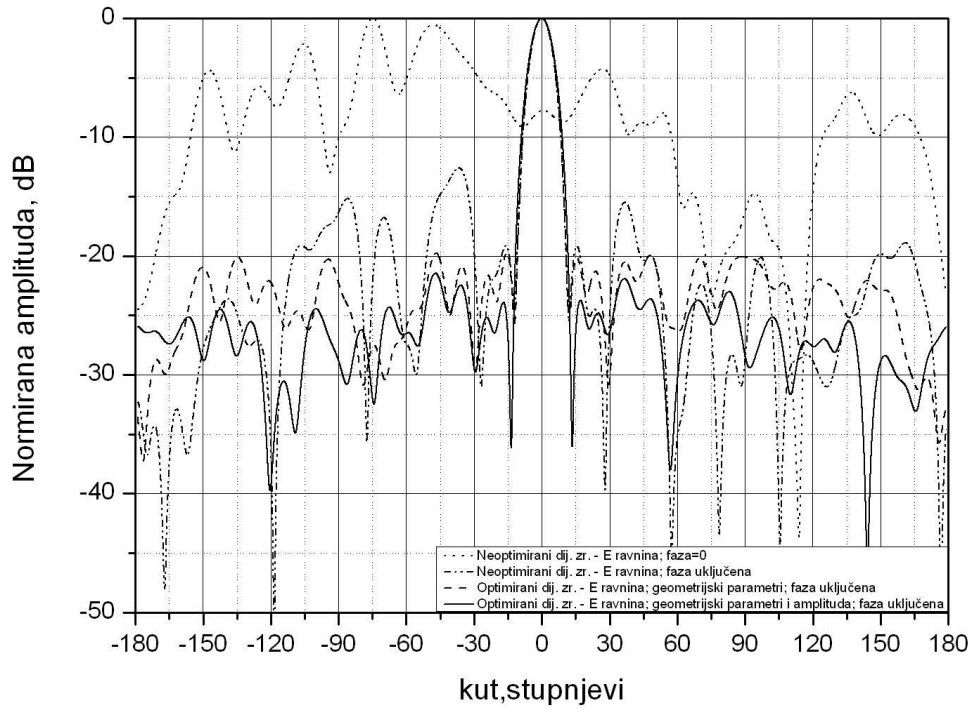
Uz promjenu koeficijenta $k=k_a$ mijenja se i iznos ciljne funkcije, te se u jednom trenutku postiže maksimalna vrijednost. Pri k = 8 ciljna funkcija je najveća i iznosi 0,720 dB/stupnju, što predstavlja izvjestan porast ciljne funkcije u odnosu na 0,679 dB/stupnju kada je amplituda pobude bila konstanta. 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.

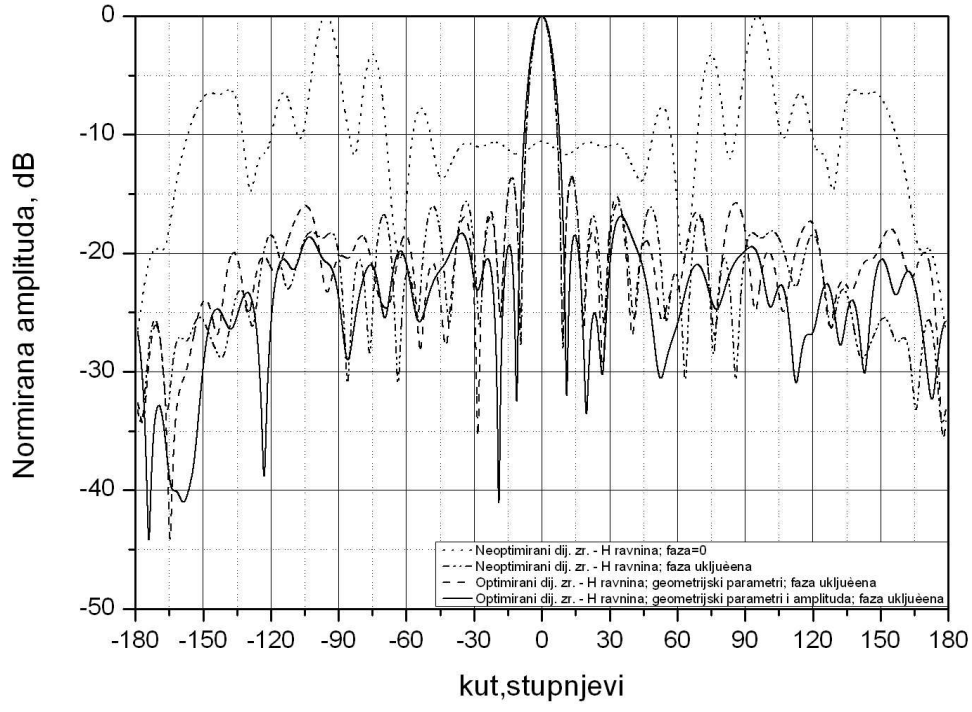
R. br. prstena	Alfa, °	$k=k_a$	Amplituda
1	0,0000	8,0000	1,0000
2	14,3243	8,0000	0,9165
3	23,1456	8,0000	0,8616
4	31,0081	8,0000	0,8104
5	39,2245	8,0000	0,7544
6	47,8693	8,0000	0,6926
7	56,4089	8,0000	0,6285
8	64,6213	8,0000	0,5640
9	73,1079	8,0000	0,4941
10	81,6523	8,0000	0,4203
11	90,0000	8,0000	0,3447
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, α_{sel}=180°, 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**
Vrijednnost 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**

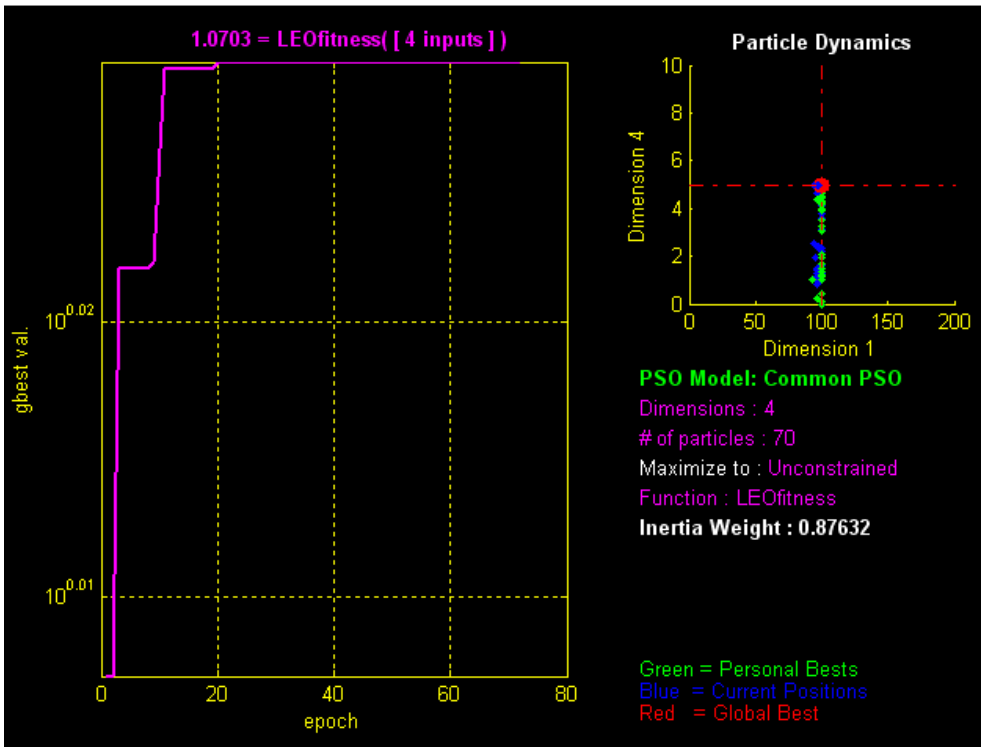
U geometrijske parametre koji se mijenjaju u ovom dijelu istraživanja spadaju radijus sfere r_s, broj antena, te položaj antena. Selekcijski kut α je 180°, a parametri se kreću u sljedećim granicama:

- 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;
- selekcijski kut konusa $\alpha_{sel} = 180°$;
- 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 0,4λ.

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_α = 0°,
- koeficijent promjene azimutalnog kuta k_β = 5°.

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
2	6,8158	105,1544
3	9,6447	362,0214
4	11,8193	288,9657
5	13,6558	229,2095
6	15,2768	177,3665
7	16,7449	130,9134
8	18,0974	88,4312
9	19,3585	49,0291
10	20,5452	12,1049
11	21,6696	337,2290
12	22,7410	304,0822
13	23,7667	272,4200
14	24,7522	242,0498
15	25,7022	212,8171
16	26,6206	184,5955
17	27,5106	157,2800
18	28,3747	130,7824
19	29,2153	105,0276
20	30,0345	79,9513
21	30,8338	55,4977
22	31,6150	31,6180
23	32,3791	289852
24	33,1276	345,4138
25	33,8613	323,0177
26	34,5813	301,0509
27	35,2884	279,4863
28	35,9834	258,2993
29	36,6670	237,4678
30	37,3397	216,9716
31	38,0023	196,7923
32	38,6552	176,9129
33	39,2990	157,3181
34	39,9340	137,9935
35	40,5607	118,9259
36	41,1795	100,1032
37	41,7908	81,5139
38	42,3949	63,1476
39	42,9920	44,9943
40	43,5826	27,0450
41	44,1668	369505
42	44,7450	351,7244
43	45,3173	334,3375
44	45,8840	317,1232
45	46,4454	300,0748
46	47,0015	283,1861
47	47,5527	266,4510
48	48,0991	249,8640
49	48,6408	233,4196
50	49,1781	217,1128
51	49,7110	200,9389
52	50,2398	184,8931
53	50,7645	168,9713
54	51,2854	153,1692
55	51,8025	137,4829
56	52,3159	121,9086
57	52,8258	106,4428
58	53,3323	91,0819
59	53,8355	75,8228
60	54,3354	60,6621
61	54,8323	45,5970
62	55,3261	30,6245
63	55,8170	15,7418
64	56,3051	360,9463
65	56,7904	346,2354
66	57,2731	331,6065
67	57,7531	317,0574
68	58,2306	302,5856
69	58,7057	288,1891
70	59,1783	273,8656
71	59,6487	259,6131
72	60,1168	245,4296
73	60,5827	231,3132
74	61,0465	217,2619
75	61,5083	203,2741
76	61,9680	189,3478
77	62,4258	175,4815
78	62,8816	161,6736
79	63,3356	147,9223
80	63,7879	134,2261
81	64,2383	120,5836
82	64,6871	106,9933
83	65,1342	93,4538
84	65,5797	79,9636
85	66,0236	66,5215
86	66,4660	53,1261
87	66,9069	39,7761
88	67,3464	26,4703
89	67,7845	13,2075
90	68,2212	359,9865
91	68,6566	346,8062
92	69,0906	333,6654
93	69,5235	320,5630
94	69,9551	307,4979
95	70,3856	294,4691
96	70,8148	281,4756
97	71,2430	268,5163
98	71,6701	255,5902
99	72,0962	242,6964
100	72,5212	229,8340
101	72,9452	217,0020
102	73,3683	204,1994
103	73,7904	191,4254
104	74,2116	178,6792
105	74,6320	165,9597
106	75,0515	153,2663
107	75,4702	140,5980
108	75,8881	127,9541
109	76,3053	115,3336
110	76,7217	102,7359
111	77,1373	90,1601
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 :

$$A = \exp(-\alpha \cdot k \cdot 0.01). \qquad (6\text{-}6)$$

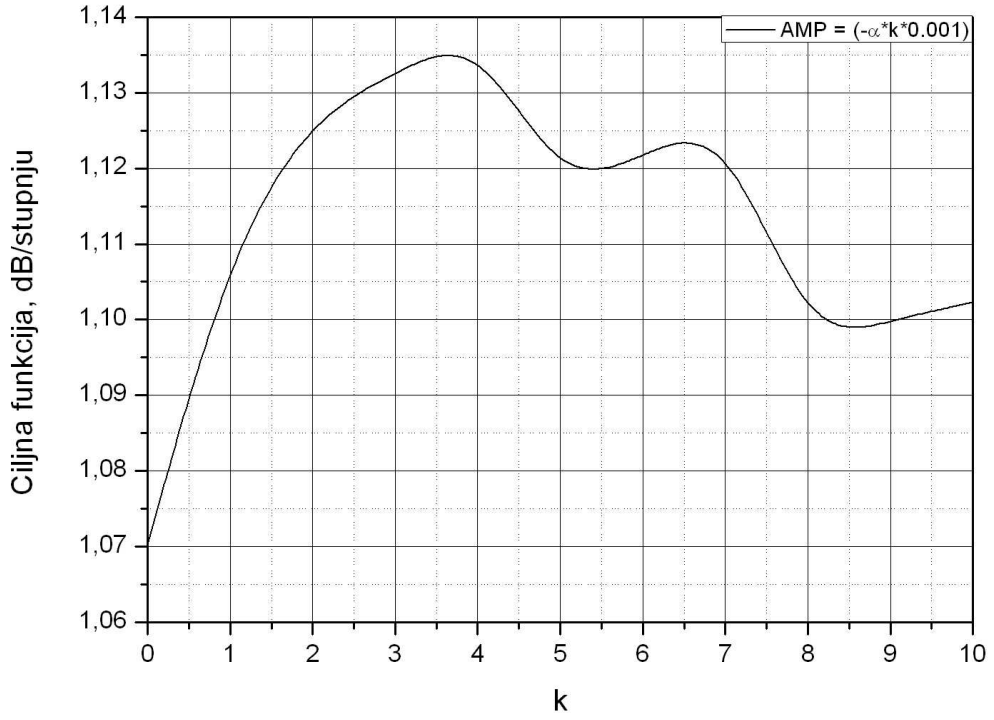
gdje α predstavlja eleveacijski kut položaja svakog elementa, a k_a koeficijent po kojemu se amplituda pobude eksponencijalno mijenja u rasponu $k_a \in [0,10]$.

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 $k_\alpha = 0°$,
- koeficijent promjene azimutalnog kuta $k_\beta = 5°$,
- promjena faze pobude;
- selekcijski kut konusa $\alpha_{sel} = 180°$,
- 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 $\alpha_{sel} = 180°$ 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 ($k_\alpha = 0°$, $k_\beta = 5°$), 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 (α_{sel}=180°).

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

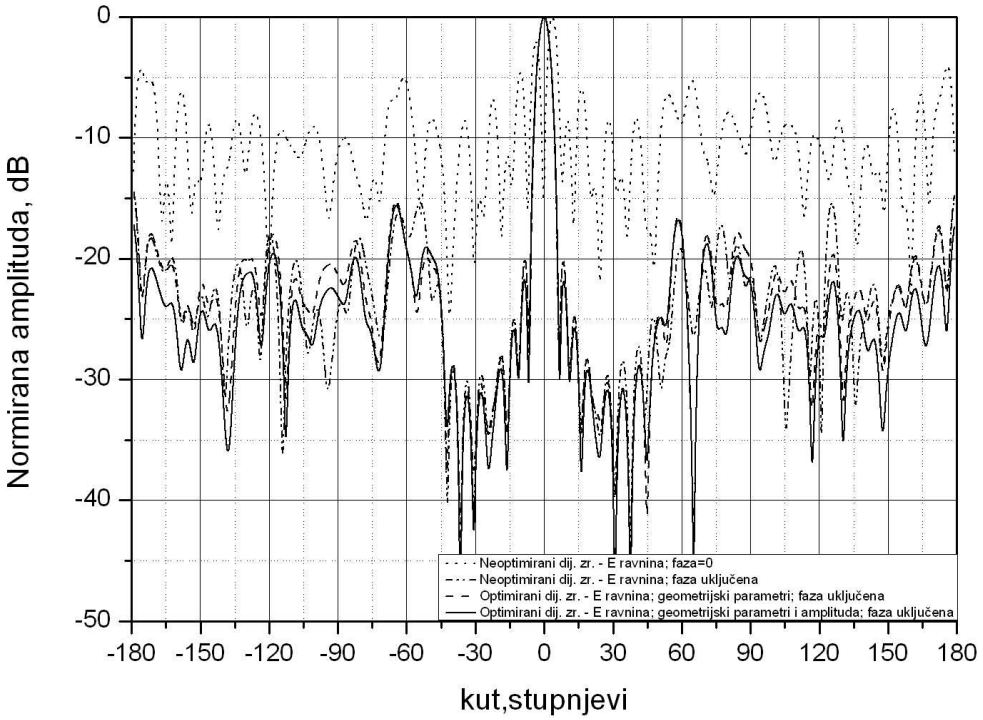
100	72,5212	4,0000	0,0550
101	72,9452	4,0000	0,0541
102	73,3683	4,0000	0,0531
103	73,7904	4,0000	0,0523
104	74,2116	4,0000	0,0514
105	74,6320	4,0000	0,0505
106	75,0515	4,0000	0,0497
107	75,4702	4,0000	0,0489
108	75,8881	4,0000	0,0480
109	76,3053	4,0000	0,0473
110	76,7217	4,0000	0,0465
111	77,1373	4,0000	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

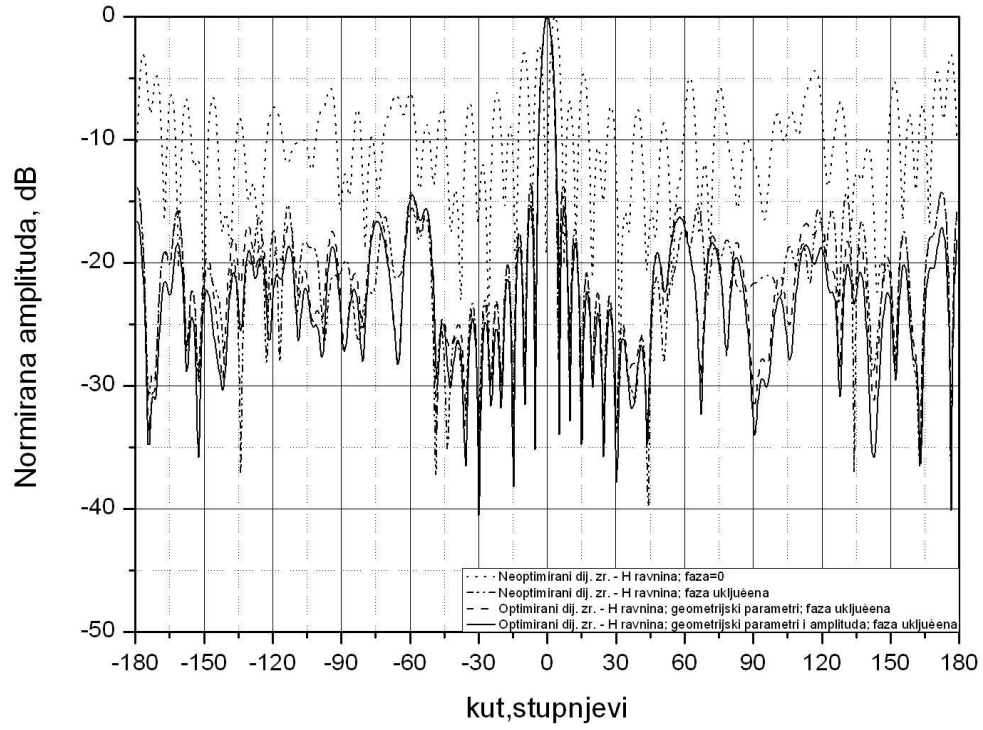
244	135,8332	4,0000	0,0044
245	136,4174	4,0000	0,0043
246	137,0080	4,0000	0,0042
247	137,6051	4,0000	0,0041
248	138,2092	4,0000	0,0040
249	138,8205	4,0000	0,0039
250	139,4393	4,0000	0,0038
251	140,0660	4,0000	0,0037
252	140,7010	4,0000	0,0036
253	141,3448	4,0000	0,0035
254	141,9977	4,0000	0,0034
255	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 latice. 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, α_{sel}=180°, 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**
Vrijednnost 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. Upravljati smjerom glavne latice ili usmjeravati 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		$\alpha_{sel} = 90°$ $r_s = 100$ cm Pn = 4 ? 91 ant. $k_g = 117$	$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 100$ cm Br. antena = 284 $k_\alpha = 0$ i $k_\beta = 5$	$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 30$ cm Br. antena = 90
		$CF_2 = 1,188$	**$CF_2 = 1,070$**	**$CF_2 = 0,382$**
				$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 35,3$ cm Br. antena = 90
				$CF_2 = 0,452$
				$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 52,9$ cm Br. antena = 145
				$CF_2 = 0,679$
Geometrijski i pobudni		$\alpha_{sel} = 90°$ $r_s = 100$ cm Pn = 4 ? 91 ant. $k_g = 117$ i $k_a = 7$	$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 100$ cm Br. antena = 284 $k_\alpha = 0$, $k_\beta = 5$ i $k_a = 4$	$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 30$ cm Br. antena = 90 $k_a = 7$
		$CF_2 = 1,222$	**$CF_2 = 1,135$**	**$CF_2 = 0,447$**
				$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 35,3$ cm Br. antena = 90 $k_a = 7$
				$CF_2 = 0,479$
				$\alpha_{sel} = 180°$ $r_s = 52,9$ cm Br. antena = 145 $k_a = 8$
				$CF_2 = 0,720$

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 prametara, 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:

- $BW_{-3dB} = 30°$
- $BW_{-10dB} = 30°$
- $SLL = A = 15$ 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

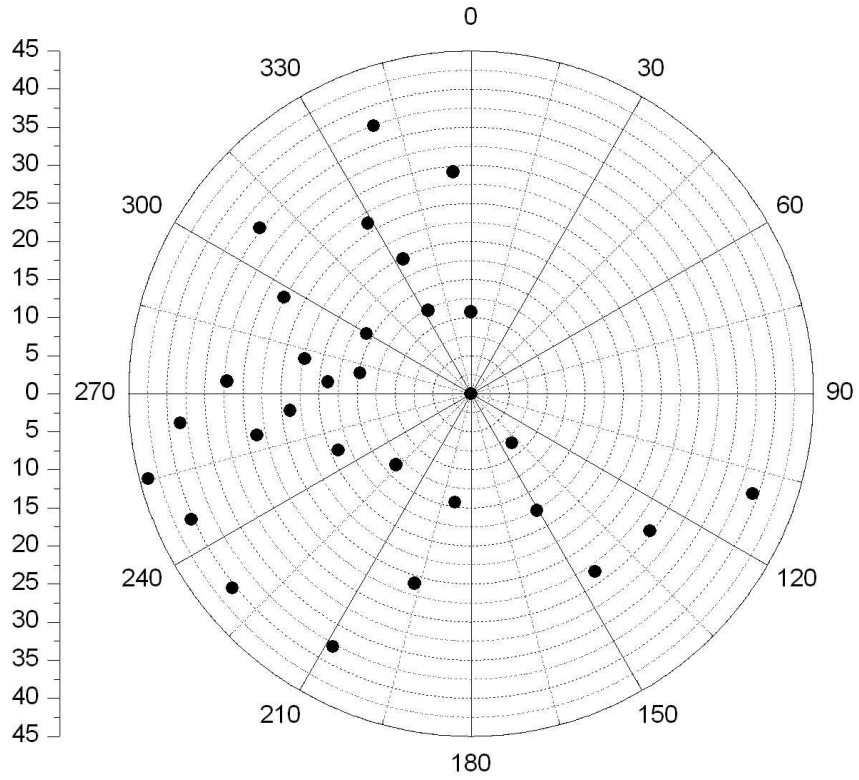
Prvi dio istraživanja slobodne konfiguracije odnosi se na ispitivanje utjecaja geometrijskih parametara na dijagram zračenja. U kontekstu geometrijskih parametara - mijenja se radijus sfere, te elevacijski i azimutalni položaj elemenata. Postavljene su granice unutar kojih se kreću vrijednosti geometrijskih 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°, 0°) (ukupno 31 antenski element na podlozi).

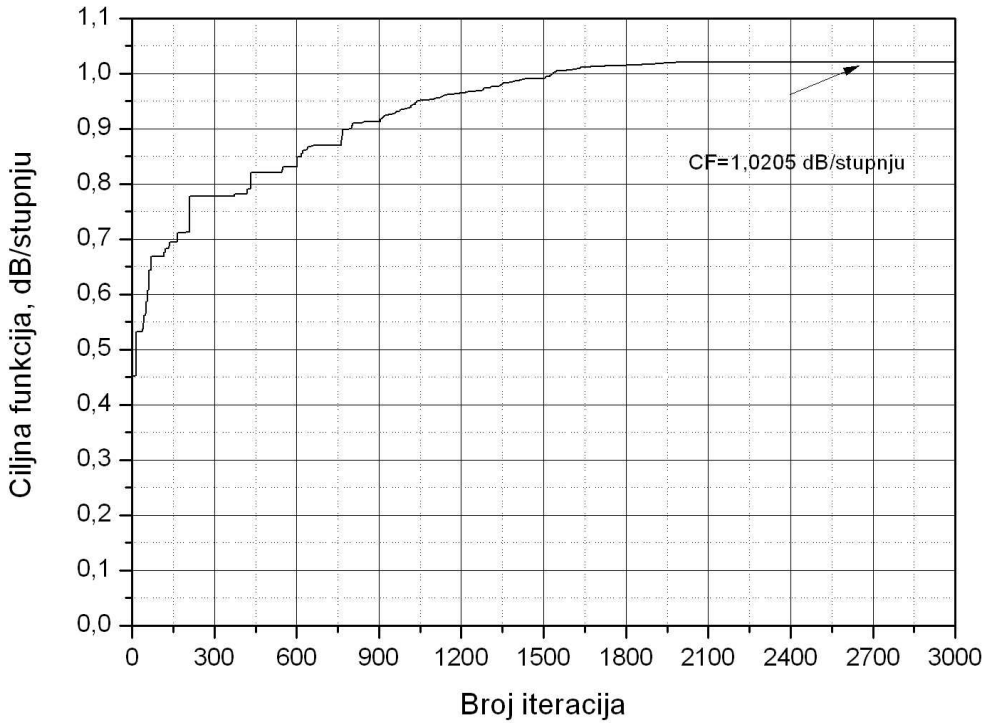
Granice unutar kojih se kreću vrijednosti svih parametara su:

- radijus sfere $r_s \in$ [30cm, 100cm];
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in$ [0°, 45°];
- azimutalni kut pozicije $\beta \in$ [0°, 360°].

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 ciljne funkcije CF_2 slobodne konfiguracije elemenata postignuta PSO optimizacijom (uz masku) geometrijskih parametara – radijusa sfere i položaja elemenata.

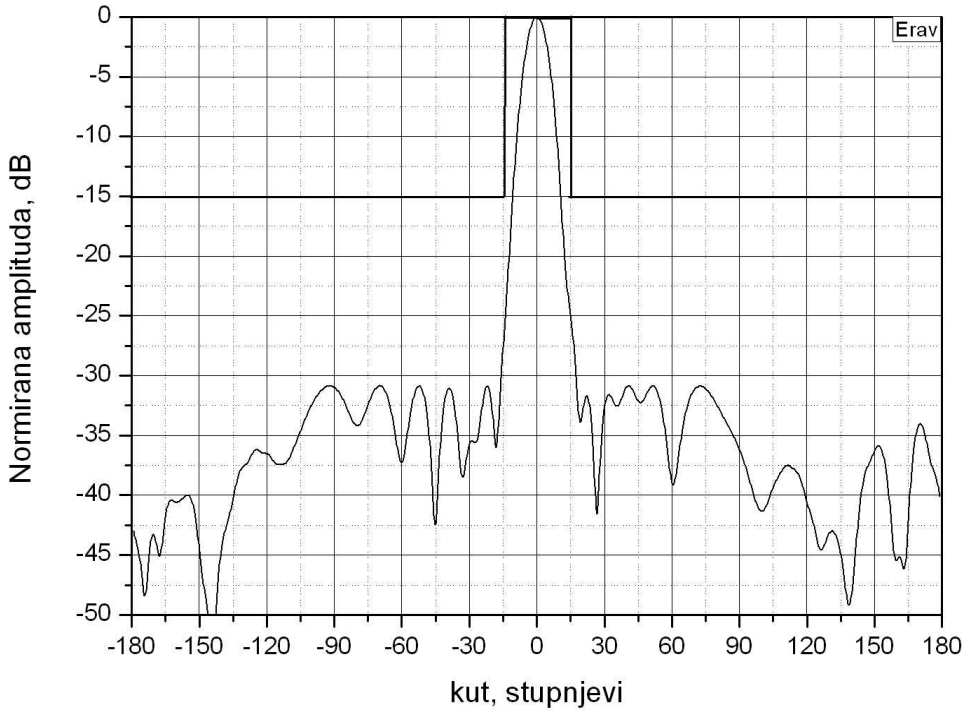
Iz Slike 7.2. može se vidjeti da je najveća vrijednost ciljne funkcije 1,020 dB/stupnju uz koju je postignuta optimalna konfiguracija elemenata na sferi (Slika 7.1.) koja daje optimalni dijagram zračenja. U Tablici 7.1. dani su podaci o optimalnom položaju antena na sferi uz prethodno zadane uvjete.

Tablica 7.1. Optimalni radijus sfere i pripadajući položaj 31 antene slobodne konfiguracije niza.

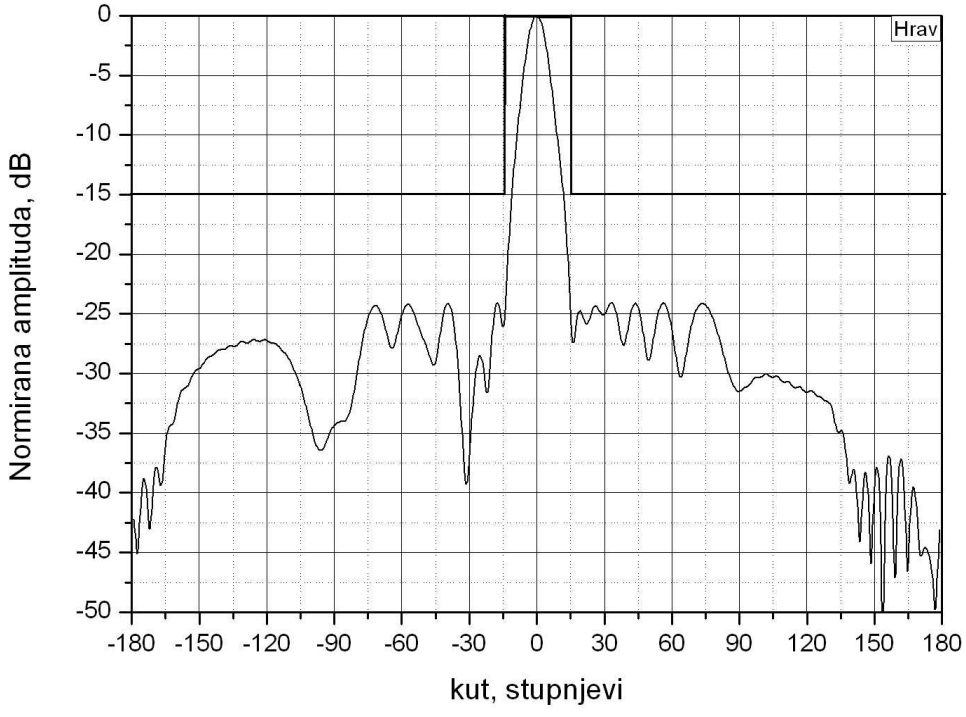
	r_s, cm	Alfa, °	Beta, °
1.	99,9797309212	0,00	0,00
2.		37,4007659973	339,9964607877
3.		25,9862860321	196,4993872402
4.		19,7786917646	333,2101030787
5.		29,1958761999	355,3814759107
6.		13,5674352442	226,3559427977
7.		29,6249125942	127,4110327252
8.		17,6239332416	150,6158486363
9.		37,8628862392	208,6289358039
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°, 0°).

Amplituda pobude predstavljena je eksponencijalnom funkcijom, a njen je oblik:

$$AMP = 2\text{-}\exp(\alpha \cdot k \cdot 0{,}0007), \tag{7-1}$$

gdje su:

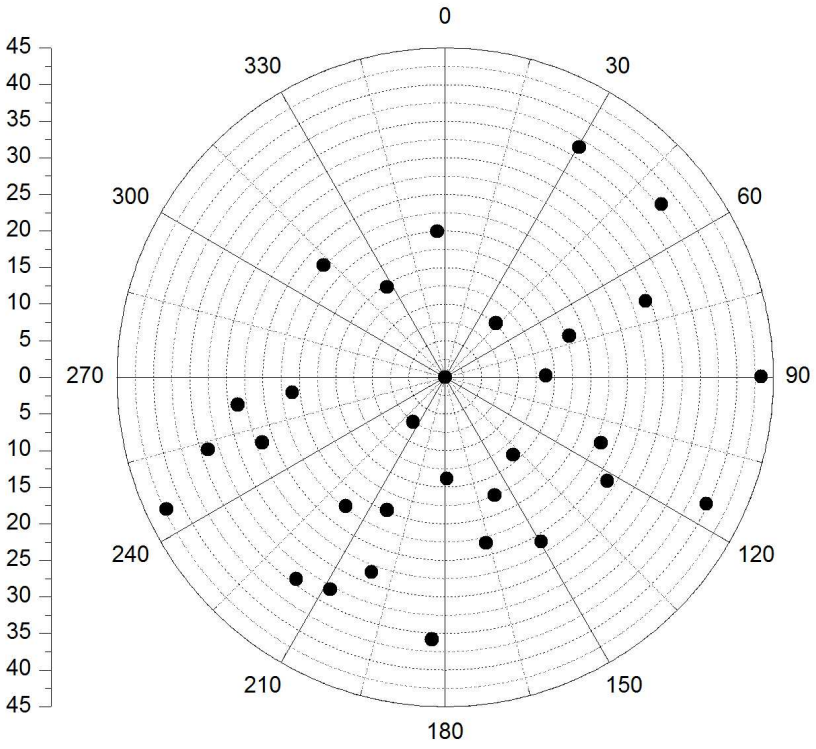
$k=k_a$ - koeficijent po kojemu se mijenja amplituda i kreće se u intervalu [-10:10],

α – elevacijski kut prstena na kojemu su smješteni antenski elementi.

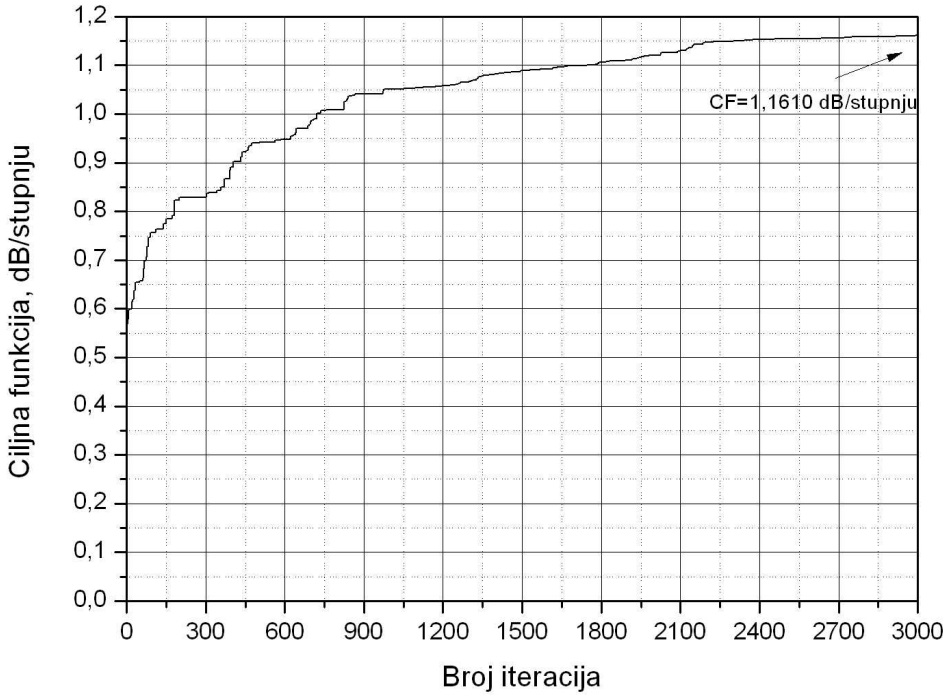
Vrijednsoti parametri kreću se u sljedećim granicama:

- radijus sfere $r_s \in$ [30cm, 100cm];
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in$ [0°, 45°];
- azimutalni kut pozicije $\beta \in$ [0°, 360°];
- 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.

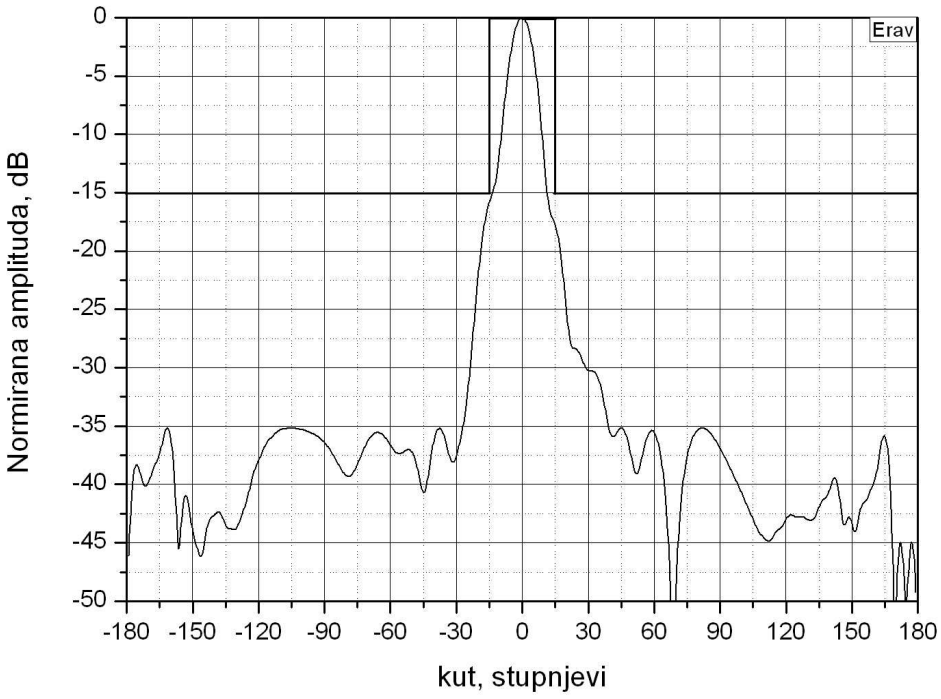
Maksimalna je vrijednost ciljne funkcije 1,161 dB/stupnju. U Tablici 7.2. prva kolona predstavlja radijus sfere za koji se postiže optimalni dijagram zračenja, a aktivni elementi koji to omogućuju smješteni su na pozicijama prikazanih u drugoj i trećoj koloni. Posljednja kolona rezervirana je za iznos 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.

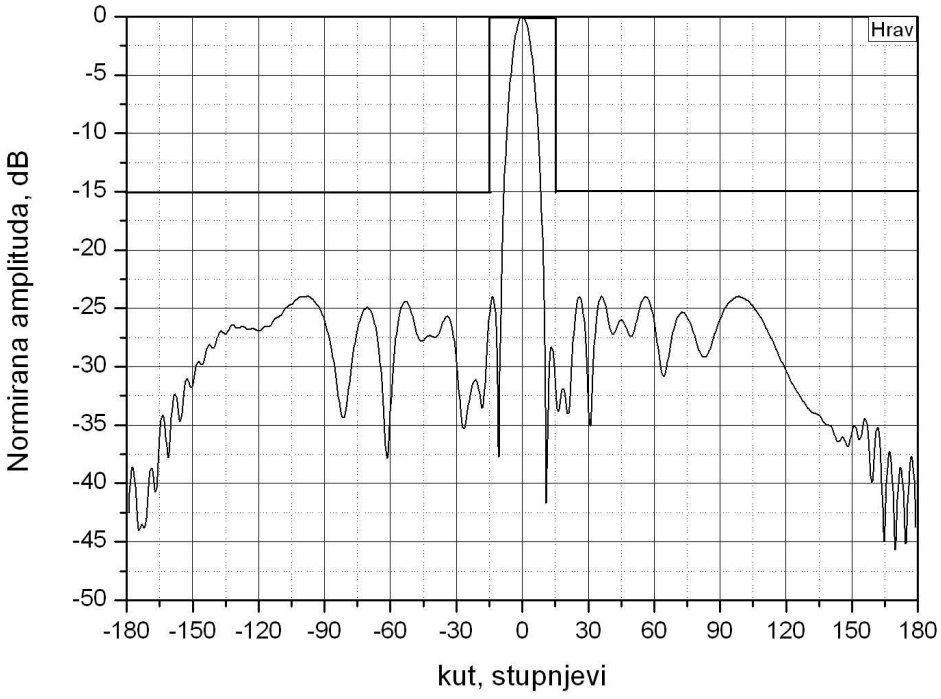
	r_s, cm	Alfa, °	Beta, °	AMP(k_a=3,13)
1.	98,9325255665	0,00	0,00	1,0000
2.		33,9492140395	253,1134863863	0,9229
3.		17,4697861457	157,0977272336	0,9610
4.		22,5696209241	312,6047168466	0,9494
5.		22,2557816896	217,6633710785	0,9501
6.		19,7951464712	203,5717685359	0,9557
7.		29,3961453510	69,3079796271	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:

$$AMP = 2\text{-}\exp(\alpha \cdot k_a \cdot 0{,}0007), \tag{7-2}$$

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:

$$\Phi = a + k_{POL} \cdot |b - c| \cdot 0{,}01, \tag{7-3}$$

gdje su:

k_{POL} - koeficijent po kojemu se mijenja polarizacija, $k_{POL} \in$ [-10:10],

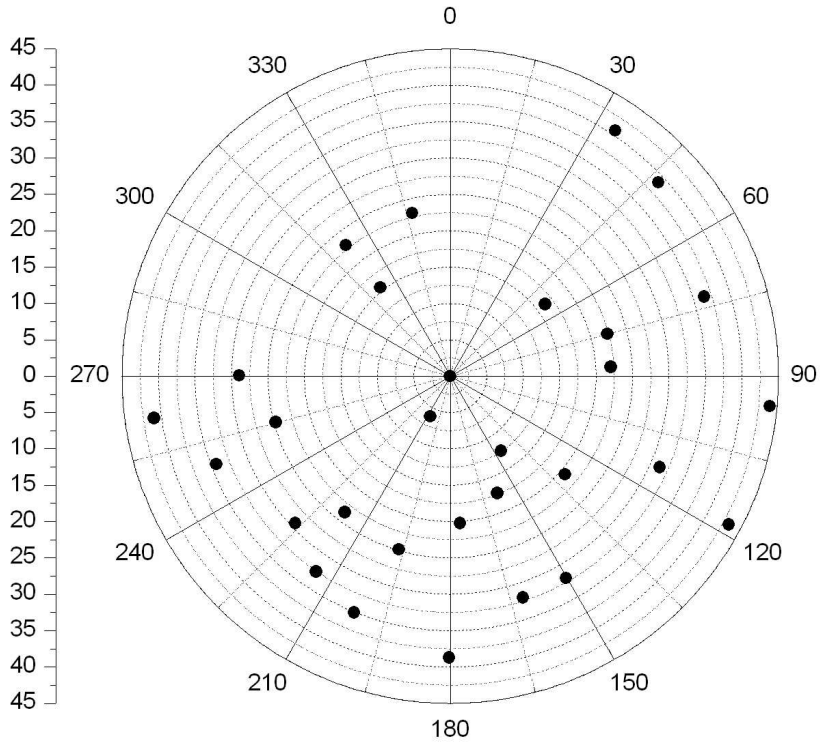
a – azimutalni (phi) kut u lokalnom koordinatnom sustavu,

b – brojač po elementima, $b \in$ [c:1],

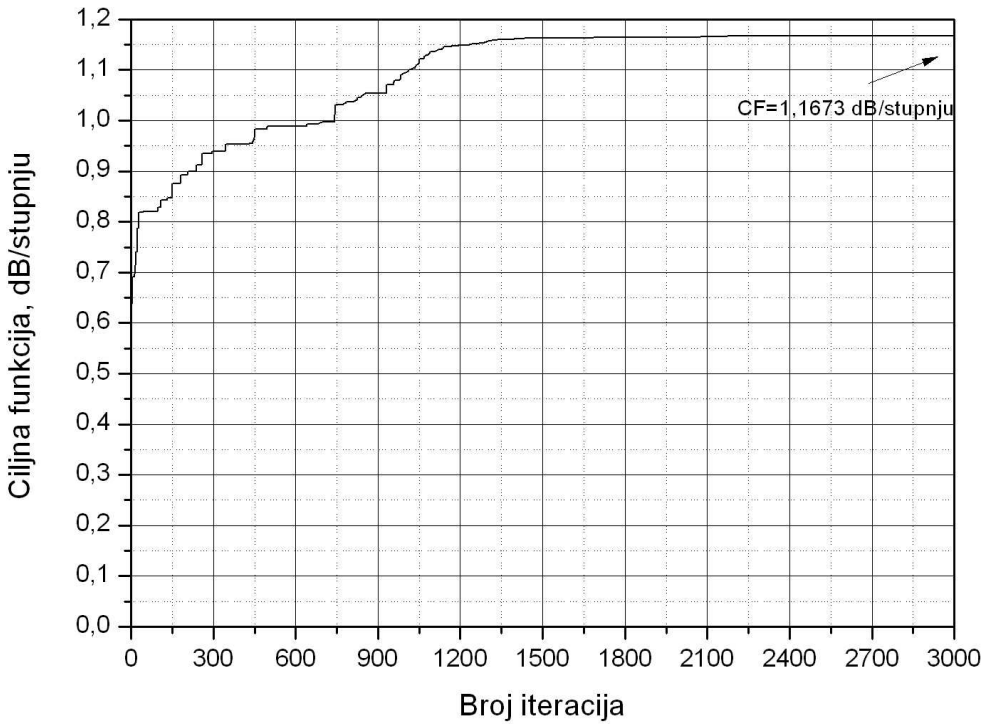
c – ukupni broj elemenata + centralni

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 $r_s \in$ [30cm, 100cm];
- elevacijski kut pozicije $\alpha \in$ [0°, 45°];
- azimutalni kut pozicije $\beta \in$ [0°, 360°];
- 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) dijgrama 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.

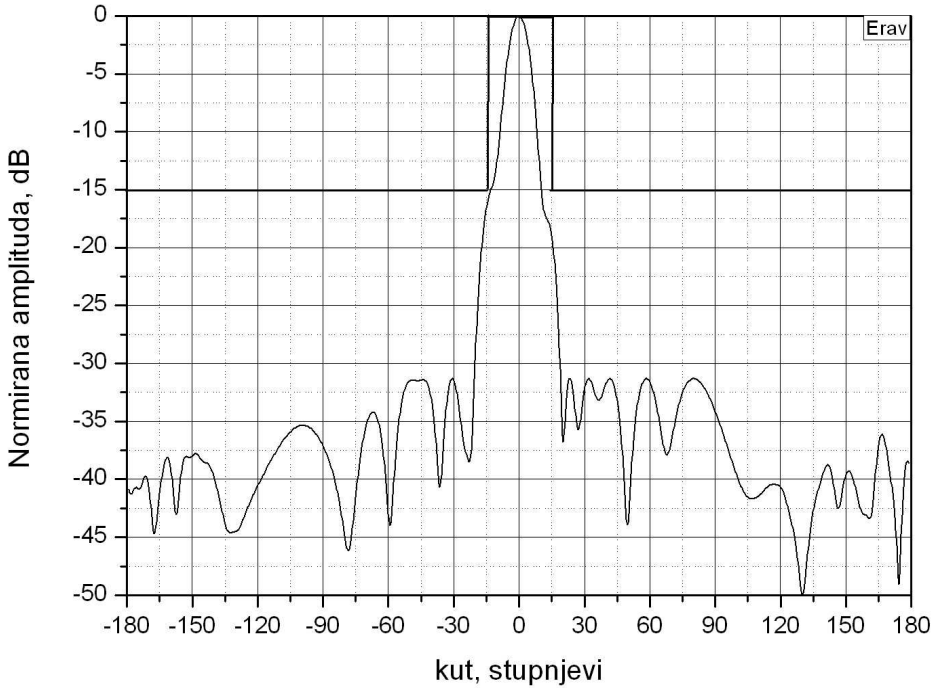
Tablica 7.3. Optimalni radijus sfere, položaj 31 antene, te iznos amplitude i polarizacije pobude slobodne konfiguracije niza.

	r_s, cm	**Alfa, °**	**Beta, °**	**AMP**(k_a=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

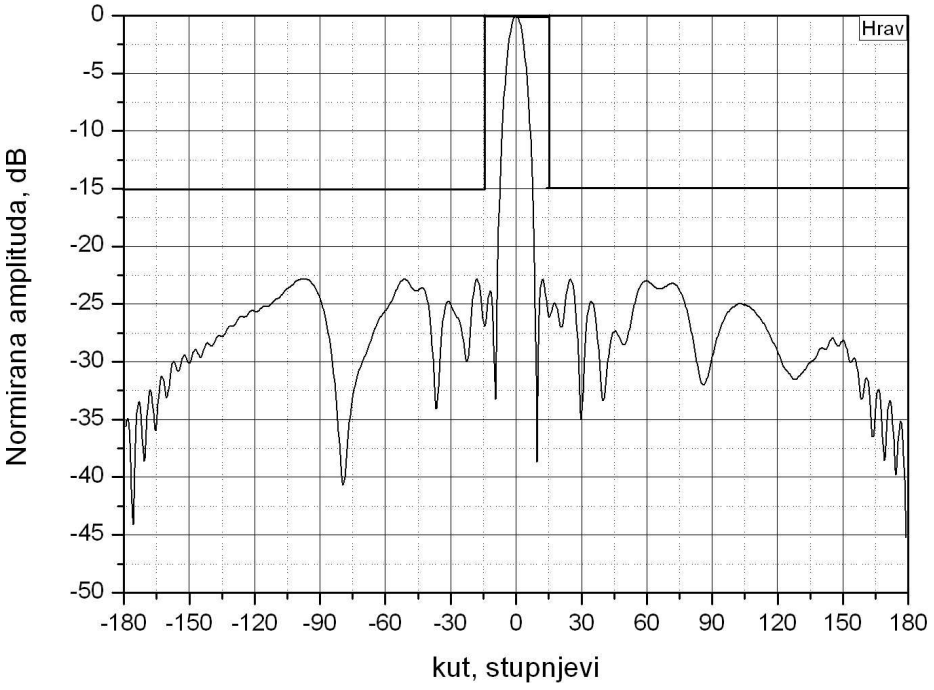
Maska koja je postavljena na karakteristične veličine dijagrama zračenja iznosi: A_{max} = -15 dB, $BW_{-3dB\ max}$= 30° i $BW_{-10dB\ max}$= 30°, ispostavilo se da je dobar izbor jer uz optimiranje ovih parametara mogao se postići željeni dijagram zračenja.

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
	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			
GEOMETRIJA		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			
	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		
GEOMETRIJA + AMPLITUDA		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		

		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 ($\boldsymbol{k_{pol}}$= 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	
G		40,6418179458	33,8220681354	0,9097	0,6387	
E		22,0532495370	86,6782094682	0,9519	0,7186	
O		24,7477232053	255,1647387606	0,9459	0,7984	
M		29,3273487784	226,4253997483	0,9356	0,8783	
+		20,2459047298	176,2346861377	0,9560	0,9581	
A		15,4945296174	321,9160369024	0,9665	1,0379	
M		38,7122920125	180,2354941682	0,9141	1,1178	
P		23,0059293542	346,9037468664	0,9498	1,1976	
+		32,0545716496	161,8481150002	0,9294	1,2775	
P		43,9950913038	95,4265863687	0,9018	1,3573	
O		47,7083442660	248,9962095048	0,8931	1,4372	
L		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	

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].

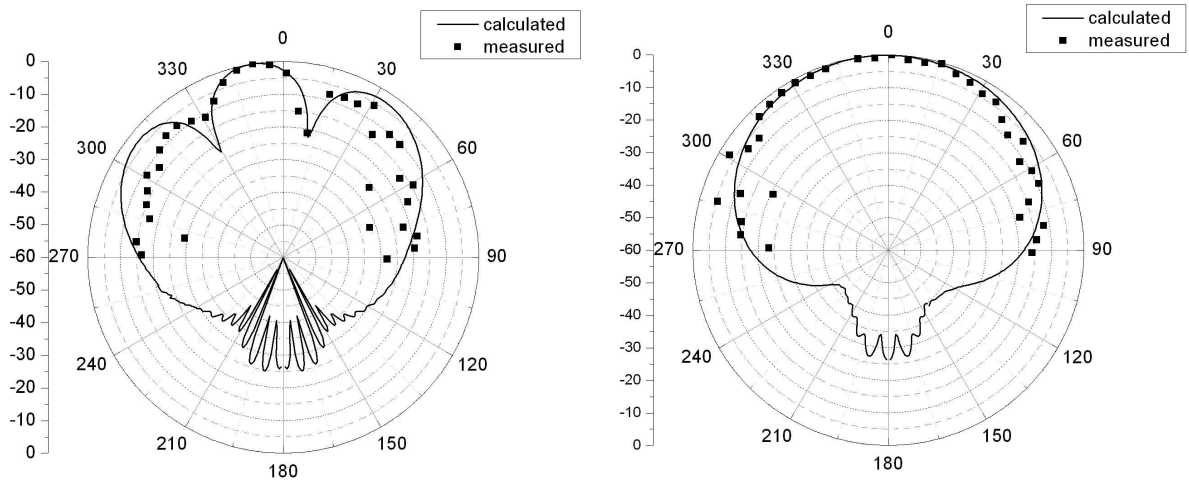
Parametri mjerenja su sljedeći:

- radijus sfere r_s=69 cm,
- radijus valovoda r_w=6 cm,
- položaj antena: α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=18°, β_{21}=90°,
- 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=6cm) na sferi radijusa r_s=69cm (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=18°, β_{21}=90°) [57].



a) b)

Slika 8.2. Normirani dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=18°, β_{21}=90°) [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:

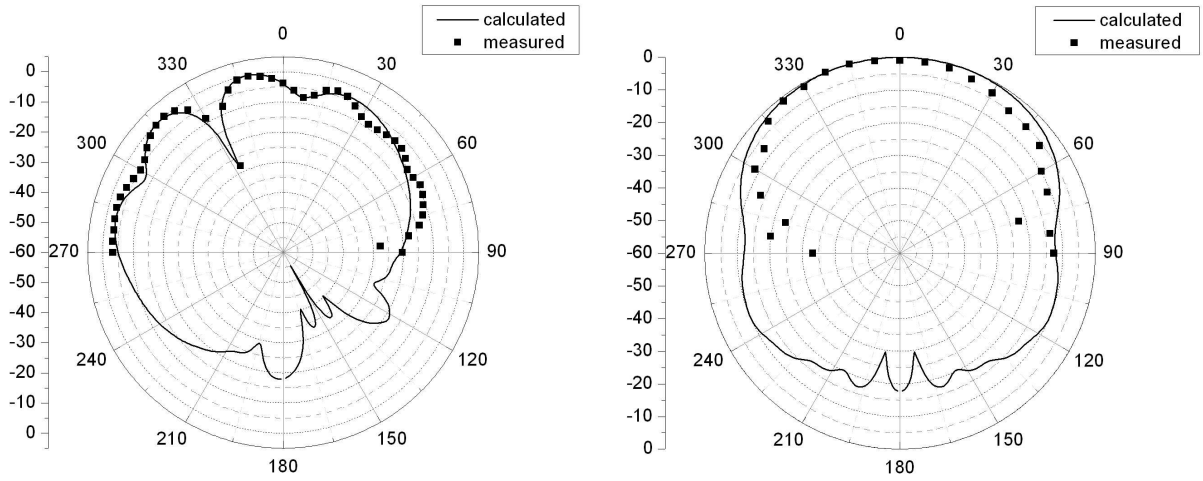
Sljedeći ispitivani sferni antenski niz je niz od šest valovoda koji mogu formirati različite podnizove.

Parametri mjerenja:

- radijus sfere r_s=30 cm,
- radijus valovoda r_w=6 cm,
- položaj antena: α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°,
- 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. Sferni eksperimentalni model kojeg predstavljaju šest valovoda (radijus valovoda r_w=6cm) na sferi radijusa r_s=30cm (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°) [57].

U prvom od sljedeća tri ispitivanja odabrana su dva valovoda na mjestima $\alpha_1=0^0$, $\beta_{11}=0^0$; $\alpha_2=56^0$, $\beta_{21}=180^0$, a mjeren je i izračunat diferencijalni dijagram zračenja prikazan Slikom 8.4.



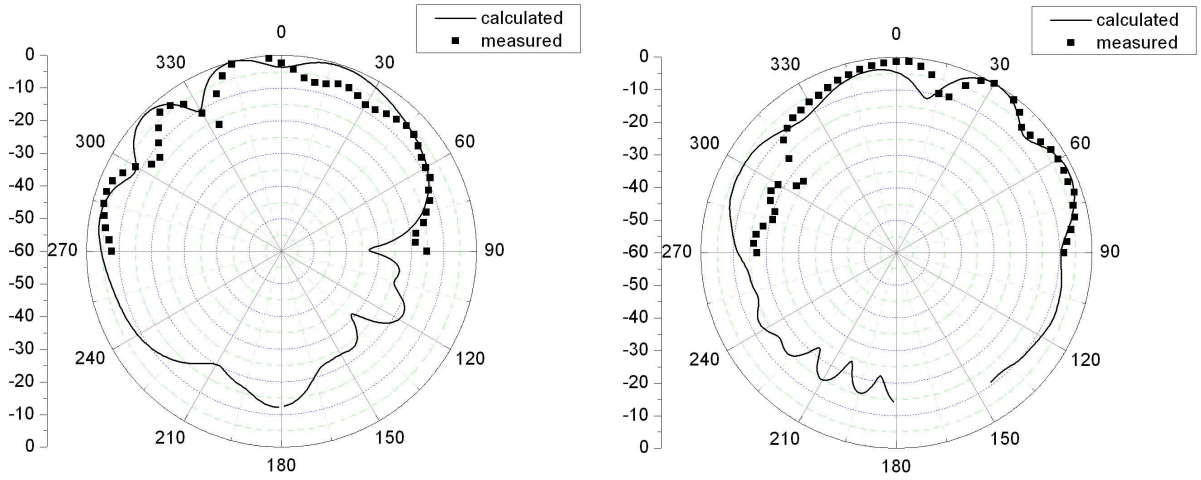
a) b)

Slika 8.4. Normirani diferencijalni dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=180°) [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° 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 α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=108°, β_{22}=180°. 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.

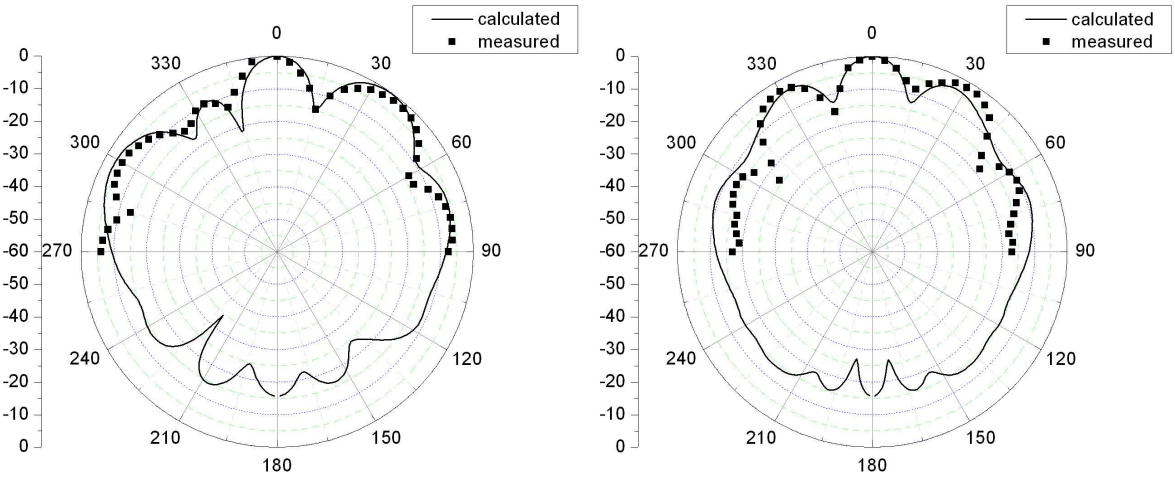


a) b)

Slika 8.5. Normirani dijagram zračenja tri valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=108°, β_{22}=180°) [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.



a) b)

Slika 8.6. Normirani dijagram zračenja šest valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°) [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.

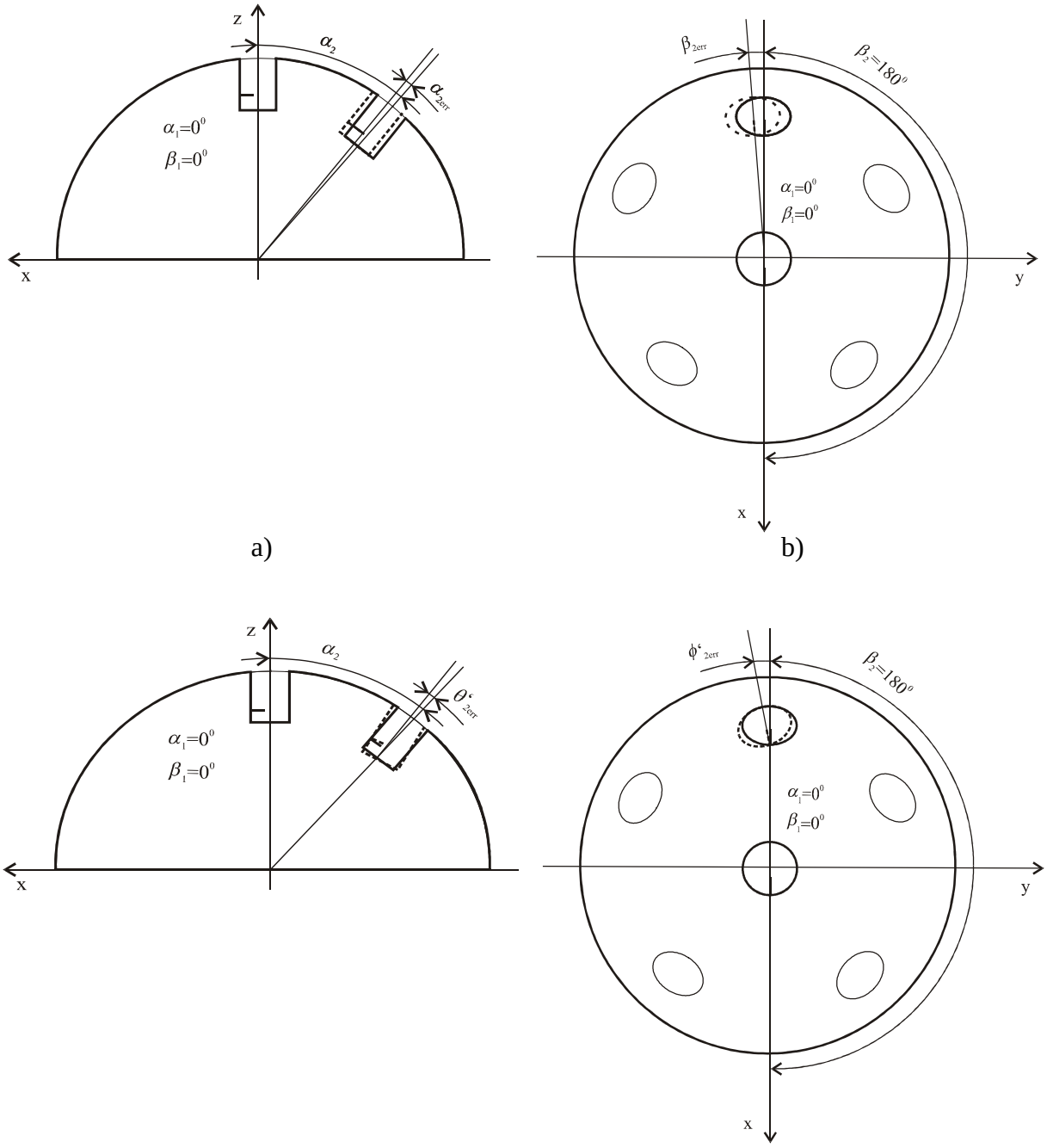
Sljedeći primjeri istraživanja ispituju upravo na pogreške pri izradi modela antenskog niza.

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 (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°). 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:

$$r_{se} = r_s + r_{serr};\ r_{we} = r_w + r_{werr} \tag{8-1}$$

$$\alpha_{2e} = \alpha_2 + \alpha_{2err};\ \beta_{2e} = \beta_2 + \beta_{2err} \tag{8-2}$$

$$\theta'_e = \theta' + \theta'_{2err};\ \phi'_e = \phi' + \phi'_{2err}, \tag{8-3}$$

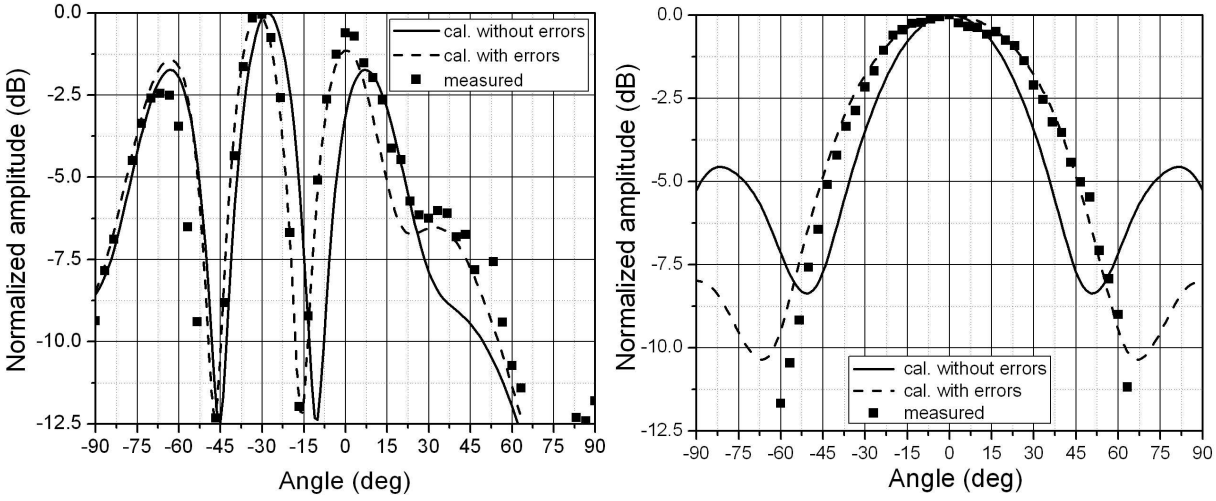
gdje su θ' i ϕ' koordinate u lokalnom koodinantnom sustavu.

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 λ_0, a udaljenost centralnog valovoda od valovoda u sljedećem prstenu iznosi 1,71 λ_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:

- $\alpha_{2err} = 2°$,
- $\beta_{2err} = 0°$,
- $\theta'_{2err} = 5°$,
- $\phi'_{2err} = 0°$,
- $r_{serr} = 0$ cm i
- $r_{werr} = 0$ cm.

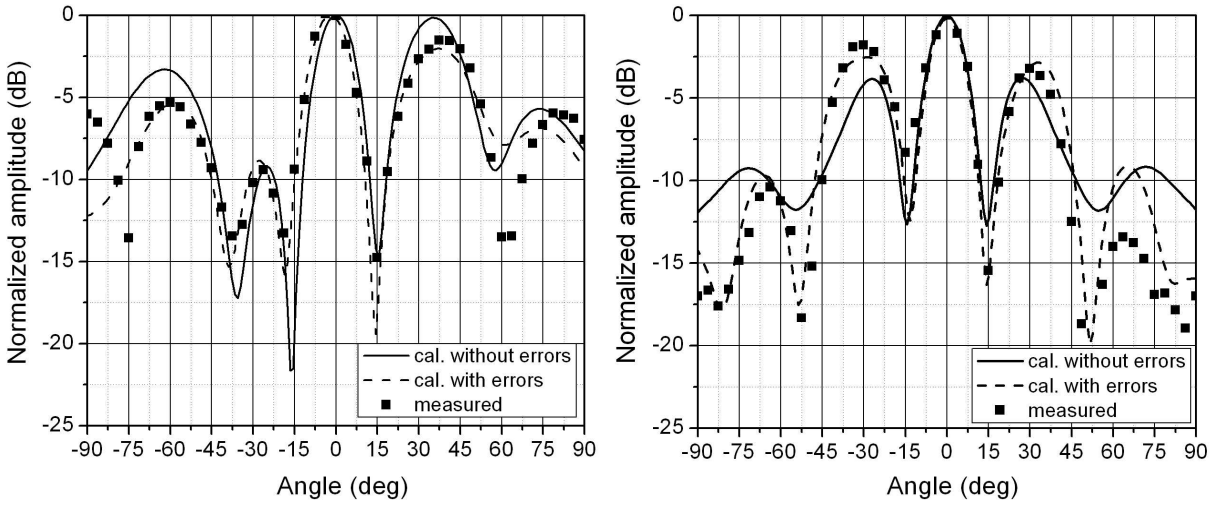


a) b)

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° 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 eksperimntalnog 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.



a) b)

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, Pn=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.

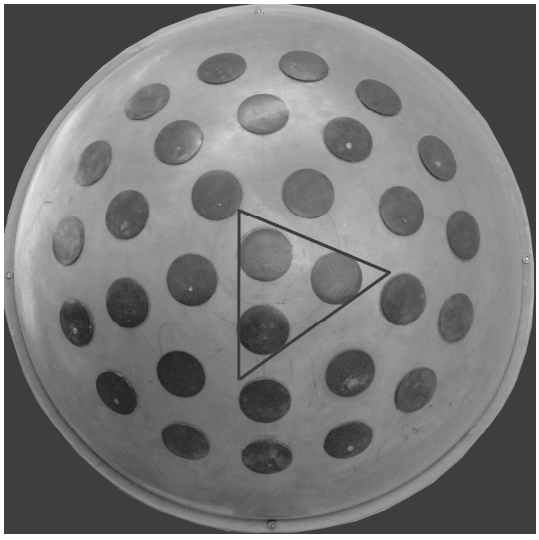
Laboratorijski model prikazan je Slikom 8.10., a zračenje takvog niza obrađeno je u [59].

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=30cm 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:

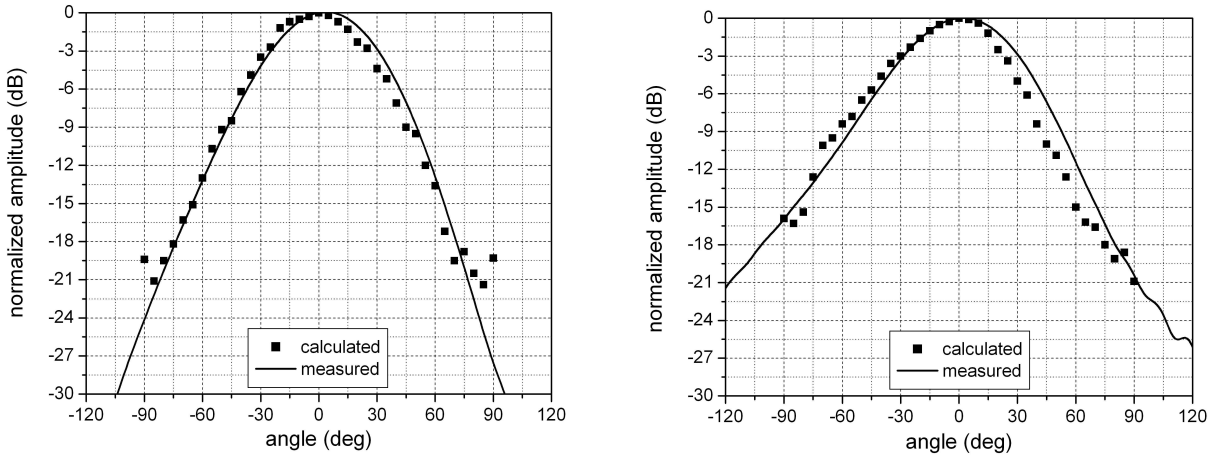
- radijus sfere: r_s = 30 cm,
- radijus mikrostrip antene: r_w = 6 cm,
- frekvencija: f=1,45 GHz,
- amplituda pobude svakog elementa je konstantna i
- promjena faze pobude.

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].

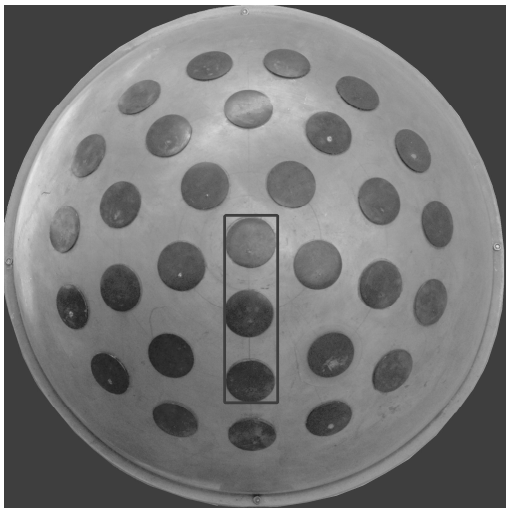
$\theta_{max}=0^0$ i $\varphi_{max}=0^0$ predstavljaju koordinate maksimalnog zračenja postavljenog u centar sfere. Mjereni podaci prate izračunatu krivulju polja uz manja odstupanja zbog neidealnih uvjeta mjerenja.



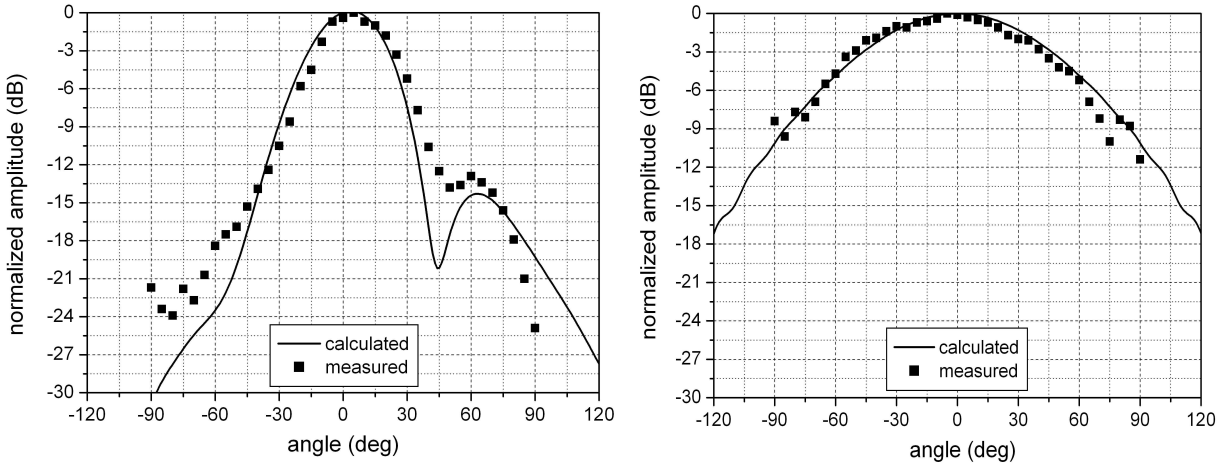
a) b)

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.

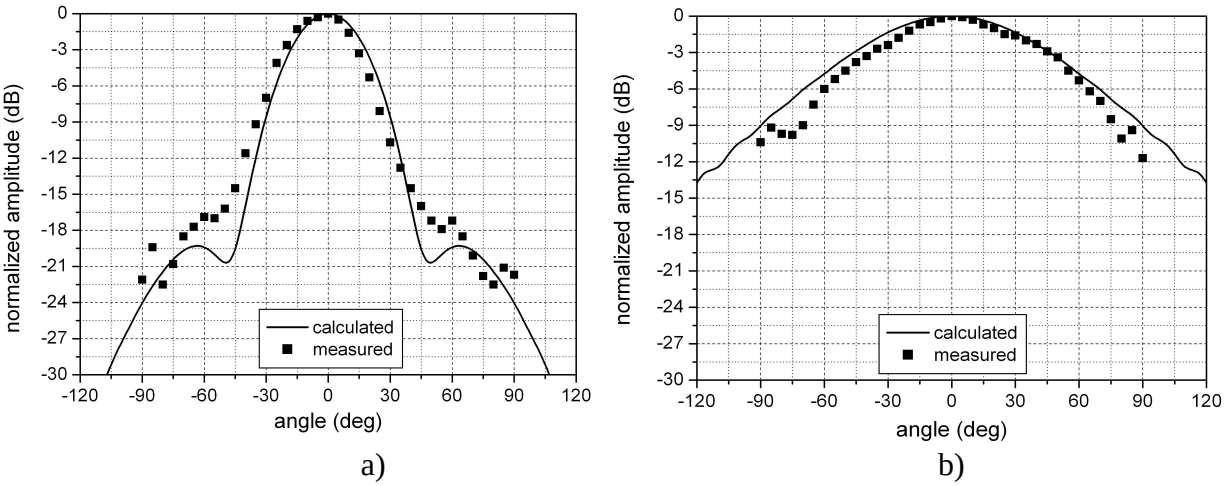


Slika 8.13. Drugi eksperimentalni podniz tri mikrotrakaste antene ($\alpha_6=0^0$, $\beta_{61}=0^0$, $\alpha_5=15^0$, $\beta_{51}=0^0$, $\alpha_4=30^0$, $\beta_{41}=0^0$) [59].



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 izmjerenog 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.

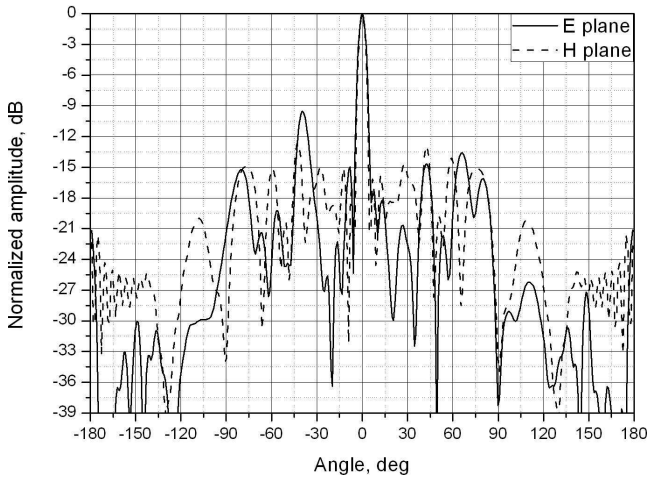
Kako bi se vidio doprinos neuniformne raspodjele elemenata na površini sfere, prvo je ispitan uniformni raspored antena. I dalje je u pitanju ikosaedarska konfiguracija, a selekcijskim kutom od 75° obuhvaćena je 71 antena u nizu – cilj: uži i usmjeren dijagram zračenja. Kut maksimalnog zračenja niza 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 (3,83λ),
- radijus valovoda: r_w=6 cm (0,35λ),
- 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 α_l=0°, 15°, 30°, 45°, 60° 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: α_l=0°, 15°, 30°, 45°, 60° 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 dijgrama 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:**

$$\alpha_{l1} = A_1 + B_1 \cdot e^{\left(\frac{l}{C_1}\right)} \tag{8-4}$$

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 ($\alpha_{min} = 6{,}55^0$) određena je minimalnim dopuštenim razmakom između dvije antene (ne smije pasti ispod $\lambda/2$).

ii) **raspodjela po polinomnoj funkciji:**

$$\alpha_{l2} = A_2 + B_2 \cdot l + C_2 \cdot l^2 + D_2 \cdot l^3, \tag{8-5}$$

također konveksnoj funkciji, a α_{l2} i l imaju isto značenje kao u prethodnom izrazu.

iii) **po trigonometrijskoj funkciji:**

$$\alpha_{l3} = A_3 + B_3 \cdot \cos\left(\frac{l}{C_3} - D_3\right), \tag{8-6}$$

iv) **po logaritamskoj funkciji:**

$$\alpha_{l4} = A_4 + B_4 \cdot \log(l + C_4) \tag{8-7}$$

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°) 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_{l5} (°)
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 SHEME	α_{5i} (°)	α_{4i} (°)	α_{3i} (°)	α_{2i} (°)	α_{1i} (°)
Eksponencijalna(*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 razultat 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***(**Angle**) $\geq 90^0$ 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 (°)	**HPBW (°)**	**HPBW (°)**	**HPBW (°)**	**HPBW (°)**	**HPBW (°)**
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.

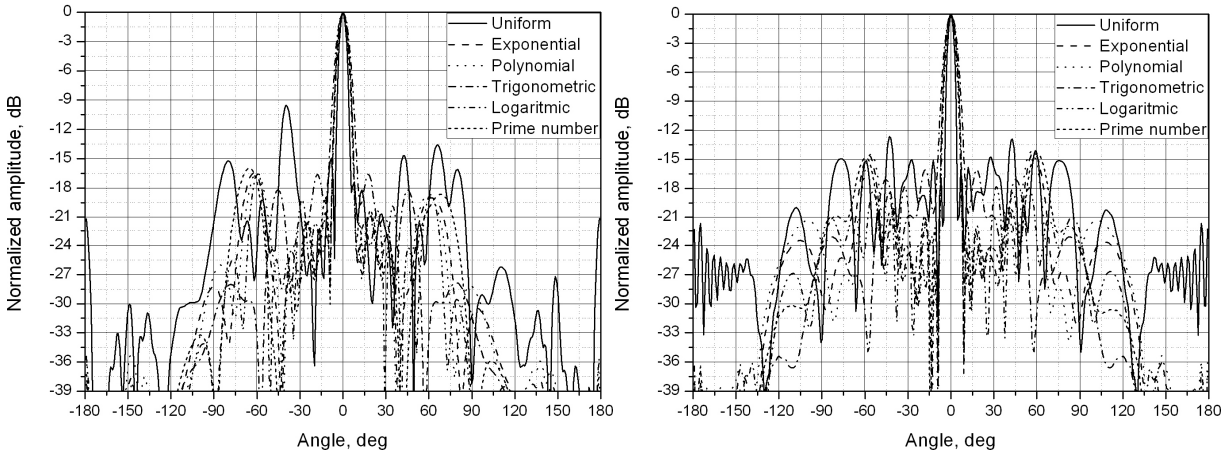
Tablica 8.8. Udaljenost susjednih antenskih elemenata po prstenu za različite neuniformne konfiguracije elemenata (N_l je broj antena raspoređenih na l^{tom} prstenu) [56].

$d_{lk} = \frac{2\pi r_s \sin\alpha_l}{N_l}$	**Uniform.**	**Eksponen.**	**Polinom.**	**Trigonomet.**	**Logaritam.**	**Prosti brojevi**
Min. razmak $\boldsymbol{d_{lk}/\lambda_0}$	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 $\boldsymbol{d_{lk}/\lambda_0}$	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:

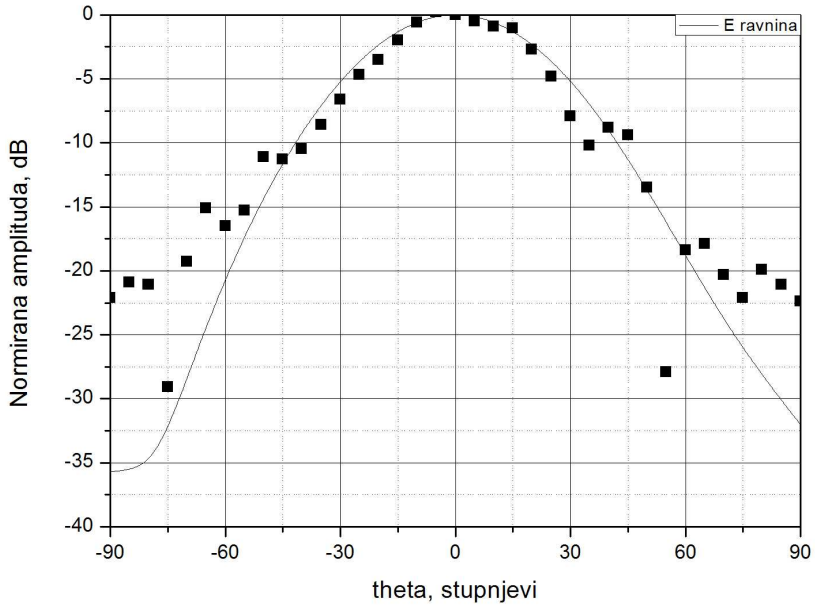
Raspored antena na mjerenom modelu niza na sferi je ikosaedarski s podjelom osnovnog trokuta ikosaedra na 4 dijela (Pn = 4). Za niz ikosaedarskog rasporeda načinjeno je mjerenje dijagrama zračenja za dva podniza koja se međusobno razlikuju po elevacijskom kutu prstena sa pet mikrotrakastih antena. Na 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 kotroliranom podjelom signala koji se dovodi antenama.
Parametri mjerenja za ikosaedarski niz na sferi, veće gustoće elemenata:

- radijus sfere r_s=30 cm,
- radijus mikrotarkastih antena r_p=2,65 cm,
- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:
  prvi prsten: α_1=0°, β_{11}=0°;
  drugi prsten: α_2=15°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216° i β_{25}=288°;
- 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.

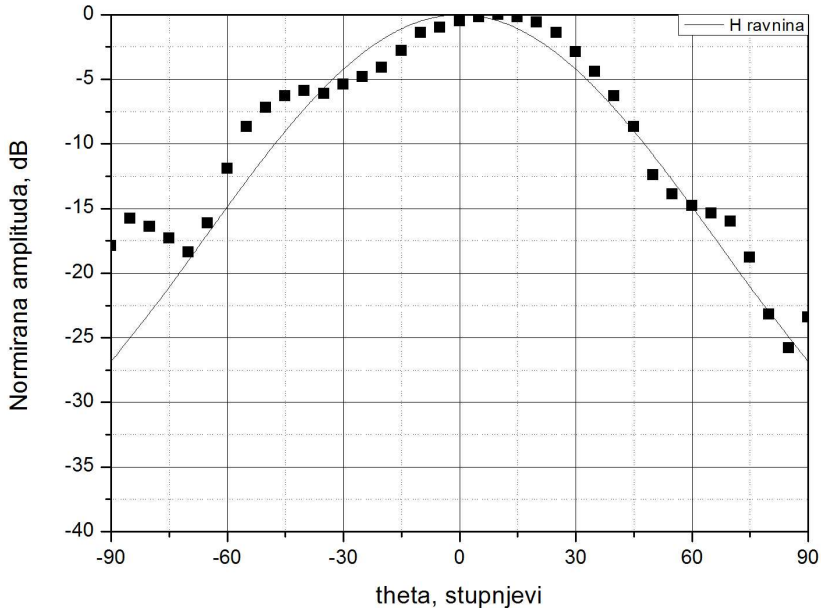
Slika 8.18. prikazuje model ikosaedarskog niza s 45 mikrotrakastih antena na sferi uz označene aktivne antene niza.

Slika 8.18. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=15°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°).

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 (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=15°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°): a) E ravnina b) H ravnina.

Parametri mjerenja za ikosaedarski niz na sferi, manje gustoće elemenata:

- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:

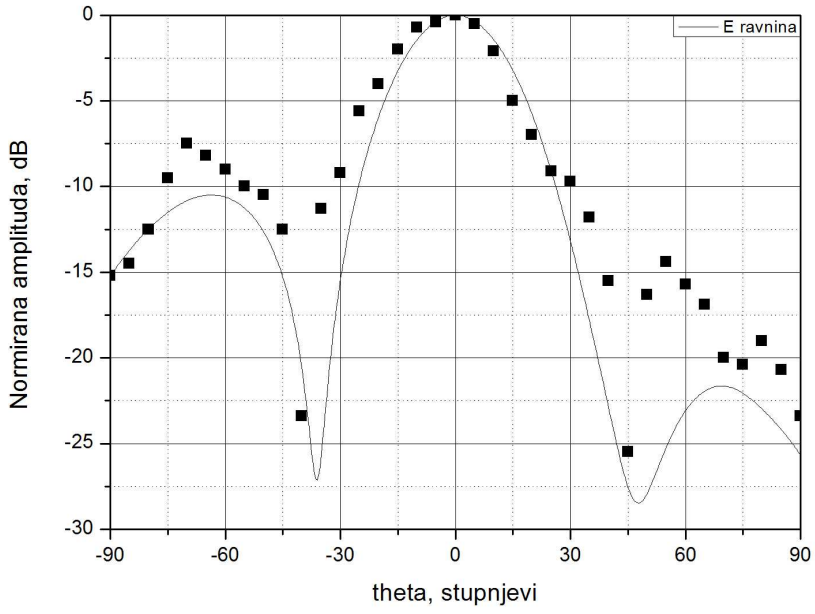
  prvi prsten: α_1=0°, β_{11}=0°;

  drugi prsten: α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216° i β_{25}=288°;

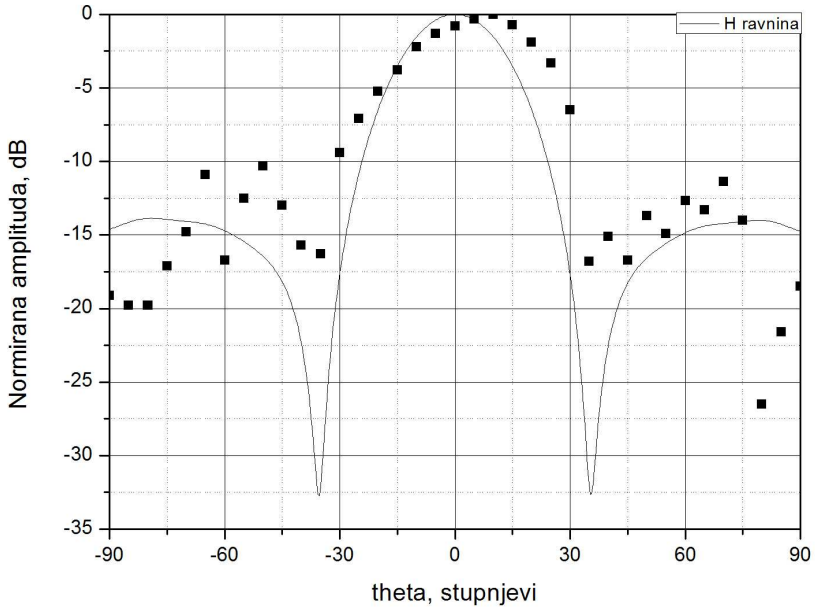
Ova mjerena konfiguracija je podniz osnovnog niza s Pn=4 uz pobudu neparnih mikrotrakastih antena drugog prstena kao što je prikazano na Slici 8.20.

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 (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°).



a)



b)

Slika 8.21. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°): 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 (15^0 i 30^0).

Odstupanja izmjerenih i računski dobivenih dijagrama zračenja ova dva niza, u najvećoj mjeri, jesu rezultat refleksije u prostoru u kojem je mjerenje izvedeno. Pogreške očitanja 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 rapoređeno po pravilu spralne 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 mikrotarkastih antena r_p=2,65 cm,
- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:

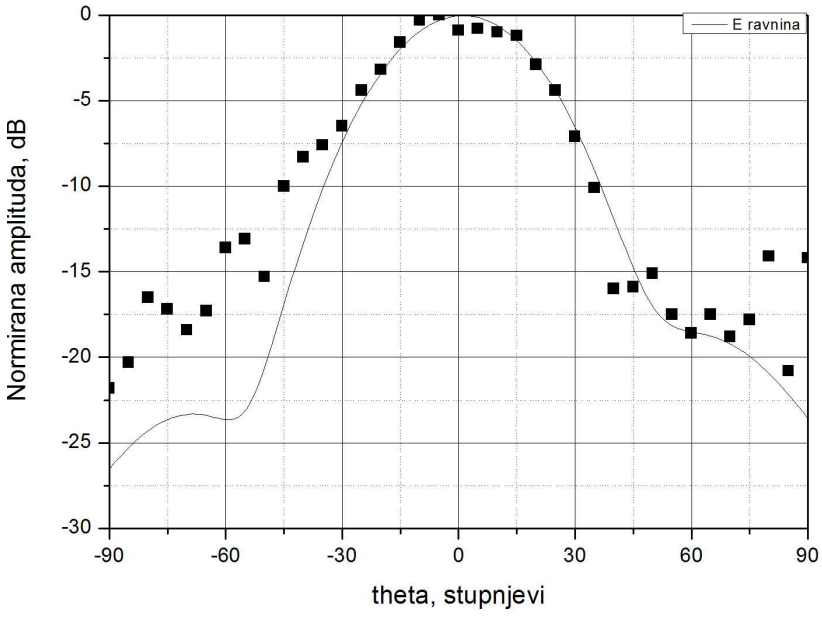
α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=11,48°, β_2=153,07°; α_3=14,07°, β_3=226,18°; α_4=16,26°, β_4=286,03°; α_5=18,19°, β_5=337,99°; α_6=19,95°, β_6=24,58°.

- frekvencija f=1,7 GHz;
- amplituda pobude je konstantna;
- fazna kompenzacija pobude nije uključena.

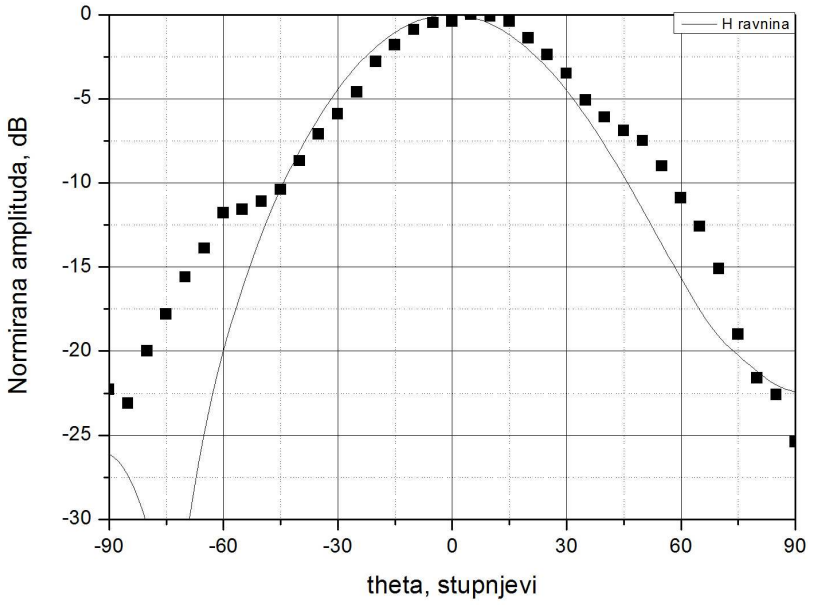
Slika 8.22. prikazuje model spiralnog niza s 45 mikrotrakastih antena na sferi uz označene aktivne antene niza.

Slika 8.22. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=11,48°, β_2=153,07°; α_3=14,07°, β_3=226,18°; α_4=16,26°, β_4=286,03°; α_5=18,19°, β_5=337,99°; α_6=19,95°, β_6=24,58°).

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 (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=11,48°, β_2=153,07°; α_3=14,07°, β_3=226,18°; α_4=16,26°, β_4=286,03°; α_5=18,19°, β_5=337,99°; α_6=19,95°, β_6=24,58°):
a) E ravnina b) H ravnina.

Parametri mjerenja za spiralni niz na sferi, manje gustoće elemenata:

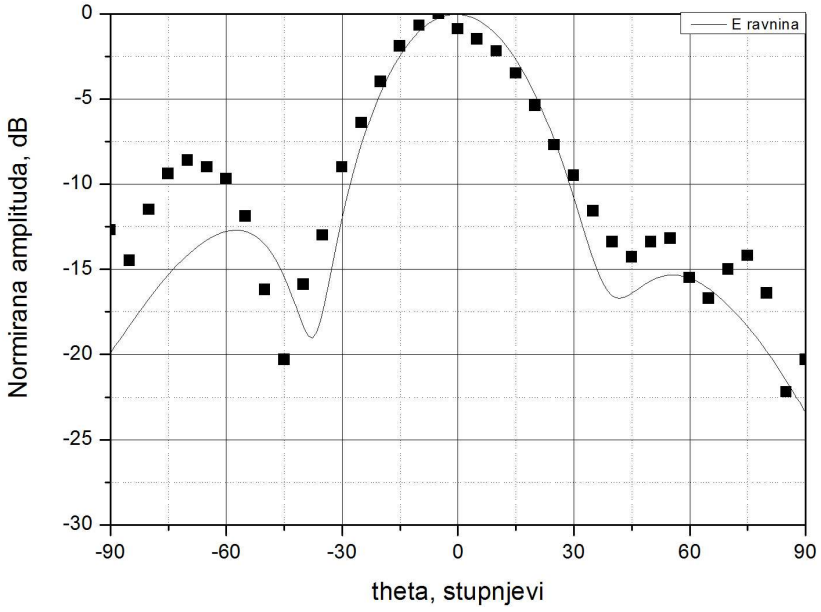
- pozicije pobuđenih antena sfernog niza:

α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=14,07°, β_2=226,18°; α_3=18,19°, β_3=337,99°; α_4=21,57°, β_4=67,22°; α_5=24,50°, β_5=143,93°; α_6=27,13°, β_6=212,40°.

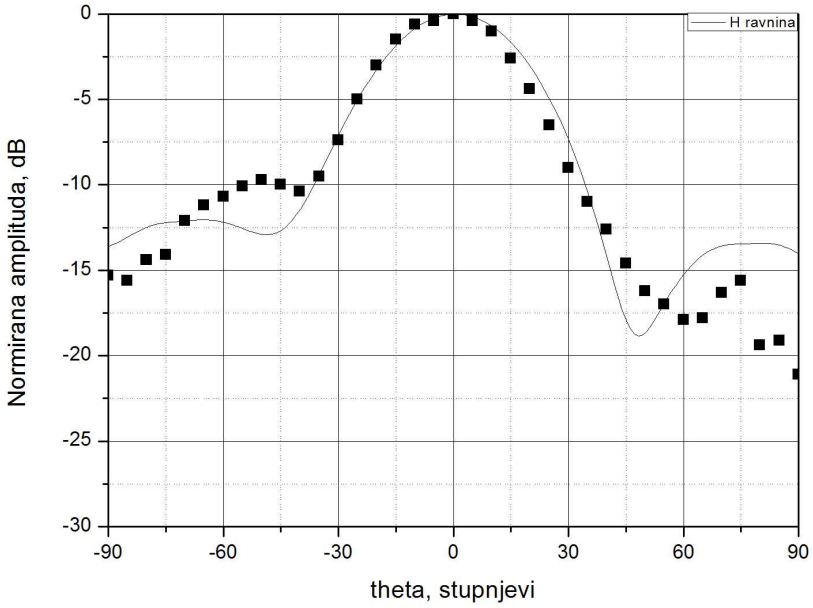
Slika 8.24. prikazuje odabrani podniz elemenata, a Slika 8.25. pripadajuće dijagrame zračenja u E i H ravnini

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 (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=14,07°, β_2=226,18°; α_3=18,19°, β_3=337,99°; α_4=21,57°, β_4=67,22°; α_5=24,50°, β_5=143,93°; α_6=27,13°, β_6=212,40°).



a)



b)

Slika 8.25. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=14,07°, β_2=226,18°; α_3=18,19°, β_3=337,99°; α_4=21,57°, β_4=67,22°; α_5=24,50°, β_5=143,93°; α_6=27,13°, β_6=212,40°)
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 očitanja, 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 latice. 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 aerodinamičnost 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 paramatrima 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 povećenjem 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 otvor 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 karaketristike 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.

Eksperimentalnim 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:
Pn – 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 radiusa 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) prorez 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 raspora. (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 Pn 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 Pn 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}=0,5λ. (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 (phi_{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 ($theta_{max}$ 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 (phi_{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 ($theta_{max}$ 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}=0,4λ. (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}=0,5λ. (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 phi_{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 $theta_{max}$ 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 phi_{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 $theta_{max}$ 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 koefcijenta $k=k_a$. (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=30cm. (str. 140)

Slika 6.5. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za r_s=35,3 cm. (str. 142)

Slika 6.6. Ovisnost ciljnih funkcija CF_1 i CF_2 o broju antena Leopardi konfiguracije za r_s=52,9 cm. (str. 143)

Slika 6.7. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za r_s = 30 cm Leopardi konfiguracije. (str. 146)

Slika 6.8. Ovisnost ciljne funkcije o promjeni koeficijenta $k=k_a$ za r_s = 35,3 cm Leopardi konfiguracije. (str. 147)

Slika 6.9. Ovisnost ciljne funkcije CF_2 o koeficijentu $k=k_a$ za r_s = 52,9 cm Leopardi konfiguracije. (str. 148)

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. (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) dijgrama 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) dijgrama 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) dijgrama 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=6cm) na sferi radijusa r_s=69cm (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=18°, β_{21}=90°). (str. 178)

Slika 8.2. Normirani dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=18°, β_{21}=90°). (str. 178)

Slika 8.3. Sferni eksperimentalni model kojeg predstavljaju šest valovoda (radijus valovoda r_w=6cm) na sferi radijusa r_s=30cm (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°). (str. 179)

Slika 8.4. Normirani diferencijalni dijagram zračenja dva valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=180°). (str. 180)

Slika 8.5. Normirani dijagram zračenja tri valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=108°, β_{22}=180°). (str. 181)

Slika 8.6. Normirani dijagram zračenja šest valovoda a) E ravnina, b) H ravnina (α_1=0°, β_{11}=0°; α_2=56°, β_{21}=36°, β_{22}=108°, β_{23}=180°, β_{24}=252° i β_{25}=324°). (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=30cm 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: α_l=0°, 15°, 30°, 45°, 60° i 75°; 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 (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=15°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°). (str. 197)

Slika 8.19. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=15°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°):
a) E ravnina b) H ravnina. (str. 198)

Slika 8.20. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza ikosaedarskog rasporeda na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°). (str. 199)

Slika 8.21. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{25}=288°):
a) E ravnina b) H ravnina. (str. 200)

Slika 8.22. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=11,48°, β_2=153,07°; α_3=14,07°, β_3=226,18°; α_4=16,26°, β_4=286,03°; α_5=18,19°, β_5=337,99°; α_6=19,95°, β_6=24,58°). (str. 201)

Slika 8.23. Dijagram zračenja spiralne konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=11,48°, β_2=153,07°; α_3=14,07°, β_3=226,18°; α_4=16,26°, β_4=286,03°; α_5=18,19°, β_5=337,99°; α_6=19,95°, β_6=24,58°):
a) E ravnina b) H ravnina. (str. 202)

Slika 8.24. Aktivne mikrotrakaste antene sfernog niza spiralnog rasporeda na sferi radijusa 30 cm (α_1=8,11°, β_1=49,94°; α_2=14,07°, β_2=226,18°; α_3=18,19°, β_3=337,99°; α_4=21,57°, β_4=67,22°; α_5=24,50°, β_5=143,93°; α_6=27,13°, β_6=212,40°). (str. 203)

Slika 8.25. Dijagram zračenja ikosaedarske konfiguracije mikrotrakastih antena na sferi radijusa 30 cm (α_1=0°, β_{11}=0°, α_2=30°, β_{21}=0°, β_{22}=72°, β_{23}=144°, β_{24}=216°, β_{22}=288°):
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***(**Angle**) $\geq 90^0$ 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^{tom} 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. Rupcic, Z. Sipus, V. Mandric, *" 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 equatians 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, Gőeborg, 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 andTheir Application to Radiation Problems*", Bell System Tech. J., Vol.15, pp. 92-112, 1936.

[30] A.J. Booysen, *"Aperture Theory and the Equvalence 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 bandwith, 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 enviroment' – principal investigator: dr. Snježana Rimac-Drlje, Full Professor.

Since 2005 she has been teaching graduate and ungraduate level courses at the Faculty of Electrical Enginnering, 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