

**Dr Miljko M. Erić,**  
pukovnik, dipl. inž.  
Vojnotehnički institut VJ,  
Beograd  
**Profesor**  
**dr Miroslav L. Dukić,**  
Elektrotehnički fakultet,  
Beograd  
**Ivan Pokrajac,**  
poručnik, dipl. inž.  
VP 4522, Batajnica

## PRIMENA METODE MUSIC ZA ODREĐIVANJE SMERA DOLASKA RADIO- -SIGNALA KORIŠĆENJEM ANTENSKIH NIZOVA ADCOCK

UDC: 621.391.883 : 621.396.677.6] : 519.86

### Rezime:

*Analiziran je problem procene smera dolaska radio-signalata metodom MUSIC korišćenjem antenskih nizova ADCOCK. Formulisan je matematički model signala na antenskom nizu ADCOCK. Izvedene su relacije između vektora prostiranja ADCOCK i vektora prostiranja ukupnog antenskog niza (niza od koga se ADCOCK-ov niz formira). Definisana je kriterijumska funkcija algoritma MUSIC i funkcija neodređenosti antenskog niza ADCOCK. Priказani su rezultati simulacije, kao i rezultati praktične verifikacije mogućnosti primene metode MUSIC na antenske nizove ADCOCK.*

*Ključne reči: radio-izviđanje, radio-goniometrisanje, digitalna obrada signala, antenski nizovi.*

## APPLICATION OF THE MUSIC METHOD FOR DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION USING THE ADCOCK ANTENNA ARRAYS

### Summary:

*The MUSIC based Direction of Arrival estimation using the ADCOCK antenna arrays is considered. Starting from signal model formulation, the cost function of the MUSIC algorithm and the ambiguity functions for the ADCOCK antenna array have been formulated. Some simulation results and some preliminary results of the verification in practice are presented.*

*Key words: radio-reconnaissance, direction finding, digital signal processing, antenna arrays.*

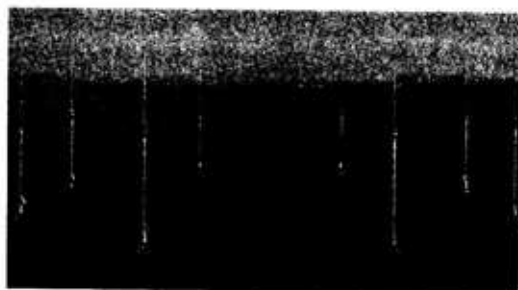
### Uvod

Antenski nizovi ADCOCK koriste se u kombinaciji sa WWAT-ovom metodom za goniometrisanje [1], koju je predložio Watson-Watt 1926. godine. Uprkos tome što se radi o relativno staroj metodi, ova metoda za goniometrisanje i danas se često koristi. Antenski nizovi ADCOCK izrađuju se u stacionarnim, polustacionarnim i mobilnim varijantama, kako za potrebe radio-goniometara

za VF frekvencijski opseg, slika 1 [2], tako i za VVF/UVF opseg (naročito za mobilne varijante goniometara), slika 2 [2].

Antenski nizovi ADCOCK su nizovi ekvidistantne kružne geometrije sa  $L = 4n$  antena u nizu, ( $n$  – prirodan broj), sa adapterom ADCOCK na izlazu, koji obavlja linearnu transformaciju signala neposredno sa izlaza  $L$  antena, slika 3.

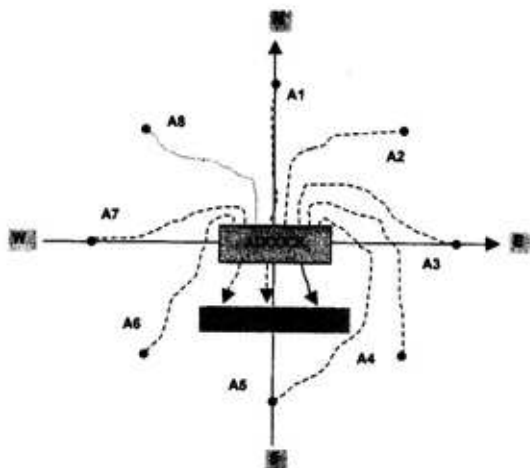
Rezultat te transformacije su tri signala na izlazu adaptera ADCOCK:  $[u^{NS}(t)$



Sl. 1 – Fotografija polustacionarnog ADCOCK antenskog niza AK 1205 firme Telefunken za VF frekvencijski opseg



Sl. 2 – Fotografija mobilnog ADCOCK antenskog niza AK 1206 firme Telefunken za VVF/UVF opseg



Sl. 3 – Antenski niz ADCOCK od  $L = 8$  antena

$u^{EW}(t)$  u  $\Sigma(t)$ ]. Prva dva signala [ $u^{NS}(t)$  u  $u^{EW}$ ] međusobno su u kvadraturi. Dovođenjem ovih signala (direktno ili nakon translacije na nisku međufrekvenciju) na x, odnosno y pločice osciloskopa direktno se realizuje procena pravca. Treći signal koristi se kao dodatni signal za jednoznačno određivanje smera. Antenski nizovi ADCOCK spadaju u kategoriju antenskih nizova sa malim otvorom, kako bi se zadovoljile neke pretpostavke vezane za matematički model na kojem se zasniva WWAT-ova metoda koja daje trenutnu (*instantaneous*) procenu smera, i to je jedan od razloga njene rasprostranjenosti. S obzirom na to da se kod WWAT-ove metode ključna transformacija signala antenskog niza vrši u adapteru, ADCOCK osnovni tehnički problem kod radio-goniometra na bazi WWAT-ove metode povezan je sa postupkom kalibracije prijemnih kanala. WWAT-ova metoda ne omogućava određivanje elevacije već samo azimuta dolaska signala. Ukoliko se izvor radio-signala i antenski niz ne nalaze u istoj ravni, tada dolazi do tzv. visinske greške koja se uzima u obzir kroz korekzione tabele.

U ovom radu prezentovana je teorijska osnova primene metode MUSIC (Multiple Signal Classification) [3, 4], na antenske nizove ADCOCK. Metoda MUSIC spada u kategoriju metoda tipa „subspace“ i predstavlja temelj čitave jedne klase algoritama za digitalnu obradu signala. Omogućava procenu parametara viševremenski i spektralno preklapljenih signala koji su istovremeno aktivni u istom kanalu (vremenskom intervalu i frekvencijskom podopsegu), što klasične metode za goniometrisanje ne omogu-

čavaju, pri čemu je posebno važna procena smera dolaska signala (azimuta i elevacije). Na osnovu ove metode u VTI VJ u proteklom periodu uspešno je razvijen radio-goniometar za VVF/UVF opseg [5, 6], koji je usvojen kao sredstvo NVO. U sklopu teorijskog razmatranja ove metode, u [4, 5] razrađen je postupak za *automatsku identifikaciju informacionih kanala*, što predstavlja jedan od ključnih problema automatizacije procesa pretraživanja i analize radio-frekvencijskog spektra. Na osnovu određenog postupka predložena je procedura za razvrstavanje emisija sa frekvencijskim skakanjem, [7, 8]. Takođe, formulisano je nekoliko originalnih algoritama tipa MUSIC za združenu procenu parametara multikorisničkih asinhronih signala DS CDMA [9, 10, 11, 12]. Stečena su prilično značajna, kako teorijska, tako i praktična iskustva vezana za ovu metodu.

Koliko je autorima poznato, u dostupnoj literaturi nema radova koji su vezani za primenu metode MUSIC na antenske nizove ADCOCK, niti su poznata tehnička rešenja goniometara na bazi primene metode MUSIC korišćenjem antenskih nizova ADCOCK.

U čemu se sastoji problem primene metode MUSIC na antenske nizove ADCOCK? U svim teorijskim radovima, koji su vezani za metodu MUSIC, polazi se od pretpostavke da iza svake antene postoji prijemni kanal koji, u suštini, predstavlja *IQ demodulator/down konvertor*. Teorijski je poznato da se povećanjem broja antena u nizu poboljšavaju performanse metode MUSIC (kao i svih ostalih metoda za procenu smera) u pogledu tačnosti procene smera, kao i u pogledu rezolucionih svojstava. U praksi je relativ-

no teško obezbediti prijemni sistem sa proizvoljno velikim brojem prijemnih kanala. Kod ADCOCK antenskih nizova posredstvom ADCOCK adaptera koristi se antenski niz od  $L = 4n$  antena, a prijemni sistem je trokanalni. Ključ za primenu metode MUSIC na antenske nizove ADCOCK predstavlja, u teorijskom smislu, definisanje analitičkih relacija između transfer-funkcija (*array manifold*), ili između vektora prostiranja (*steering vectors*) ukupnog antenskog niza (niza od  $L = 4n$  antena) i antenskog niza ADCOCK (ekvivalentnog troelementnog antenskog niza) [13, 14].

Osnovni motivi za istraživanje ovog tehničkog problema proistekli su iz praktičnih razloga i potreba. Postavlja se problem realizacije konceptijski i tehnološki savremenog tehničkog rešenja radio-goniometra na osnovu metode MUSIC ili multifunkcionalnog rešenja (MUSIC + WWAT) koje bi se zasnivalo na korišćenju raspoložive (preostale) antenske infrastrukture ADCOCK (antene, umerene kablovske sekcije, adapter ADCOCK). Pored toga, od posebnog je interesa dogradnja novih funkcionalnih mogućnosti u odnosu na rešenje koje se zasniva na WWAT-ovoj metodi, kao što je mogućnost određivanja elevacije, što je od posebnog interesa sa aspekta realizacije tzv. *single station radio-goniometara za VF frekvencijski opseg*.

### **Matematički model signala na antenskom nizu ADCOCK**

Kružni antenski niz od  $L = 4n$  antena (bez adaptera ADCOCK) uslovno se može smatrati ukupnim antenskim nizom. Pod pojmom *antenski niz AD-*

ADCOCK u radu se podrazumeva ukupni antenski niz + adapter ADCOCK.

Matematički model signala, na ukupnom antenskom nizu od  $L$  antena, može se izraziti na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(\theta, \varphi) & a_{12}(\theta, \varphi) & \cdots & a_{1K}(\theta, \varphi) \\ a_{21}(\theta, \varphi) & a_{22}(\theta, \varphi) & \cdots & a_{2K}(\theta, \varphi) \\ a_{31}(\theta, \varphi) & a_{32}(\theta, \varphi) & \cdots & a_{3K}(\theta, \varphi) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{L1}(\theta, \varphi) & a_{L2}(\theta, \varphi) & \cdots & a_{LK}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ n_3(t) \\ \vdots \\ n_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_K(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adapter ADCOCK obavlja linearnu transformaciju signala sa izlaza ukupnog antenskog niza. Matematički model signala na antenskom nizu ADCOCK (odnosno signala na izlazu adaptera ADCOCK), može se predstaviti u sledećem obliku:

$$\begin{bmatrix} x^{NS}(t) \\ x^{EW}(t) \\ x^{\Sigma}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{NS}(\theta, \varphi) & a_2^{NS}(\theta, \varphi) & \cdots & a_K^{NS}(\theta, \varphi) \\ a_1^{EW}(\theta, \varphi) & a_2^{EW}(\theta, \varphi) & \cdots & a_K^{EW}(\theta, \varphi) \\ a_1^{\Sigma}(\theta, \varphi) & a_2^{\Sigma}(\theta, \varphi) & \cdots & a_K^{\Sigma}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n^{NS}(t) \\ n^{EW}(t) \\ n^{\Sigma}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_K(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ili u matricnom obliku na sledeći način:

$$\mathbf{x}^{ADCOCK}(t) = \mathbf{A}^{ADCOCK} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}^{ADCOCK}(t), \quad (3)$$

gde je:  $\mathbf{x}^{ADCOCK}(t) \in C^{3 \times 1}$  – vektor signala na izlazu antenskog niza ADCOCK,

$\mathbf{A}^{ADCOCK} \in C^{3 \times K}$  – matrica odziva antenskog niza ADCOCK na  $K$  superponiranih radio-signala,

$\mathbf{s}(t) \in C^{K \times 1}$  – vektor kompleksnih anvelopa radio-signala u koordinatnom početku,

$\mathbf{n}^{ADCOCK}(t) \in C^{3 \times 1}$  – vektor šuma na antenskom nizu ADCOCK.

Kolone matrice  $\mathbf{A}^{ADCOCK}$  su **vektori prostiranja** antenskog niza ADCOCK koji imaju opšti oblik:

$$a_i^{ADCOCK}(\theta, \varphi) = [a_i^{NS}(\theta, \varphi) a_i^{EW}(\theta, \varphi) a_i^{\Sigma}(\theta, \varphi)]^T \quad (4)$$

gde simbol  $T$  označava transpoziciju.

$$a_i^{NS}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{L/4} [a_{mi}(\theta, \varphi) - a_{(L/2+m)i}(\theta, \varphi)] - \sum_{m=L/4+2}^{L/2} [a_{mi}(\theta, \varphi) - a_{(L/2+m)i}(\theta, \varphi)] \quad (5)$$

$$a_i^{EW}(\theta, \varphi) = \sum_{m=2}^{L/2} [a_{mi}(\theta, \varphi) - a_{(L/2+m)i}(\theta, \varphi)] \quad (6)$$

$$a_i^{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^L a_{mi}(\theta, \varphi) \quad (7)$$

Jednačine (5), (6) i (7), u suštini, modeliraju transformaciju transfer-funkcije (*array manifolda*) ukupnog antenskog niza u transfer funkciju (*array manifolda*) antenskog niza ADCOCK, koju obavlja adapter ADCOCK. Transfer-funkcija (*array manifolda*) antenskog niza predstavlja kontinuum svih mogućih vektora prostiranja antenskog niza, i zavisi od frekvencije, geometrije antenskog niza, azimuta i elevacije.

Jasno je, dakle, da antenski niz ADCOCK ima stepen slobode 2, za razliku od ukupnog antenskog niza koji ima stepen slobode  $L-1$ . To znači da se antenskim nizom ADCOCK mogu prostorno razdvojiti najviše do  $K=2$  signala koja se vremenski i spektralno preklapaju.

### Formulacija kriterijumske funkcije metode MUSIC za antenski niz ADCOCK

Kriterijumska funkcija metode MUSIC, primenjena na antenski niz ADCOCK, ima oblik:

$$P_{MUSIC}^{ADCOCK}(\theta, \varphi) = \frac{a^{ADCOCK}(\theta, \varphi)^* a^{ADCOCK}(\theta, \varphi)}{\left| a^{ADCOCK}(\theta, \varphi)^* E_n^{ADCOCK} \right|^2} \quad (8)$$

gde je  $E_n^{ADCOCK}$  matrica potprostora šuma, koja se dobija na poznati način iz kovarijacione matrice signala antenskog niza ADCOCK, koja se može proceniti na osnovu  $N$  raspoloživih vremenskih realizacija vektora  $x^{ADCOCK}(n\Delta t)$  na sledeći način:

$$R_x^{ADCOCK} = 1/N \sum_{n=1}^N x^{ADCOCK}(n\Delta t) x^{ADCOCK}(n\Delta t)^*$$

Simbol  $*$  označava konjugovano-kompleksnu transpoziciju. Nepoznati smerovi dolaska  $\{\theta_k, \varphi_k\}$ ,  $k = 1, K$  određuju se kao argumenti od  $K \leq 2$  maksimuma funkcije  $P_{MUSIC}^{ADCOCK}(\theta, \varphi)$ .

### Karakteristike neodređenosti antenskog niza ADCOCK

Karakteristike neodređenosti predstavljaju značajnu karakteristiku bilo kog antenskog niza, jer predstavljaju kvalitativnu meru potencijalnih rezolucionih svojstava pri razdvajanju prostorno bliskih predajnika. S druge strane, na osnovu funkcije neodređenosti može se predvideti nivo i pozicija neželjenih (*spurious*) pikova pri proceni smera bilo kojom metodom, koji nisu algoritamski specifični već su posledica karakteristika neodređenosti (geometrije) antenskog niza.

Funkcija neodređenosti tipa I definisana je kao kvantitativna normalizovana mera kolinearnosti dva vektora prostiranja za različite normalizovane frekvencije, azimute i elevacije [15].

Karakteristike neodređenosti antenskog niza dominantno su određene njegovom geometrijom. Linearni antenski nizovi poseduju neodređenost i po azimutu i po elevaciji, i zbog toga nisu pogodni za praktičnu primenu. Karakteristike neodređenosti ovakvih nizova mogu se teorijski predvideti, odnosno analitički izraziti. Planarni antenski nizovi (kakav je antenski niz ADCOCK) omogućavaju jednoznačno određivanje azimuta i elevacije u polulopti. Prostorni antenski nizovi omogućavaju jednoznačno određivanje azimuta i elevacije u čitavoj sferi. Funkcija neodređenosti tipa I predstavlja veoma koristan alat za procenu karakteristika neodređenosti neuniformnih antenskih nizova (linearnih, planarnih ili prostornih), zbog toga što se karakteristike neodređenosti ovakvih antenskih nizova teško mogu izraziti u analitičkom obliku.

Funkcija neodređenosti tipa I antenskog niza ADCOCK može se izraziti na sledeći način:

$$\chi^{ADCOCK'}(f_c/f_A, \theta_i, \varphi_i, \theta_j, \varphi_j) = \frac{\alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta_i, \varphi_i) * \alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta_j, \varphi_j)}{\|\alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta_i, \varphi_i)\| \|\alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta_j, \varphi_j)\|} \quad (9)$$

gde je:  $f_c$  – centralna frekvencija,  $f_A$  – karakteristična (granična) frekvencija antenskog niza za koju je ispunjen Nikvistov kriterijum za prostorno uzorkovanje talasnog fronta signala,  $\theta_p$ ,  $\varphi_i$  – azimut i elevacija, a  $\| * \|$  – označava normu a vektora.

Ukoliko su vektori prostiranja kolinearni za različite skupove parametara

$$\chi^{ADCOCK''}(\omega_c/\omega_A, \theta, \varphi) = \frac{\alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta, \varphi) * \hat{E}_s^{ADCOCK} \hat{E}_s^{ADCOCK*} \alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta, \varphi)}{\|\alpha^{ADCOCK}(f_c/f_A, \theta, \varphi)\|} \quad (10)$$

gde  $E_s^{ADCOCK}$  predstavlja matricu potprostora signala, koja se dobija na način opisan u [16].

Na osnovu funkcije neodređenosti tipa II može se predvideti nivo neželjenih pikova pri proceni smera, u situaciji kada na antenski niz dolazi više signala istovremeno.

## Rezultati simulacije

Analiziran je antenski niz ADCOCK od  $L = 8$  antena, prema slici 3.

Na slikama 4a i 4c prikazane su funkcije neodređenosti, a na slikama 4b i 4d konture funkcija neodređenosti tipa I po azimutu za elevaciju od  $0^\circ$  za ukupni, odnosno antenski niz ADCOCK respektivno. U svim primerima, konture su ra-

čunate za vrednosti funkcije neodređenosti u opsegu od 0,95 do 1.

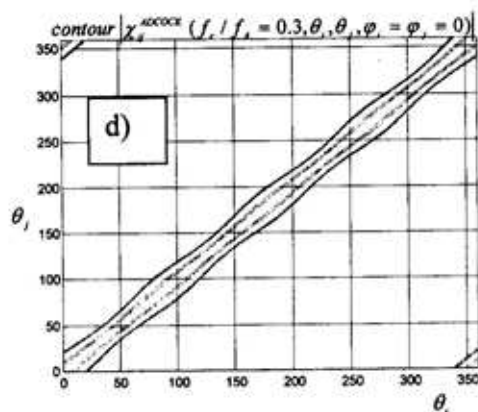
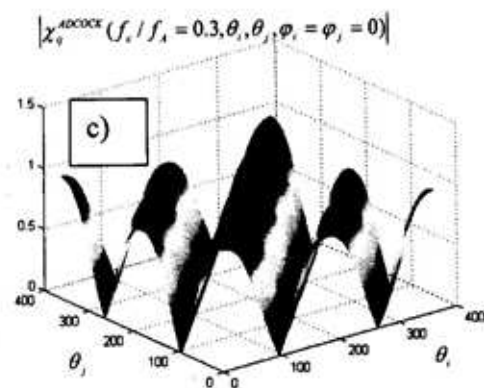
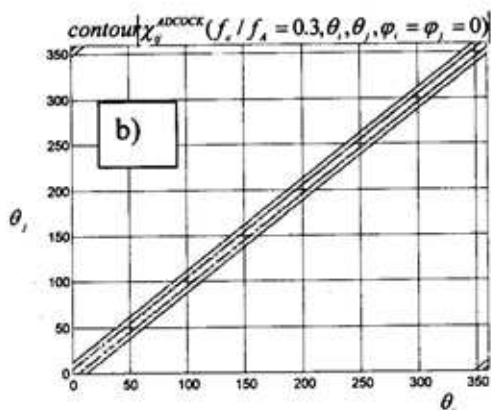
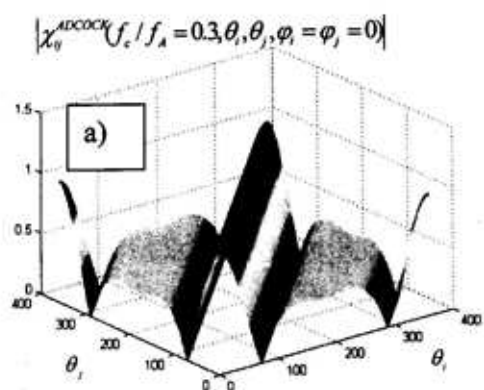
Funkcija neodređenosti tipa II, [16], antenskog niza ADCOCK može se izraziti na sledeći način:

čunate za vrednosti funkcije neodređenosti u opsegu od 0,95 do 1.

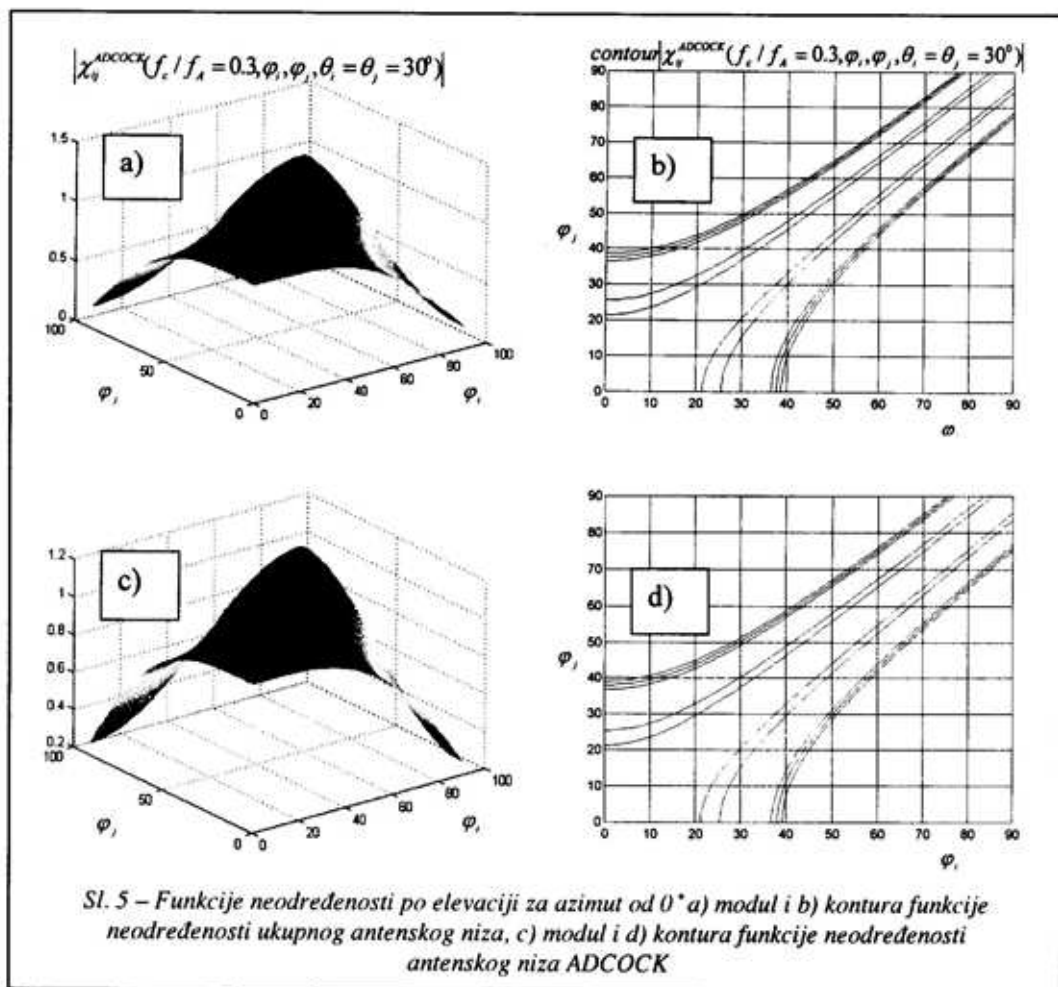
Na slikama 5a i 5c prikazane su funkcije neodređenosti, a na slikama 5b i 5d konture funkcija neodređenosti tipa I po elevaciji za azimut od  $30^\circ$  za ukupni odnosno antenski niz ADCOCK respektivno.

Sa slika 4 i 5 može se zaključiti da antenski niz ADCOCK ima neznatno lošije karakteristike neodređenosti od ukupnog antenskog niza.

Na slikama koje slede prikazani su uporedni rezultati procene smera WWAT-ovom metodom i metodom MUSIC dobijeni simulacijom. U prvom primeru na antenski niz ADCOCK od 8 antena dolazi sinusni signal na normalizovanoj centralnoj frekvenciji  $f_c/f_A = 10/32$



Sl. 4 – Funkcije neodredenosti po azimutu za elevaciju od 0 stepeni: a) modul i b) kontura funkcije neodredenosti ukupnog antenskog niza, c) modul i d) kontura funkcije neodredenosti antenskog niza ADCOCK

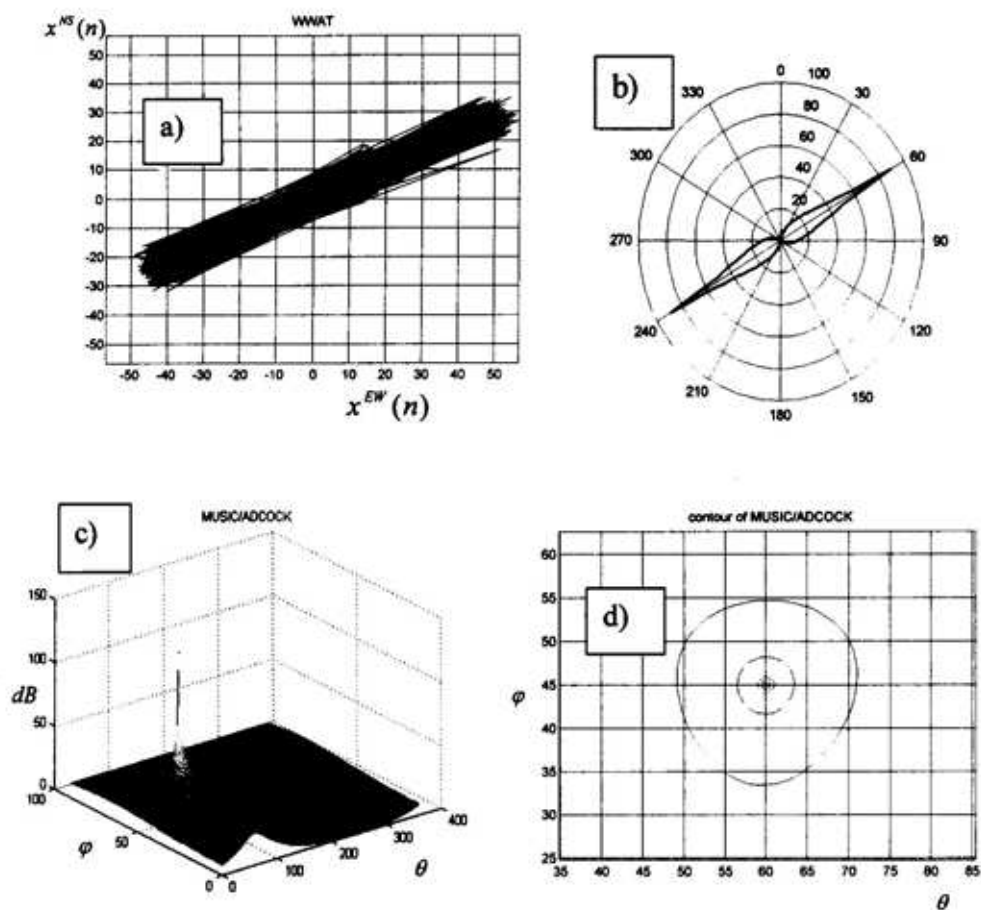


pod azimutom od 60° i elevacijom od 45°. Odnos signal/šum je 20 dB, a broj uzoraka signala  $N = 8192$ . Na slici 6a prikazana je procena pravca WWAT-ovom metodom, a na slici 6b procena pravca metodom MUSIC. Na slici 6c data je procena azimuta i elevacije, a na slici 6d kontura azimuta i elevacije korišćenjem metode MUSIC.

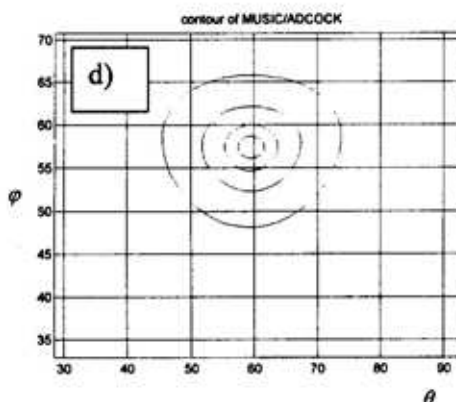
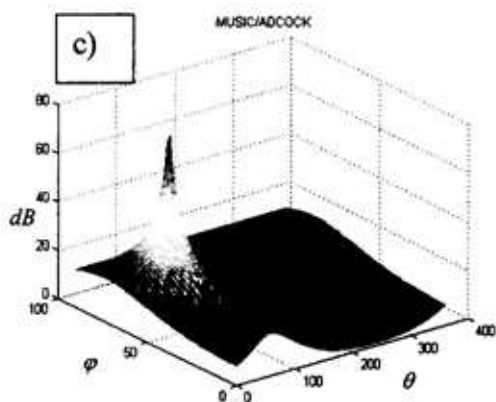
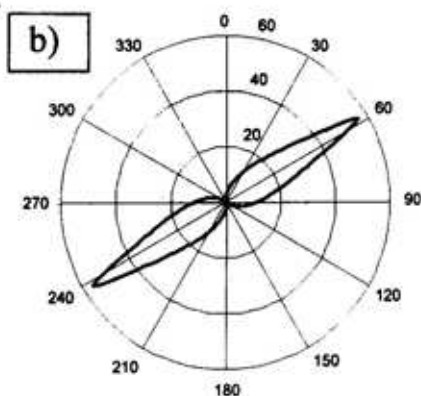
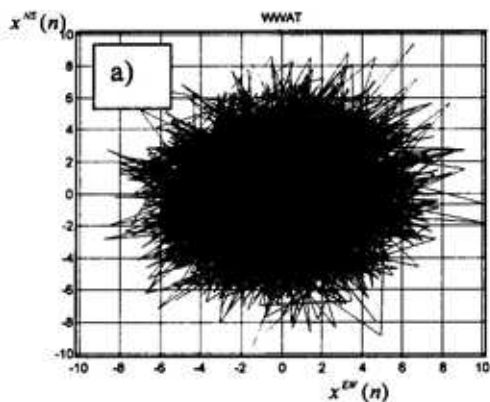
U drugom primeru simuliran je identični scenario kao u prethodnom slučaju, s tim što je odnos signal/šum -10 dB. Na slici 7a prikazana je procena

pravca WWAT-ovom metodom, a na slici 7b procena pravca metodom MUSIC. Na slici 7c data je procena azimuta i elevacije, a na slici 7d kontura procene azimuta i elevacije korišćenjem metode MUSIC. Sa slike se vidi da pri lošem odnosu signal/šum reda -10 dB MUSIC metoda daje još uvek korektnu procenu azimuta, s time što postoji greška u određivanju elevacije od oko 10°. U isto vreme WWAT-ova metoda ne daje nikakav smislen rezultat.

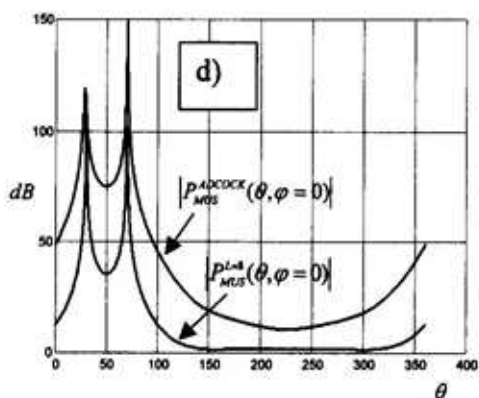
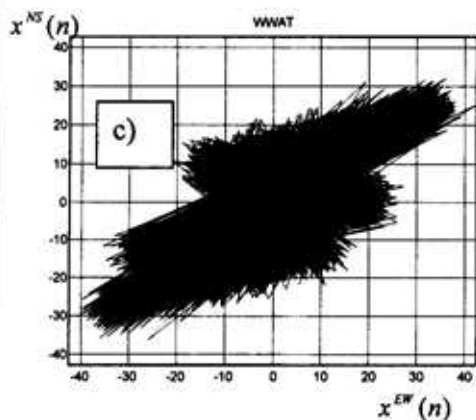
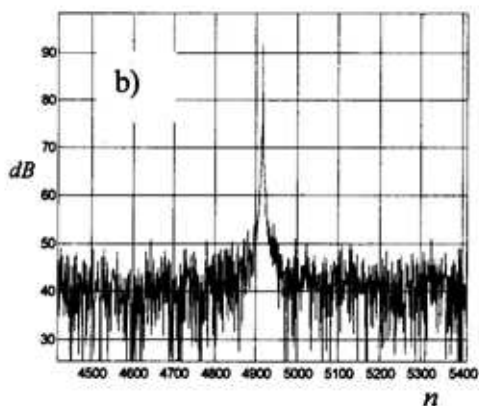
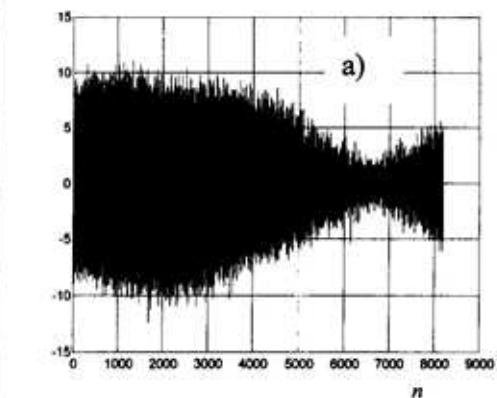




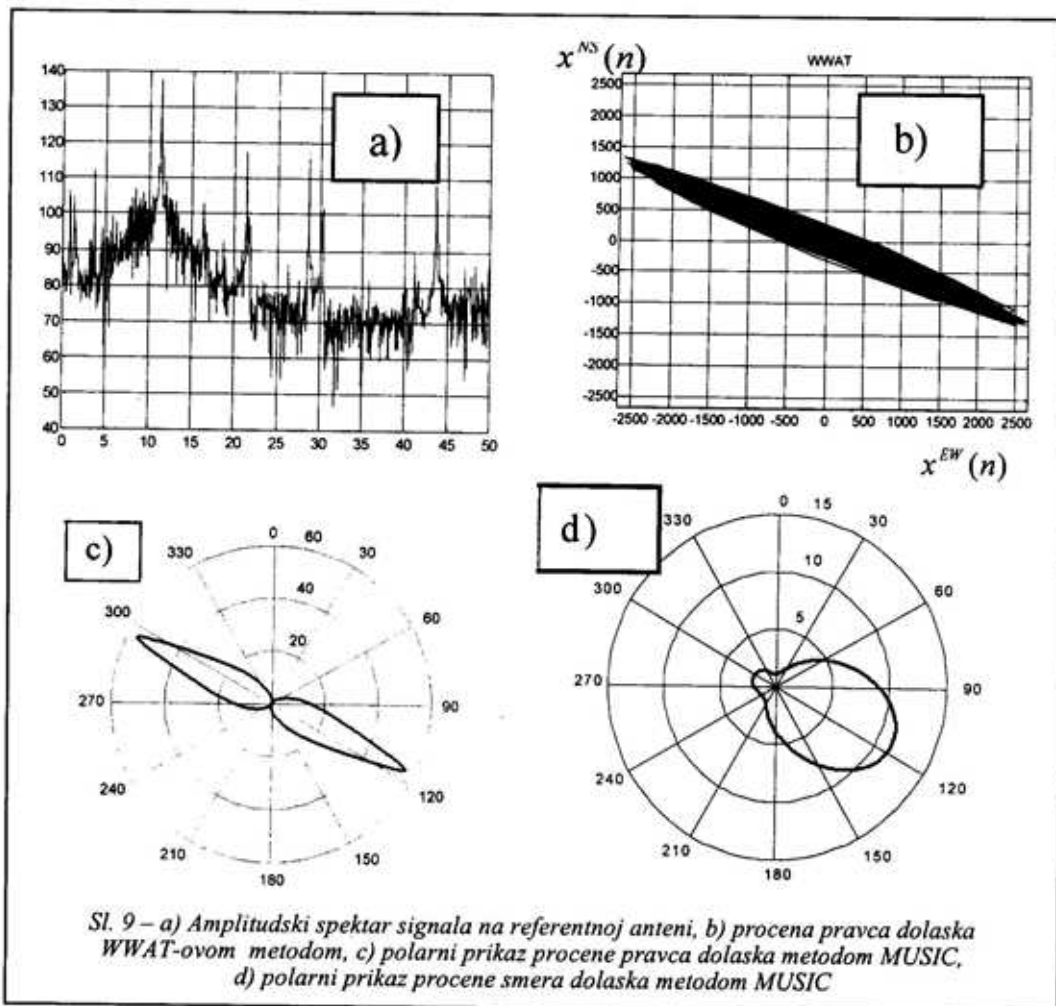
Sl. 6 – a) Procena pravca WWAT-ovom metodom, b) polarni prikaz procene pravca metodom MUSIC korišćenjem  $x^{NS}(t)$  i  $x^{EW}(t)$  signala, c) procena azimuta i elevacije metodom MUSIC, d) kontura procene azimuta i elevacije metodom MUSIC



Sl. 7 – a) Procena pravca WWAT-ovom metodom, b) polarni prikaz procene pravca MUSIC metodom korišćenjem  $x^{NS}(t)$  i  $x^{EW}(t)$  signala, c) procena azimuta i elevacije metodom MUSIC, d) kontura procene azimuta i elevacije metodom MUSIC



Sl. 8 – a) Uzorci signala na referentnoj anteni, b) amplitudski spektar signala na referentnoj anteni, c) procena pravca dolaska WWAT-ovom metodom, d) procena smera dolaska metodom MUSIC



Sl. 9 – a) Amplitudski spekter signala na referentnoj anteni, b) procena pravca dolaska WWAT-ovom metodom, c) polarni prikaz procene pravca dolaska metodom MUSIC, d) polarni prikaz procene smera dolaska metodom MUSIC

U trećem primeru simuliran je sledeći scenario. Na antenski niz ADCOCK dolaze dva sinusna signala na normalizovanoj centralnoj frekvenciji  $f_c/f_A = 0,5$  pod azimutima  $30^\circ$ , odnosno  $70^\circ$  i elevacijama od  $0^\circ$ . Normalizovane frekvencije sinusnih signala su 0,1 i 0,0001. Broj uzoraka signala je  $N = 8192$  (frekvencijski pomak sinusoida je manji od rezolucione ćelije FFT), a odnos signal/šum 10 dB. Na slici 8a prikazan je vremenski oblik signala, a na slici 8b amplitudski spekter signala na referentnoj anteni. Na

slici 8c prikazana je procena pravca dolaska signala WWAT-ovom metodom, a na slici 8d prikazani su rezultati procene smera dolaska signala metodom MUSIC. Sa slike 8d vidi se da, za razliku od WWAT-ove metode, metoda MUSIC daje korektnu procenu smera za oba superponirana signala.

### Rezultati praktične provere

Praktična provera mogućnosti primene metode MUSIC na antenske nizove

ADCOCK realizovana je u VF frekven-  
cijskom opsegu korišćenjem antenskog  
niza ADCOCK od 8 antena.

Na slici 9 prikazani su rezultati pro-  
cene smera dolaska radio-signalna na nor-  
malizovanoj centralnoj frekvenciji  
 $f_c/f_A=0,32$ . Na slici 9a prikazan je ampli-  
tudski spektar na referentnoj anteni, a na  
slici 9b procena pravca dolaska radio-  
signalna dobijena WWAT-ovom meto-  
dom. Na slici 9c prikazana je procena  
pravca dolaska signalna metodom MUSIC  
korišćenjem  $x^{NS}(t)$  i  $x^{EW}(t)$  signalna, a na  
slici 9d procena smera dolaska signalna  
tom metodom. Rezultati procene su upo-  
ređivani sa rezultatima dobijenim na re-  
alnom radio-goniometru na bazi  
WWAT-ove metode. Rezultati su se po-  
klapali unutar par stepeni (pri određiva-  
nju smera kod WWAT-ove metode uvek  
postoji subjektivna greška operatora).

Pri proceni smera metodom MUSIC  
(sl. 6d) dobijena je nešto šira lepeza od  
očekivane. Detektor na bazi Risanenovog  
MDL kriterijuma [17] detektovao je da  
postoje dva superponirana signala. Pret-  
postavka je da se radi o dva jonosferska  
talasa sa bliskim elevacijama dolaska na  
antenski niz.

## Zaključak

U radu je prikazan teorijski osnov  
primene metode MUSIC za određivanje  
smera dolaska signalna korišćenjem an-  
tenskih nizova ADCOCK. Formulisan je  
matematički model signalna na antenskom  
nizu ADCOCK. Izvedene su jednačine  
koje modeliraju transformaciju prenosne  
karakteristike (*array manifolda*) ukupnog  
antenskog niza u prenosnu karakteristiku

antenskog niza ADCOCK koju vrši  
adapter ADCOCK, što je jedan od dopri-  
nosa ovog rada. Ove jednačine predsta-  
vljavaju ključ za primenu metode MUSIC  
na antenske nizove ADCOCK.

Rezultati simulacije i praktične veri-  
fikacije pokazuju sledeće:

- antenski niz ADCOCK ima nešto  
lošije karakteristike neodređenosti i po  
azimutu i po elevaciji u odnosu na ukup-  
ni antenski niz. To znači da su potenci-  
jalne performanse ekvivalentnog troele-  
mentnog ADCOCK antenskog niza, u  
pogledu rezolucionih svojstava i neželje-  
nih pikova, neznatno lošije od istih ka-  
rakteristika ukupnog antenskog niza od  $L$   
 $= 4n$  antene. Drugim rečima, na osnovu  
funkcije neodređenosti može se teorijski  
i praktično očekivati da rezultati tačnosti  
procene smera metodom MUSIC, koriš-  
ćenjem ADCOCK antenskih nizova, budu  
neznatno lošiji od rezultata procene sme-  
ra metodom MUSIC, korišćenjem ukup-  
nog antenskog niza od  $L = 4n$  antena;

- stepen slobode antenskog niza  
ADCOCK jednak je 2, što znači da se  
primenom metode MUSIC mogu pro-  
storno razdvojiti do  $K = 2$  signala koja se  
preklapaju vremenski i spektralno, za ra-  
zliku od WWAT-ove metode koja omo-  
gućava procenu smera samo jednog dola-  
zećeg signalna. Stepenslobode ukupnog  
antenskog niza je  $L-1$ ;

- metoda MUSIC, primenjena na  
antenske nizove ADCOCK, daje bolje  
rezultate procene od WWAT-a pri loši-  
jem odnosu signal/šum. Analiza tačnosti  
procene smera biće predmet daljih istra-  
živanja;

- primenom metode MUSIC na an-  
tenske nizove ADCOCK moguće je, po-

red azimuta, proceniti i elevaciju dolaska signala, što WWAT-ova metoda ne omogućava. Ova mogućnost je od posebnog interesa sa aspekta realizacije tzv. single station goniometra za VF frekvencijski opseg;

– rezultati praktične provere pokazuju da je matematički model na kojem se zasniva primena metode MUSIC na antenske nizove ADCOCK korektan.

Rad predstavlja teorijsku osnovu za realizaciju tzv. single station goniometra za VF frekvencijski opseg korišćenjem postojeće ADCOCK antenske infrastrukture, modifikaciju postojećih radio-goniometara na bazi WWAT-a, kao i za realizaciju novih tehnološki modernijih multifunkcionalnih rešenja radio-goniometra (WWAT + MUSIC).

*Autori rada izražavaju zahvalnost svim pripadnicima EI i PED, a naročito pripadnicima VP 4522 Batajnica, što su proteklih godina, nesebično, radi napretka struke, pomogli da MUSIC metoda uspešno izade iz laboratorije. Njima je posvećen ovaj rad, u uverenju da će im biti od koristi.*

#### Literatura:

- [1] Watson, D. W., Wright, H. E.: Radio Direction Finding, Van Nostrand Reinhold Company LTD, 1971.
- [2] Prospektni materijal firme Telefunken
- [3] Schmidt, R.: Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, IEEE Trans, on Ant. and Prop., Vol. AP-34, No. 3., March 1986.

- [4] Erić, M., Obradović, M.: Metode za prostorno-frekvencijsku analizu signala, VII simpozijum TELFOR, Beograd, novembar 1999.
- [5] Monografija 50 godina Vojnotehničkog instituta, VTI VJ, 1998, str. 84.
- [6] Publikacija JANES, 1999.
- [7] Erić, M.: Prostorno-frekvencijska analiza radio-frekvencijskog spektra, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1999.
- [8] Erić, M., Skender, M.: Automatic Band Segmentation Based on Spatio-Frequency Processing Using MUSIC Algorithm, 50-th Vehicular Technology Conference – VTC'99, September 19–22, Amsterdam, The Netherlands.
- [9] Erić, M., Dukić, M., Obradović, M.: Frequency hopping signal separation by spatio-frequency analysis based on the MUSIC method, Sep. 06, 2000 – Sep. 08, 2000, IEEE 6<sup>th</sup> International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA 2000), Parsippany, NJ, USA.
- [10] Erić, M., Obradović, M.: Subspace-based joint time-delay and frequency-shift estimation in asynchronous DS-SS-CDMA systems, Electronics Letters, 3<sup>rd</sup> July 1997, Vol. 33, No.14.
- [11] Erić, M., Parkvall, S., Dukić, M., Obradović, M.: An algorithm for joint direction of arrival, time-delay and frequency-shift estimation in asynchronous DS-SS-CDMA systems, Fifth IEEE International Symposium on Spread-Spectrum Techniques and Applications, IEEE ISSSTA'98, Sun City, South Africa, pp. 595–598.
- [12] Erić, M., Parkvall, S., Obradović, M.: MUSIC type algorithm for joint modulation phase-shift, time-delay and frequency-shift estimation in asynchronous DS-SS-CDMA systems, Fifth IEEE International Symposium on Spread-Spectrum Techniques and Applications, IEEE ISSSTA'98, Sun City, South Africa, pp. 102–105.
- [13] Erić, M., Dukić M.: Procena smera dolaska radio signala MUSIC metodom korišćenjem antenskih podnizova, IX simpozijum TELFOR, Beograd, novembar 1999.
- [14] Erić, M., Dukić, M., Pokrajac, I.: Procena smera dolaska radio-signala MUSIC metodom korišćenjem ADCOCK antenskih nizova, IX simpozijum TELFOR, Beograd, novembar 1999.
- [15] Erić, M., Zejak, A., Obradović, M.: Ambiguity Characterization of Arbitrary Antenna Array: Type I Ambiguity, Fifth IEEE International Symposium on Spread-Spectrum Techniques and Applications, IEEE ISSSTA'98 Sun City, South Africa, pp. 399–403.
- [16] Erić, M., Zejak, A., Obradović, M.: Ambiguity Characterization of Arbitrary Antenna Array: Type II Ambiguity, Fifth IEEE International Symposium on Spread-Spectrum Techniques and Applications, IEEE ISSSTA'98, Sun City, South Africa, pp. 955–958.
- [17] Wax, M., Ziskind, I.: Detection of the Number of Coherent Signals by the MDL Principle, IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Processing, VOL. 37., NO.8, 1989.