Sadržaj

Predgovor prvom izdanju **i**

1 Uvod u teoriju antenskih nizova **1**

1.1 Pojam *steering* vektora 1

1.2 Pojam prostornog filtra 17

1.3 Funkcija odziva prostornog filtra sa težinskim koeficijentima u domenu frekvencija-talasni broj 20

1.3.1 Funkcija oblika snopa 21

1.3.2 Faktor antenskog niza 21

1.3.3 Oblik snopa antenskog niza sa neizotropnim antenama 24

1.3.4 Oblik snopa antenskog niza po snazi 24

1.3.5 Usmerenost antenskog niza 24

1.3.6 Pojačanje antenskog niza 25

1.4 Karakteristike linearnih antenskih nizova 25

1.5 Karakteristike ekvidistantnih planarnih antenskih nizova . . 33

1.6 Podešavanje maksimuma snopa antenskog niza u željenom smeru 34

1.7 Sinteza oblika snopa antenskog niza 38

1.7.1 Tehnike sinteze oblika snopa sa nulama u zadatim smerovima 40

1.7.2 Tehnike oblikovanja snopa antenskog niza 47

1.7.3 Tehnike oblikovanja više nezavisnih ortogonalnih snopova 49

2 Matematički modeli signala na antenskom nizu 51

2.1 Matematički model komunikacionih radio signala 51

2.2 Pojam uskopojasnih i širokopojasnih radio signala na antenskom nizu 52

2.3 Matematički modeli uskopojasnih radio signala na antenskom nizu 54

2.4 Matematički modeli širokopojasnih radio signala na antenskom nizu 57

2.5 Matematički model radio signala na antenskom nizu u uslovima višestrukog prostiranja 62

3 Uvod u teoriju prostornog filtriranja 75

3.1 Klasifikacija prostornih filtera 75

3.2 Matematički model prostornog filtriranja kao funkcija statistike drugog reda signala na antenskom nizu 77

3.3 Deterministički prostorni filtri 82

3.3.1 Konvencionalni prostorni filter 82

3.3.2 Prostorni filter sa formiranjem nula u dijagramu usmerenosti 90

3.4 Statistički optimalni prostorni filtri 93

3.4.1 Optimalni prostorni filter bez ograničenja koji maksimizira izlazni odnos signal/šum 93

3.4.2 Optimalni prostorni filter sa ograničenjem koji maksimizira izlazni odnos signal/šum 94

3.4.3 Optimalni prostorni filter sa ograničenjem koji minimizira snagu na izlazu filtra 95

3.4.4 Optimalni MSE (*Mean Square Error*) prostorni filter 99

4 Metode za procenu smera dolaska signala 101

4.1 Kratak istorijski osvrt na razvoj metoda za procenu smera . 101

4.2 Klasifikacija metoda za procenu smera 109

4.2.1 Principi klasičnih metoda za procenu smera 110

4.2.2 Principi visokorezolucionih metoda za procenu smera 111

4.2.3 Principi metode maksimalne verodostojnosti 112

4.3 Klasične metode 113

4.3.1 Metod za procenu smera dolaska signala na bazi rotiranja usmerene antene 113

4.3.2 *Watson-Watt*-ova metoda 114

4.3.3 *Wullenweber*-ova metoda 119

4.3.4 *Doppler*-ova metoda 120

4.3.5 Interferometarska metoda 126

4.4 Visokorezolucione metode 136

4.4.1 *Bartlett*-ova metoda 136

4.4.2 *Capon*-ova metoda minimalne varijanse 139

4.4.3 *Pisarenko*-va metoda 141

4.4.4 MUSIC metoda 142

4.4.5 Metoda minimalne norme 149

4.4.6 ESPRIT metoda 152

4.5 Metoda maksimalne verodostojnosti 155

4.5.1 Deterministička metoda maksimalne verodostojnosti . 156

4.5.2 Metoda stohastičke maksimalne verodostojnosti . . . 158

4.6 Procena smera dolaska širokopojasnih signala 159

4.6.1 Procena smera dolaska širokopojasnih signala na bazi spektralne kovarijacione matrice 160

4.6.2 Procena smera dolaska širokopojasnih signala na bazi kanalizacije signala polifaznom bankom filtera 164

4.6.3 Procena smera dolaska širokopojasnih signala na bazi koherentnog spektralnog fokusiranja 170

4.7 Procena smera u uslovima višestrukog prostiranja (*multipath*-a) 172

4.8 Tačnost procene smera 175

4.8.1 *Cramer-Raova* granica za varijansu greške procene smera 175

5 Adaptivni antenski nizovi 187

5.1 Koncept adaptivnog prostornog filtriranja 187

5.2 Adaptivni prostorni filter na bazi direktne inverzije korelacione matrice 189

5.3 Adaptivni LMS prostorni filter bez ograničenja 195

5.4 Adaptivni LMS prostorni filter sa ograničenjem 202

5.5 Adaptivni rekurzivni LMS prostorni filter 206

5.6 Adaptivni struktuirani gradijentni prostorni filter 209

5.7 Adaptivni konjugovano gradijentni prostorni filter 210

5.8 Adaptivni rekurzivni LS prostorni filter 211

5.9 Adaptivni prostorni filter konstantne anvelope 214

6 *Multiple Input Multiple Output* - MIMO sistemi 217

6.1 Jednokorisnički MIMO 218
6.2 Višekorisnički MIMO 221
6.3 Distribuirani MIMO 223
6.4 MIMO sa RFoF distribuiranim antenskim sistemom 225
6.5 Masivni MIMO 226
6.6 Masivni MIMO sa usmerenim antenskim podnizovima 228

Dodatak **239**

A Matematička osnova obrade signala sa antenskih nizova **241**

B MATLAB funkcije **265**

Predgovor prvom izdanju

Ova knjiga je napisana kao udžbenik studentima Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu koji izaberu predmet "*Antenski nizovi u telekomunikacionim sistemima*" na master studijama odnosno predmete "*Prostorno-vremenska obrada signala*" i "*Obrada signala sa mikrofonskih nizova"* na doktorskim studijama. Autori očekuju da će knjiga biti korisna i široj inženjerskoj populaciji: onima koji prvi put ulaze u ovu oblast, onima koji su već u ovoj oblasti i rešavaju stručne inženjerske probleme iz ove oblasti, ali i onima koji imaju ambicije da se ozbiljnije bave naučno-istraživačkim radom u ovoj oblasti.

Obrada signala sa antenskih nizova je deo šire naučne oblasti koja je u literaturi poznata pod nazivom *array processing*. U fokusu *array procesing*-a su fenomeni talasne prirode. Predmet *array processing* je prostorno-vremenska obrada signala sa senzorskih (seizmičkih, mikrofonskih, antenskih) nizova. Zahvaljujući analogiji matematičkih modela signala, algoritmi razvijeni u jednoj oblasti primenjivi su u drugoj oblasti *array processing*-a, što ovu oblast čini široko primenjivom i zahvalnom za bavljenje. Oblast obrade signala sa antenskh nizova ima svoje teorijsko utemeljenje u klasičnoj elektromagnetskoj teoriji i u teoriji telekomunikacija, ali bazično radi se o oblasti obrade signala.

Istorija *array processing*-a radio i radarskih signala je jako bogata i sadržajna. Ona je pratila intezivan razvoj telekomunikacija tokom 20. veka a naročito taj razvoj prati tokom poslednje dve dekade ovog veka. Dugi vremenski period koji se meri decenijama, *array processing* je bio privilegija vojnih namenskih telekomunikacionih i radarskih sistema. Devedesetih godina prošlog veka, definisanjem koncepta MIMO sistema, napravljen je ozbiljan iskorak u oblasti telekomunikacija u pravcu prostorno-vremenskih (*space-time*) komunikacija a u cilju poboljšanja spektralne efikasnosti i povećanja bitskih protoka. Ova oblast je u fokusu novih generacija ćelijskih mobilnih sistema a naročito u fokusu razvoja dolazeće pete generacije u kojoj će *massive* MIMO sistemi primenjeni u *cmWave* i *mmWave* opsegu biti jedna od

nosećih tehnologija te generacije. Sve to skupa čini oblast obrade signala sa antenskih nizova jako aktuelnom.

U knjizi su dati osnovni pojmovi i izloženi generički principi osnovnih koncepata i algoritmike u oblasti obrade signala sa antenskih nizova, bez ambicije da se izloži celovit prikaz iz ove oblasti. Autori veruju da knjiga daje solidnu teorijsku osnovu za ulazak u ovu specifičnu naučnu oblast i da će studentima i zainteresovanim stučnjacima olakšati korišćenje bogate literature iz ove oblasti. Za očiglednost u ovoj oblasti potrebno je dugotrajno i posvećeno bavljenje njome.

Autori se zahvaljuju recenzentima na korisnim primedbama i sugestijama. Takodje se zahvaljuju doktorantu Milošu Janjiću na pažljivom čitanju i korekcijama rukopisa knjige.

U Beogradu
maj 2018.

Miljko Erić
Nenad Vukmirović