

# Analiza i sinteza *SMART* antenskih sistema

Bojan Stojanović, mentor: dr Nataša Nešković

*Sadržaj* — U okviru ovog rada izvršena je analiza tehnologija inteligentnih antenskih sistema (*Smart* antena, SA) i sinteza adaptivnih nizova. Sinteza je izvršena korišćenjem programskog paketa WIPL-D 3D Solver koji je izuzetno povoljan za dizajn i simulaciju mikrotalasnih kola, uređaja i antena. Prilikom sinteze potpuno adaptivnog antenskog niza korišćena je *nullforming* tehnika (sinteza po pravcima nultog zračenja). Pokazalo se da je ovo tehnika dobrih performansi i umerene računске složenosti tako da je pogodna za primene u realnim situacijama.

*Ključne reči* — antenski niz, *beamforming*, simulacija, *Smart* antena.

## I. UVOD

BEŽIČNI komunikacioni sistemi se ubrzano razvijaju širom sveta i ovaj trend će se sigurno nastaviti i u narednim godinama. Istraživanja u ovoj oblasti usmerena su ka povećanju kapaciteta, proširenju zone pokrivanja, poboljšanju kvaliteta prenosa, optimalnom upravljanju resursima i mogućnostima uključivanja novih servisa. Najveće prepreke ka ovim ciljevima su kanalni fading, šum, interferencija i distorzija. Zbog toga je neophodno uvoditi nove aplikacione tehnologije, a jedna od njih je *smart* antenski sistem [1], [4].

## II. SMART ANTENSKI SISTEMI

Sam naziv *smart* antene odnosi se na skup tehnologija kojima se vrši kontrola zračenja antenskih nizova korišćenjem adaptivnih algoritama. Postupci koji se koriste za stvaranje željenog oblika dijagrama zračenja nazivaju se tehnikama formiranja dijagrama zračenja (*beamforming*, BF) i pri tome se isključivo koriste digitalne *beamforming* tehnike. *Smart* antene mogu poboljšati performanse bežičnih komunikacionih sistema preko *beamforming*-a (kojim se diskriminišu signali prema njihovom pravcu dolaska), prostorno-vremenskim procesiranjem (kojim se diskriminišu signali preko njihovog ugla dolaska i privremenih karakteristika), ili *diversity* procesiranjem (koje koristi nekorelisanost fadinga na prostorno razdvojenim antenama). Ukupna efikasnost zavisi od toga koliko je izabrani algoritam primeren okruženju u kome se antena nalazi. *Smart* antene se mogu koristiti na predaji (bazna stanica, BS) za usmerenje maksimuma zračenja ka željenoj mobilnoj

stanici (MS), čime se umanjuje ometanje ostalih korisnika sistema i na prijemu (MS) gde se u jednom višekorisničkom okruženju prostorno razdvajaju željeni signal i interferencija. Preko *beamforming*-a *smart* antene nude malu istokanalnu interferenciju i veliki antenski dobitak prema željenom signalu što dovodi do boljih performansi nego kod konvencionalnih antenskih sistema. Ovo znači da za istu emitovanu snagu *smart* antene nude veću pokrivenost, domet, protok podataka i bolji kvalitet signala. Štaviše, pošto se *beamforming* realizuje softverski, formiranje nekoliko zraka sa istim nizom je moguće prostim ponovnim korišćenjem izlaza niza što je naročito korisno u *multipath* okruženjima [1], [4].

### II.A. Tipovi Smart Antena

Postoje tri osnovna *beamforming* pristupa za *smart* antene.

- *Switched Beam Antenna (SBA)* Zasniva se na setu fiksnih snopova od kojih se bira jedan ili više njih. *Switched beam* sistem ima *beamforming* mrežu (BFN), RF *switch*-eve i kontrolnu logiku koja bira određeni snop. Veliki broj antena sa fiksnim dijagramom zračenja služi za proširenje opsega i pokrivenosti. Manja složenost u procesiranju signala vodi do jednostavnosti sistema, a prema tome i do manje cene. *Switched beam* sistemi mogu da povećaju domet bazne stanice u velikoj meri u odnosu na konvencionalne sisteme, u zavisnosti od uslova sredine, hardvera i softvera koji koriste. Za predajnik bazne stanice, dinamična promena sa snopa na snop, održava kapacitete zato što bazna stanica ne šalje sve signale u svim pravcima. *Switched beam* sistemi su dugo popularni u bežičnim radio sistemima zbog svoje jednostavnosti.
- *Beam Steering Arrays (BSA)* To su dinamičke usmerene antene kod kojih se koriste azimutalne tehnike za određivanje pravca nailaska korisnog signala DoA (*direction of arrival*), a informacija se koristi kako bi se dijagram zračenja antene usmerio u njegovom pravcu. Koriste se metode MUSIC, ESPRIT, CLOSEST. Moguće je kontinualno praćenje signala. Nisu dizajnirane za potiskivanje interferencije zato što korišćeni algoritmi ne razmatraju prostorne oznake interferentnih signala. Zahtevaju periodičnu kontrolu opsega snage kod mobilnih korisnika, dok kod stacionarnih korisnika to nije slučaj.
- *Fully Adaptive Arrays (FAA)* Ovi nizovi imaju veliku fleksibilnost u stvaranju obrasca dijagrama zračenja korišćenjem težinskih koeficijenata. Preko uređaja

Bojan Stojanović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-64-3012924; e-mail: bojan.stojanovic@gmail.com).

Nataša Nešković, Elektrotehnički fakultet u Beogradu; (telefon: 381-64-1115982; e-mail: natasha@etf.bg.ac.yu).

koji se naziva *beamformer* se svakom antenskom elementu pridružuju kompleksne težine sračunate korišćenjem adaptivnih algoritma. Pametan izbor težina rezultovaće u željenom obrascu dobijta. Ovi nizovi se koriste da bi omogućili rad više korisnika u istoj ćeliji u isto vreme i na istoj učestanosti njihovim prostornim razdvajanjem. Time se omogućava bolje iskorišćavanje resursa, tj. manji broj ćelija u jednom klasteru. Smatraju se najperspektivnijim pristupom ali i najkompleksnijim zbog velike računске složenosti, hardverske zahtevnosti (u pogledu snažnih DSP-a) i nedovoljne razvijenosti adaptivnih algoritma [1].

### III. SINTEZA ADAPTIVNIH ANTENSKIH NIZOVA

Adaptivan antenski sistem se sastoji od antenskog niza (kombinacija više antena određenih geometrijskih odnosa) sa zadatom raspodelom struja napajanja pojedinih elemenata koja se može menjati posebnim upravljačkim uređajem. Obično se koriste antene koje su jednostavne konstrukcije, dobre efikasnosti i pogodne za napajanje klasičnim napojnim vodovima. Zato se veoma često kao osnovni elementi antenskih sistema koriste polutaladni dipoli. Antenske nizove klasifikujemo prema *prostornom rasporedu elemenata* i prema *zakonu raspodele struja* u elementima. Neke od osnovnih kategorija ovih nizova su:

- **Linearni** – elementi niza su raspoređeni duž jedne prave.
- **Kružni** – elementi niza su raspoređeni na kružnici.
- **Planarni** – antenski niz ima elemente raspoređene u ravni.
- **Prostorni** – antenski niz ima elemente koji su raspoređeni u prostoru po nekoj 3D šemi.
- **Uniformni** – antenski nizovi čiji su elementi ravnomerno raspoređeni u prostoru, a struje svih elemenata su iste amplitude i konstantnog faznog pomeraja od elementa do elementa.

Prve dve konfiguracije se koriste za kontrolu dijagrama zračenja u ravni azimuta, dok se planarne i prostorne konfiguracije koriste za upravljanje dijagramom zračenja istovremeno i po azimutu i po elevaciji. U mobilnim ćelijским sistemima najčešće se koriste linearni i kružni antenski nizovi. Osnovna razlika između ove dve konfiguracije sastoji se u tome da kružni nizovi imaju potpuno pokrivanje u ravni azimuta ali je odabir rastojanja između antenskih elemenata kritičan za performanse dobijenog sistema, dok linearna konfiguracija poseduje veliki broj ograničenja.

Veoma bitna teorema pri sintezi antenskih sistema je *teorema o multiplikaciji karakteristika* [2], koja razmatra identične antenske elemente sa proizvoljnim prostornim rasporedom. Rezultantna karakteristična funkcija zračenja antenskog niza jednaka je proizvodu *faktora sistema* (koji je skalarna kompleksna vrednost sa kojom se množe sve komponente polja) i karakteristične funkcije antenskog elementa kada se on nalazi u koordinatnom početku. Takođe je važna i teorema koju je definisao S.A. Schelunoff [2], a koja kaže da se faktor pravolinijskog antenskog niza od jednakih i jednako orijentisanih elemenata može se predstaviti u vidu kompleksnog polinoma po promenljivoj  $z$  u obliku:

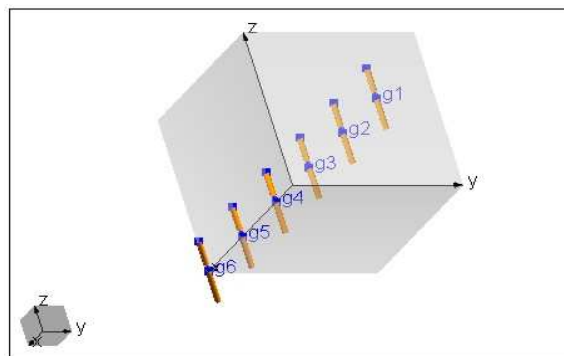
$$F_n(z) = A_0 + A_1z + A_2z^2 + \dots + A_kz^k + \dots + A_{n-1}z^{n-1} \quad (1)$$

ili u faktorizovanom obliku:

$$F_n(z) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_k) \dots (z - z_{n-1}). \quad (2)$$

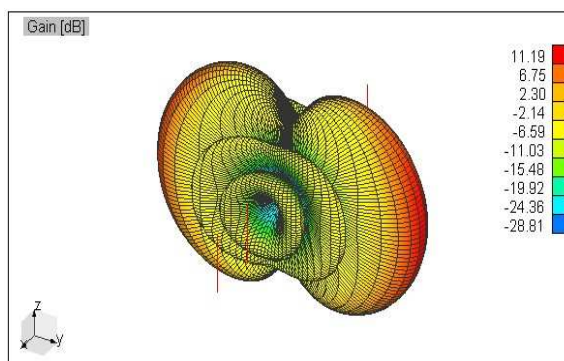
Ova predstava faktora sistema se može iskoristiti za formiranje različitih dijagrama zračenja zato što su koeficijenti ispred kompleksnih promenljivih težinski koeficijenti koje računa *beamformer*.

Programski paket WIPL-D 3D Solver se može iskoristiti za realizovanje jednog adaptivnog antenskog sistema. Korišćenjem polutalasnih dipola na frekvenciji od 2 GHz (iz razloga što su to frekvencije koje se koriste u 3G mobilnim sistemima) sa linearnom konfiguracijom i ekvidistantnim rastojanjem od polovine talasne dužine, moguće je napraviti antenski sistem kao na slici 1:



Sl. 1. Antenski niz od šest elemenata

Ukoliko su težinski koeficijenti elemenata realni i jednaki, antenski niz je sinfazan (ista amplituda i faza signala na elementima) i ima transversalan dijagram zračenja koji je prikazan na slici 2:



Sl. 2. Dobitak [dBi] sinfaznog antenskog niza

Interesantno je razmatrati kakav uticaj imaju broj elemenata i njihovo međusobno rastojanje. Odabir rastojanja je veoma bitan zato što od njega zavise osobine ovakvog niza. Kada je rastojanje veće od  $\lambda/2$  dolazi do brzog rasta bočnih lobova tako da se ovakvi nizovi ne koriste u praksi. Rastojanje ne može biti ni proizvoljno malo zato što tada postoji međusoban uticaj elemenata. Sa druge strane, direktivnost antene je proporcionalna relativnom odnosu ukupne dužine antenskog sistema i  $\lambda$ , pa je istovremeno cilj da ta ukupna dužina bude što veća. Povećanjem broja elemenata, dobitak niza u transversalnom pravcu raste, dijagram zračenja postaje usmereniji ali se povećava broj bočnih lobova i prostornih nula. Potiskivanje prvog bočnog loba raste i asimptotski

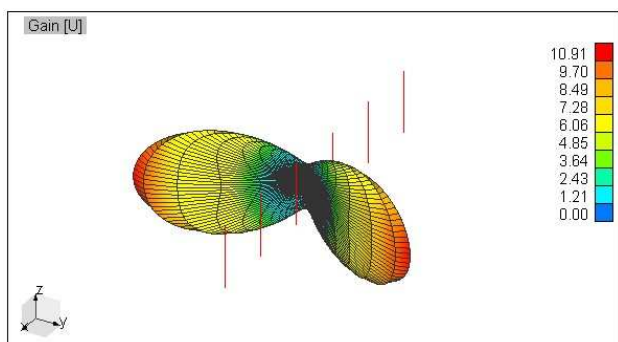
teži vrednosti -13.26 dB kada broj elemenata teži beskonačnosti [3], [4].

Linearni antenski nizovi su pogodni za usmeravanje maksimuma zračenja u ravni azimuta kada se želi praćenje korisnog signala. To se postiže uvođenjem faznog stava među elementima. Kada željeni signal dolazi pod uglom od  $60^\circ$  u odnosu na osu niza, fazni stav je  $-\pi/2$  ukoliko se geometrija niza ne menja [4]. Težinski koeficijenti su dati u tabeli 1 [4].

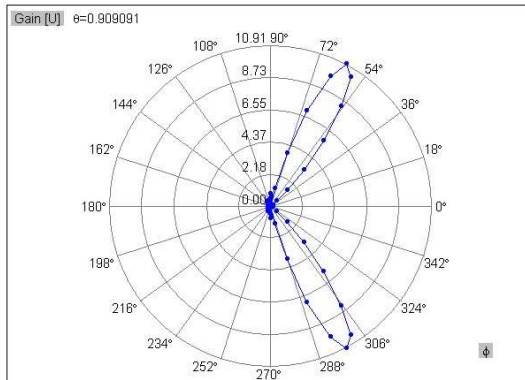
TABELA 1: TEŽINSKI KOEFICIJENTI ZA NIZ SA USMERENIM ZRAČENJEM

	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$
<b>Re</b>	1	0	-1	0	1	0
<b>Im</b>	0	-1	0	1	0	-1

Dijagrami zračenja prikazani su na slikama 3 i 4 [3]:



Sl. 3. Dijagram zračenja usmerenog niza



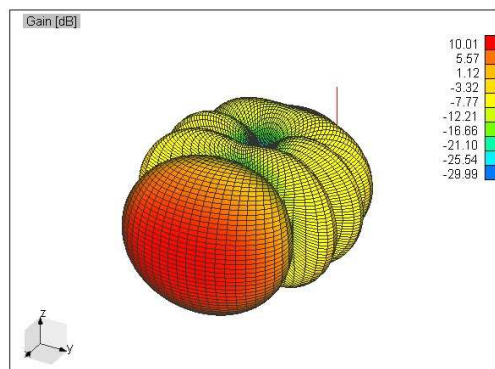
Sl. 4. Prikaz dijagrama zračenja u ravni azimuta

Za formiranje niza sa longitudinalnim zračenjem potrebno je promeniti rastojanje elemenata na  $3/8 \lambda$  [2], [4], da bi nivo bočnih lobova bio zadovoljavajući. U ovom slučaju je fazno kašnjenje struje napajanja tačno jednako kašnjenju faze slobodnog talasa koji se kreće duž ose. Fazni stav među elementima je  $-3\pi/4$  [4], a težinski koeficijenti su dati u tabeli 2 [4].

TABELA 2: TEŽINSKI KOEFICIJENTI NIZA SA LONGITUDINALNIM ZRAČENJEM

	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$
<b>Re</b>	1	-0.71	0	0.71	-1	0.71
<b>Im</b>	0	-0.71	1	-0.71	0	0.71

Dijagram zračenja je prikazan na sledećoj slici:



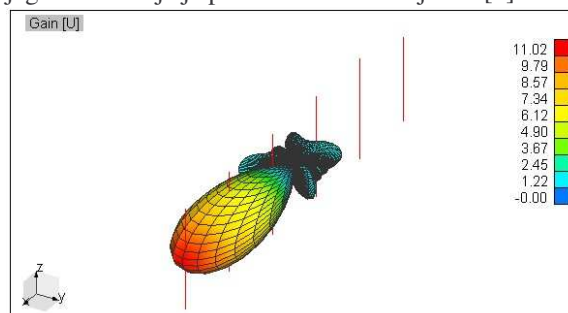
Sl. 5. Dobitak [dBi] niza sa longitudinalnim zračenjem

Sa slike se vidi da nizovi sa longitudinalnim zračenjem imaju bolji odnos napred-nazad od nizova sa transversalnim zračenjem i veću širinu glavnog snopa. Takođe važe ista pravila kao kod transversalnih nizova, tj. važi da sa povećanjem relativne dužine niza  $nd/\lambda$  raste uparenost i raste broj sporednih lobova. Sa povećanjem relativnog rastojanja između elemenata, pri datoj dužini niza, broj sporednih lobova ostaje isti, ali se njihov nivo postepeno povećava. Problem kod ovih nizova je velika širina glavnog snopa, a on se može rešiti povećanjem faznog stava među elementima. Najveća direktivnost se može postići, kao što su pokazali Hansen i Woodzard [2], kada je fazni pomeraj između struja poslednjeg i prvog elementa za  $\pi$  veći od faznog pomeraja njihovih polja u pravcu ose niza. Ako se to primeni na niz od šest elemenata sa ekvidistantnim rastojanjem od  $3/8$  talasne dužine, potreban fazni stav je  $-11\pi/12$  [4]. Težinski koeficijenti za formiranje ovakvog niza su prikazani u tabeli 3 [4].

TABELA 3: TEŽINSKI KOEFICIJENTI ZA FORMIRANJE NIZA SA LONGITUDINALNIM ZRAČENJEM MAKSIMALNE DIREKTIVNOSTI

	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$
<b>Re</b>	1	-0.97	0.87	-0.71	0.5	-0.26
<b>Im</b>	0	-0.26	0.5	-0.71	0.87	-0.97

Dijagram zračenja je prikazan na sledećoj slici [3]:



Sl. 6. Dijagram zračenja longitudinalnog niza maksimalne direktivnosti

Veliki nedostatak ovakvog niza je visok nivo bočnih lobova što je neprihvatljivo u mnogim realnim situacijama [2].

U višekorisničkom okruženju u kome se nalazi jedan antenski sistem, signali do antene stižu različitim

putanjama. Kada su poznate prostorne oznake (AoA, *angle of arrival*) korisnog signala i interferencija može se primeniti *nullforming* tehnika (sinteza po pravcima nultog zračenja) [2], ako su zadati korak antenskog niza,  $d$ , i linearan fazni pomeraj,  $\delta$ . Ako se zahteva da se za određene uglove  $\psi_{0k}$ ,  $k = 1, \dots, n - 1$ , postigne nulto zračenje, odgovarajući antenski polinom mora biti  $(n - 1)$ -og stepena, a niz mora imati  $n$  članova. Faze  $\phi_{0k}$ , kao i vrednost kompleksne promenljive  $z_{0k}$ , koje odgovaraju ovim uglovima nultog zračenja mogu se lako izračunati:

$$\phi_{0k} = \delta + \beta d \cos \psi_{0k} \quad \text{i} \quad z_{0k} = e^{j\phi_{0k}} = e^{j(\delta + \beta d \cos \psi_{0k})} \quad (3)$$

Kada se dobiju nule kompleksnog polinoma niza, može se odmah napisati odgovarajući faktor niza, tj. antenski polinom u faktorizovanom obliku (2). Njegovim razvijanjem dobijaju se kompleksni koeficijenti koji određuju odnos struja napajanja određenih elemenata:

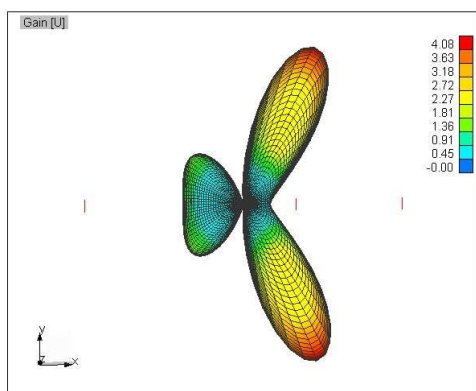
$$F_n(z) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_k) \dots (z - z_{n-1}) = z^{n-1} - \left( \sum_{k=1}^{n-1} z_{0k} \right) z^{n-2} + \dots + \left( \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} (-z_{0k}) \right) z + \prod_{k=1}^{n-1} (-z_{0k}) \quad (4)$$

Primenom programskog paketa WIPL-D moguće je napraviti niz koji sadrži prostorne nule u pravcima interferencija. Radi jednostavnosti, može se formirati niz od četiri polutalasna dipola na frekvenciji 2 GHz. Samim tim je moguće formirati 3 prostorne nule i potisnuti tri interferentna signala. Rastojanje među elementima niza je  $3/8\lambda$  [4]. Pretpostavka je da interferencije dolaze pod uglovima od  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$ , a da se željeni korisnik nalazi na  $60^\circ$  [4]. Najpre se računa fazni stav koji treba da postoji među elementima niza da bi maksimum zračenja bio u pravcu željenog korisnika. On u ovom primeru iznosi  $-3\pi/8$  [4]. Zatim se računaju težinski koeficijenti [4], koji su prikazani u tabeli 4 a dijagrami su prikazani na slikama 7 i 8.

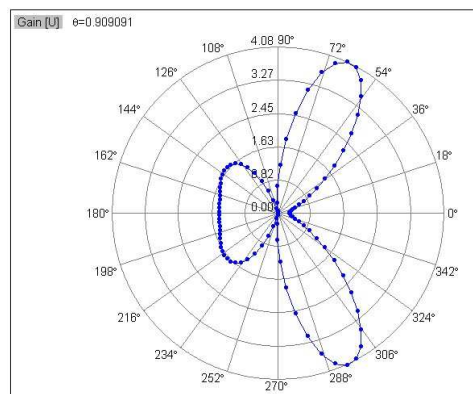
TABELA 4: TEŽINSKI KOEFICIJENTI ADAPTIVNOG NIZA

	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$
<b>Re</b>	1	0.41	0.08	-1.5
<b>Im</b>	0	1.41	0.08	-0.5

Dijagrami zračenja adaptivnog niza:



Sl. 7. Dijagram zračenja adaptivnog niza



Sl. 8. Prikaz dijagrama zračenja adaptivnog niza u ravni azimuta

Dijagram bi u potpunosti odgovarao zadatim početnim uslovima kada bi i signal na  $300^\circ$  bio u prostornoj nuli, međutim on se nalazi u oblasti sa relativno velikim dobitkom. Razlog za to je dvosmislenost niza koja se javlja u ovom slučaju zato što se maksimum i interferencija nalaze simetrično u odnosu na osu niza [4].

#### IV. ZAKLJUČAK

Tehnologije *smart* antena omogućavaju veliki broj poboljšanja kao što su povećanje kapaciteta i kvaliteta prenosa, proširenje zone pokrivanja, uključivanja novih servisa, optimalno upravljanje resursima. U ovom radu je primenjena *nullforming* tehnika za formiranje potpuno adaptivnog niza. Istovremeno je ukazano na ograničenja koja postoje korišćenjem uniformnih antenskih nizova. Ova ograničenja se mogu prevazići korišćenjem različitih elemenata i varijacijom rastojanja među elementima.

Postoji veliki broj problema koje treba rešiti kako bi se tehnologija *smart* antena uspešno primenila. Veliki su problemi implementacija algoritama u konkretan sistem i uticaj neidealnosti hardvera na performanse. U budućnosti će sigurno, kada se ovi problemi prevaziđu, ova tehnologija biti osnova bežičnih komunikacionih sistema.

#### LITERATURA

- [1] J.H.Reed, "Software radio: A modern Approach to Radio Engineering", Prentice Hall, 2002.
- [2] Momčilo B. Dragović, "Antene i Prostiranje Radio Talasa", Akademsko misao, Beograd, 2003.
- [3] WIPL-D, software for electromagnetic modeling of composite metallic and dielectric structures, Demo Version 6.0.
- [4] Bojan Stojanović, Diplomski rad: "Analiza i sinteza SMART antenskih sistema", Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2007.

#### ABSTRACT

Smart antennas constitute a promising but still emerging technology. Improvements, typically by a factor of two in cell coverage or capacity are shown to be possible according to results from field deployments using simple beamforming. Greater improvements can be obtained from some of the more advanced space-time processing solutions.

#### SMART ANTENNAS ANALYSIS AND SYNTHESIS

Bojan Stojanović, mentor: dr Nataša Nešković