

# Radarski sistem baziran na analizi signala emitovanih iz postojećih izvora

Dušan Žarić, Miloš Daković, *Member, IEEE*, Miloš Brajović, *Student Member, IEEE*

**Sažetak**—U radu je predložena primjena radarskih sistema u kombinaciji sa postojećim izvorima signala. Kao primjer postojećeg signala uzet je slučajni signal, odnosno linearno frekventni modulisan (LFM) signal, emitovan sa bazne stanice mobilne telefonije. Opisan je model radarskog prijemnika koji koristi tako emitovane signale za detekciju parametara kretanja vozila na raskrsnici. Dati su rezultati i poređenja korelacionog i radarskog prijemnika baziranog na množenju poslatog i primljenog signala.

**Ključne riječi**—radar; digitalna obrada signala; GSM signali.

## I. UVOD

Radarski uređaj koji koristi radio talase za otkrivanje ciljeva od interesa, nezavisno od perioda dana i meteoroloških uslova. Pored toga što detektuje prisustvo objekata u prostoru, radar može dati i preciznije informacije o njima, kao što su udaljenost objekta, brzina kretanja i slično. Arhitekture radarskih sistema se razlikuju zavisno od njihove namjene, a danas se koriste u brojnim oblastima kao što su drumski i pomorski saobraćaj, praćenje meteoroloških uslova, civilno i vojno vazduhoplovstvo, ispitivanje vasione, praćenje satelita i slično.

Obrada radarskih signala [1], odnosno izvlačenje informacije od interesa predstavlja naučnu oblast koja se konstantno razvija i unapređuje uvođenjem novih metoda i koncepata. Radarski sistemi koji su zasnovani na slučajnim talasnim oblicima emitovanog signala su od posebnog interesa [2], [3], [4]. U ovom radu biće razmatran koncept radara zasnovan na korišćenju signala mobilne telefonije definisan u [5].

Kada radarski signal dođe u kontakt sa objektom, odbija se u više pravaca zavisno od oblika i vrste spoljašnje površine objekta. Prijemnik radara detektuje reflektovane signale i obrađuje ih, kako bi se na osnovu njihove analize dobili podaci o udaljenosti i brzini kretanja objekta. Na ovaj način se vrši detekcija prisustva objekta u prostoru. Domet je jedna od karakteristika radara i predstavlja maksimalno rastojanje na kojem radar može izvršiti detekciju objekta.

Danas je signal mobilne telefonije prisutan u većini urbanih sredina, pa se radarski sistem koji ne generiše sopstvene signale već za analizu koristi postojeće signale, može smatrati veoma poželjnim i efikasnim rješenjem sa aspekta kompleksnosti, energetske efikasnosti i korišćenja frekventijskog spektra.

Nezavisno od tehnologije prenosa podataka, za emitovanje signala mobilne telefonije koriste se bazne stanice. One

sadrže primopredajnike, antene, kao i prateću telekomunikacionu opremu za obradu signala i povezivanje na globalnu mrežu. Bazne stanice šalju signale na jednoj, a primaju ih na drugoj frekvenciji. Razlikuju se po frekventijskim opsezima koje koriste za prenos signala, pri čemu mogu raditi sa više njih istovremeno, a to su frekvencije oko 900 MHz, oko 1800 MHz ili oko 2100 MHz. Ovi frekventijski opsezi se koriste za G1, G2 i G3 mobilne telekomunikacione mreže, respektivno. Antene baznih stanica mogu emitovati jednako u svim smjerovima ili dominantno u određenom sektoru. Kod GSM (Global System for Mobile Communications) standarda, koji je najzastupljeniji u svijetu, signali od bazne stanice prema mobilnim terminalima se prenose u frekventijskom opsegu od 25 MHz, koji se nalazi između 935 i 960 MHz. Za prenos signala u suprotnom smjeru tj. od mobilnih uređaja do bazne stanice, koristi se opseg od 25 MHz koji je lociran na frekvencijama od 890 do 915 MHz.

U nastavku rada je izložena ideja da se signali mobilne telefonije iskoriste za analizu u prijemniku radara. Cilj ovako konstruisanog sistema je da na osnovu informacija dobijenih iz signala reflektovanog od objekta, inicira promjenu parametara sistema signalizacije na raskrsnici ili u sličnim okruženjima. Ovakva implementacija je predložena kako se spektar ne bi dodatno opterećivao generisanjem novih signala, već se u prijemniku analiziraju primljeni signali iz postojećih izvora.

## II. MODEL RADARSKOG SISTEMA

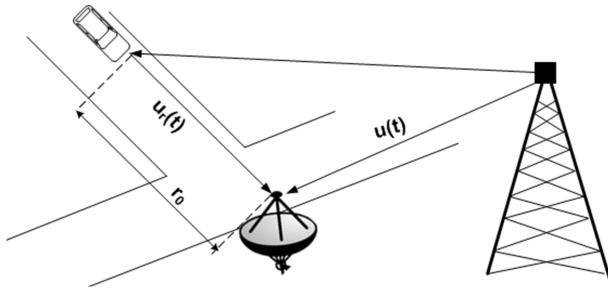
Kao što je prikazano na slici 1, radarski sistem koji se sastoji iz dvije prijemne antene, postavljen je na raskrsnici sa ciljem detekcije rastojanja i brzine približavanja vozila. Objekat od interesa je vozilo koji se kreće u smjeru ka radaru. Parametri koji su važni za analizu su njegovo rastojanje od raskrsnice tj. radara, kao i brzina kretanja vozila. Ukoliko se poznaju ovi parametri, moguće je u zavisnosti od njihovih vrijednosti inicirati promjenu signalizacije ili aktivirati sistem upozorenja na raskrsnici. Ovo je samo jedna od ideja koje mogu biti realizovane u slučaju detektovanja pomenutih parametara, a moguća primjena ovakvog sistema nije ograničena na ovaj slučaj.

U predloženom sistemu, radar ne emituje signal, već se za detekciju koristi postojeći signal. Pretpostavimo da se bazna stanica sa sektorskom antenom nalazi iza opisanog radara, postavljena tako da radar prima direktan signal sa bazne stanice, kao i reflektovani signal od automobila. Za početak, pretpostavimo da su prijemne antene radara usmjerene i podešene tako da jedna (koja je usmjerena ka baznoj stanici) prima samo direktan signal od bazne stanice, dok druga antena (koja je usmjerena ka raskrsnici) prima samo signal reflektovan od automobila.

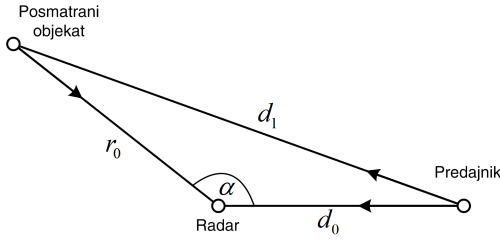
Dušan Žarić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 81000 Podgorica, Crna Gora, e-mail: zarićdusan@gmail.com

Miloš Daković, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 81000 Podgorica, Crna Gora, e-mail: milos@ac.me

Miloš Brajović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 81000 Podgorica, Crna Gora, e-mail: milosb@ac.me



Slika 1. Prikaz predloženog modela radarskog sistema



Slika 2. Geometrijski model posmatranog radarskog sistema

Rezoluciju predloženog radarskog sistema možemo izračunati na sljedeći način. Pretpostavimo da se radarski sistem nalazi na udaljenosti  $d_0$  od predajnika i na udaljenosti  $r_0$  od posmatranog objekta, pri čemu je ugao između linija radar-predajnik i radar-posmatrani objekt  $\alpha$ . Uprošćeni geometrijski model je dat na slici 2.

Udaljenost između predajnika i posmatranog objekta iznosi:

$$d_1 = \sqrt{r_0^2 + d_0^2 - 2r_0d_0 \cos \alpha}$$

Razlika u pređenim putevima talasa koji se od predajnika kreće ka radaru i talasa koji se reflektuje od posmatranog objekta je:

$$d = d_1 + r_0 - d_0$$

Ova udaljenost uzrokuje kašnjenje signala  $T_0$  koje estimiramo i na osnovu kojeg određujemo  $d$  i udaljenost  $r_0$  po formuli:

$$r_0 = \frac{d(2d_0 + d)}{2(d + d_0 - d_0 \cos \alpha)}$$

koja se za vrijednosti  $d_0 \gg d$  može aproksimirati sa

$$r_0 \approx \frac{1}{1 - \cos \alpha} d$$

Odavde možemo odrediti rezoluciju radarskog sistema pri određivanju udaljenosti  $r_0$  kao:

$$\Delta r_0 = \frac{1}{1 - \cos \alpha} \frac{c}{B}$$

gdje je  $c$  brzina prostiranja svjetlosti a  $B$  frekvijski opseg emitovanog signala.

Vidimo da je rezolucija predloženog sistema manja od rezolucije konvencionalnog radarskog sistema  $\Delta r = c/2B$  pri čemu je optimalni slučaj  $\alpha = 180^\circ$  kada predloženi sistem ima rezoluciju jednaku konvencionalnom sistemu.

Na primjer ukoliko je  $B = 25$  MHz (predajnik je GSM bazna stanica) i  $\alpha = 120^\circ$  dobija se rezolucija  $\Delta r_0 = 8$  m .

### III. SIMULACIJA PREDLOŽENOG SISTEMA

U nastavku rada predložene su dva koncepta radarskog prijemnika. U prvom konceptu prijemnik za detekciju parametara od interesa koristi korelaciju poslatog i primljenog signala. U skladu sa matematičkim modelom [6], korelacijom ova dva signala dobija se rezultujući signal, čijom se analizom mogu procijeniti željeni parametri objekta (rastojanje i brzina).

Neka je  $u(t)$  vremenski ograničen signal kojeg radarski sistem prima direktno od predajnika, pri čemu je  $0 \leq t \leq T_r$ , gdje je  $T_r$  vrijeme ponavljanja impulsa. Označimo sa  $u_r(t)$  signal koji je nakon refleksije od posmatranog objekta došao do prijemnog dijela radara koji je usmjeren ka objektu. Signal  $u_r(t)$  možemo predstaviti relacijom:

$$u_r(t) = Au(t - T_0) + \epsilon(t)$$

gdje  $\epsilon(t)$  označava šum i neželjene smetnje uzrokovane odbijanjem signala od okolnih objekata koji nisu od interesa u analizi,  $A$  označava slabljenje reflektovanog signala, dok je  $T_0$  kašnjenje uzrokovano konačnom brzinom prostiranja elektromagnetnih talasa i računa se kao:

$$T_0 = d/c$$

gdje je  $c$  brzina prostiranja elektromagnetnog talasa u posmatranoj sredini a  $d$  se može povezati sa rastojanjem radara od posmatranog objekta  $r_0$ .

Rezultujući signal možemo dobiti korelacijom signala:

$$R(\tau) = \int_0^{T_r} u_r(t)u^*(t - \tau)dt$$

Udaljenost mete se može izračunati na osnovu kašnjenja  $T_0$ . Maksimalna apsolutna vrijednost  $R(\tau)$ , kada nema šuma, se dobija za  $\tau = T_0$ , odnosno:

$$T_0 = \arg \max_{\tau} |E[R(\tau)]|$$

Pretpostavimo da su emitovani i primljeni signal demodulisani u opsegu  $|f| < B/2$ . Po teoremi o odabiranju moramo imati  $N = BT_r$  odbiraka u jednom impulsu. Odbirke signala  $u(t)$  i  $u_r(t)$  označimo sa  $u(n)$  i  $u_r(n)$ . Korelacija u diskretnom domenu je:

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} u_r(n)u^*(n - k)$$

Maksimum  $R(\tau)$  nalazimo sa korakom diskretizacije  $\Delta\tau = T_r/N = 1/B$ , a rezolucija radara pri određivanju udaljenosti je  $\Delta r = c/(2B)$ . Da bi definisali maksimalno rastojanje mete  $r_{\max}$  tj. domet radara, moramo uzeti  $k = 0, 1, \dots, k_{\max}$ , gdje je:

$$k_{\max} = \frac{r_{\max}}{\Delta r} = \frac{2Nr_{\max}}{T_r c}$$

Za računanje korelacije koristimo FFT, pri čemu je:

$$R(k) = \text{FFT}^{-1}[\text{FFT}(u_r(n))\text{FFT}^*(u(n))]$$

U cilju analize opisanog korelacionog prijemnika, kao emitovani signali posmatrani su slučajno generisani signal i linearno frekvijski modulirani (LFM) signal. Na strani prijema je simuliran slučaj bez prisustva smetnji (idealni slučaj) i

slučajevi kada se smetnja može modelovati kao slučajni signal, sinusoidalna odnosno LFM smetnja.

U drugom konceptu radarskog prijemnika se umjesto korelacionog koristi prijemnik kod kojeg se poslati signal množi sa konjugovano kompleksnim primljenim signalom, nakon čega se rezultat propusti kroz NF filter i pododabere [7]. Na ovaj način se uz adekvatno odabrani frekvencijski opseg filtra i stepen pododabiranja, dobija koristan dio signala iz kojeg se mogu rekonstruisati potrebne informacije. U ovoj realizaciji parametar od interesa je rastojanje objekta i može se estimirati u skladu sa predloženim matematičkim modelom.

Neka je  $u(t)$  linearno frekvencijski modulisan signal ograničen na vremenski interval  $0 \leq t \leq T_r$ , gdje je  $T_r$  vrijeme ponavljanja impulsa. Pretpostavimo da se  $u(t)$  emituje sa bazne stanice i detektuje na strani prijema.

$$u(t) = e^{j\pi Bt^2/T_r}$$

Sa  $u_r(t)$  je označen signal koji je nakon refleksije od posmatranog objekta došao do prijemnog dijela radara koji je usmjeren ka objektu,

$$u_r(t) = Au(t - \frac{2r}{c}) + \epsilon(t)$$

Rezultujući signal dobijamo kao:

$$q(t) = Au^*(t - \frac{2r}{c})u(t) + \epsilon(t)u(t)$$

Uz realnu pretpostavku da je  $T_r$  mnogo veće od kašnjenja  $2r/c$ , da je rastojanje objekta konstantno i uz zanemarivanje smetnji  $\epsilon(t)$ , rezultujući signal možemo zapisati kao:

$$q(t) = Ae^{j\rho} e^{2j\pi B \frac{2r}{cT_r} t}$$

gdje je sa  $\rho$  označen dio faze signala  $q(t)$  koji ne zavisi od vremena, dok je frekvencija

$$f_q = \frac{2B}{cT_r} r$$

proporcionalna rastojanju  $r$ . Ovako dobijeni signal se diskretizuje sa korakom odabiranja  $T_s$  pa je broj odbiraka  $N = T_r/T_s$ . Frekvencija  $f_q$  se određuje kao pozicija maksimuma diskretne Furijeove transformacije (DFT) rezultujućeg signala. Signal ima  $N$  odbiraka, kao i odgovarajuća DFT, pa je frekvencijski opseg  $0 \leq f < 1/T_r$  podijeljen na  $N$  diskretnih frekvencija koje se međusobno razlikuju za  $\Delta f = 1/T_s$ . To znači da je ovako estimirana udaljenost  $r$  diskretna sa korakom diskretizacije  $\Delta r = \frac{c}{2B}$ , koji predstavlja rezoluciju radara. Rastojanje objekta se dalje računa kao:

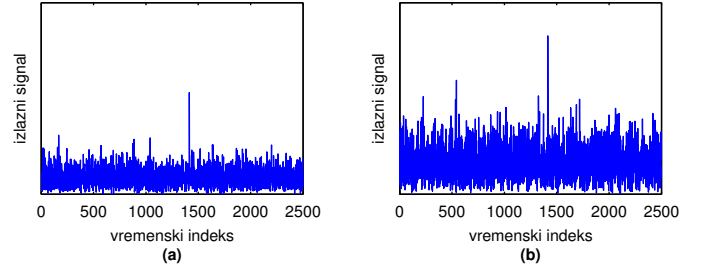
$$r = k_0 \Delta r, \quad k_0 = \arg \max_k |\text{FFT}(q(n))|$$

U analizi ovako realizovanog radarskog prijemnika razmatrani su slučajevi bez dodatnih smetnji, sa prisustvom šuma, sinusoidalne i LFM smetnje.

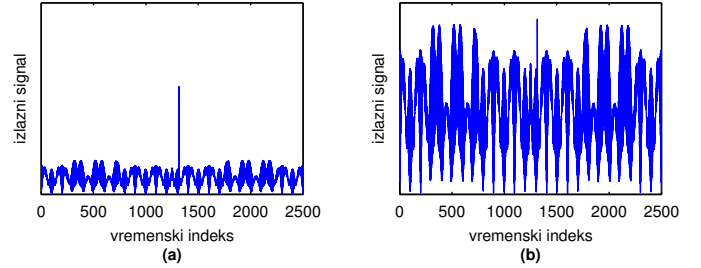
#### IV. REZULTATI I ANALIZA

U nastavku su prikazani rezultati simulacija za opisane koncepte radarskog sistema pri čemu su simulirani različiti tipovi smetnji na prijemu.

Zbog jednostavnosti proračuna, pretpostavljeno je da se radar i bazna stanica nalaze na istoj poziciji ( $\alpha = 180^\circ$ ,



Slika 3. Signal na izlazu iz NF filtra - a) slabi slučajni šum, b) jaki slučajni šum



Slika 4. Signal na izlazu iz NF filtra - a) slaba LFM smetnja, b) jaka LFM smetnja

$d_0 = 0$ ). Frekvencijski opseg bazne stanice je  $B = 25\text{MHz}$ , korak odabiranja je  $T_s = 1/B$ , broj odbiraka u jednom impulsu emitovanog signala je  $M = 250000$  a za programsku simulaciju prvog koncepta je uzeto  $M_1 = 10000$  radarskih impulsa, pri čemu je trajanje jednog impulsa  $T_r = M/B$ .

Za koncept korelacionog prijemnika se u idealnom slučaju tj. bez prisustva smetnji na prijemu, ne uočavaju razlike u efikasnosti sistema kada se kao poslati signal koristi slučajno generisani ili LFM signal. Korišćeno je  $M = 250000$  odbiraka u jednom impulsu poslanog signala ( $T_r = 0.01$ ). Dobijeni rezultati u ovom slučaju pokazuju da za zadate vrijednosti rastojanja od 100 do 900 m i brzine od 5 do 30 m/s, estimirane vrijednosti odstupaju najviše do 4 m za rastojanje, odnosno 2 m/s za brzinu.

U tabeli I su dati rezultati analize uticaja šuma na tačnost estimacije položaja i brzine. Analiza uticaja sinusoidalne smetnje je prikazana u tabeli II, dok je analiza smetnje koja se može modelovati kao LFM signal data u tabeli III. Podaci navedeni u tabelama I -III se odnose na radar sa korelacionim prijemnikom. Navedeni rezultati su dobijeni nakon više sprovedenih iteracija za svaku od simulacija. Navedene SNR vrijednosti predstavljaju prosječnu vrijednost.

U drugom konceptu se emitovani LFM signal po opisanom algoritmu analizira u prijemniku, pri čemu su prikazani rezultati simulacije u slučaju bez i sa prisustvom šuma. U idealnom slučaju, bez šuma na prijemu, se rastojanje objekta može uspješno rekonstruisati sa velikom preciznošću. U nastavku je prikazan rezultujući signal na izlazu iz filtra, pri čemu se za parametre simulacije  $r_0 = 200$  m,  $M = 250000$  odbiraka,  $T_r = 0.01$  i korak odabiranja signala nakon filtra  $k = 100$ , dobija estimirano rastojanje  $r = 198$  m.

U simulaciji prisustva slučajnog šuma na strani prijema, čiji su rezultati navedeni u tabeli IV, uspješna estimacija rastojanja

se može izvršiti i za znatno veće vrijednosti SNR u odnosu na istu simulaciju korelacionog prijemnika.

Na slici 3 je prikazan rezultujući signal za slučaj prisustva slabijeg i jačeg šuma. Uticaj LFM smetnje na izlazni signal je za slučaj slabe i jake smetnje prikazan na slici 4. U tabelama V i VI navedeni su rezultati analize uticaja sinusoidalnih i LFM smetnji u posmatranom slučaju.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je predložen koncept prijemnog dijela radara, koji koristi signale emitovane sa bazne stanice mobilne telefonije. Na osnovu analize primljenih signala se određuju parametri od interesa. Na ovaj način se izbjegava generisanje novih signala koji dodatno opterećuju frekvencijski spektar.

Pokazano je da prijemnik zasnovan na množenju poslatog i primljenog signala ima bolje performanse u odnosu na korelacioni prijemnik. Tako se u ovom prijemniku, za iste parametre simulacije, rastojanje objekta može uspješno estimirati i za intenzitet smetnje koji kod korelacionog prijemnika prouzrokuje netačnu detekciju parametara objekta.

Rezultati simulacija pokazuju da ovako realizovan sistem može efikasno detektovati parametre od interesa (rastojanje i brzinu automobila) u realnim uslovima tj. za brzine kretanja vozila do 150 km/h i rastojanje do 1 km.

## LITERATURA

- [1] Lj. Stanković, M. Daković, T. Thayaparan, *Time-Frequency Signal Analysis with Applications*, Artech house, 2013.
- [2] T. Thayaparan, M. Daković, Lj. Stanković, „Mutual interference and low probability of interception capabilities of noise radar”, *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 2, No. 4, Aug. 2008, pp. 294-305.
- [3] S. Djukanovic, M. Dakovic, T. Thayaparan, Lj. Stankovic, „Method for Nonstationary Jammer Suppression in Noise Radar Systems”, *IET Signal Processing*, Vol. 4, No. 3, June 2010, Page(s) 305-313
- [4] M. Dakovic, T. Thayaparan, S. Djukanovic, Lj. Stankovic, „Time-frequency-based non-stationary interference suppression for noise radar systems”, *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 2, No. 4, Aug. 2008, pp. 306-314
- [5] M. Daković, D. Žarić „Radarski sistem baziran na analizi signala mobilne telefonije”, *IT 2012*, Žabljak, februar 2012.
- [6] M. Daković, „Estimacija parametara signala dekompozicijom u vremensko-frekvencijskom domenu sa primjenom na radarske signale.” *doktorska disertacija*, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, 2005.
- [7] T. Thayaparan, M. Daković, Lj. Stanković, „Mutual interference and low probability of interception capabilities of noise radar”, *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 2, No. 4, Aug. 2008, pp. 294-305.

## ABSTRACT

This paper considers application of radar system that use existing signal sources. Random generated or linear frequency-modulated signals are used as transmitted signal. Proposed radar receiver model for observing vehicle motion on crossroads is described, along with usage of existing mobile network signal generated from the base station. In the end, measurement results and comparison of correlation radar receiver and receiver based on signal multiplication are shown.

## Radar system based on existing signal analysis

Dušan Žarić, Miloš Daković, Miloš Brajović

Tabela I. UTICAJ ŠUMA NA ESTIMACIJU POLOŽAJA I BRZINE ZA SLUČAJ KORELACIONOG RADARA

Zadato		$u(t)$	Estimirano		SNR [dB]
$r_0$ [m]	$V$ [m/s]		$r$	$v$	
200	10	randn	204.0	9.37	-26.03
		LFM	204.0	9.37	-24.10
500	20	rand	—	—	-28.95
		LFM	504.0	18.75	-26.03
500	20	LFM	—	—	-27.03

Tabela II. UTICAJ SINUSOIDALNE SMETNJE NA ESTIMACIJU POLOŽAJA I BRZINE ZA SLUČAJ KORELACIONOG RADARA

Zadato		$u(t)$	Estimirano		SNR [dB]
$r_0, V, w_1, t_1$			$r$	$v$	
$r_0 = 100, V = 20$ $w_1 = 100$ $t_1 = -T_r/2, T_r/2, M_1$		rand	—	—	-32.66
		LFM	96.0	23.43	-30.71
		LFM	—	—	-31.30
$r_0 = 400, V = 20$ $w_1 = 0.5$ $t_1 = -3/2, 3/2, M_1$		rand	—	—	-32.12
		LFM	396.0	23.43	-30.16
		LFM	—	—	-31.50

Tabela III. UTICAJ LFM SMETNJE NA ESTIMACIJU POLOŽAJA I BRZINE ZA SLUČAJ KORELACIONOG RADARA

Zadato		$u(t)$	Estimirano		SNR [dB]
$r_0, V, w_1, t_1$			$r$	$v$	
$r_0 = 200, V = 30$ $w_2 = \pi B/10$ $t_2 = -1/2, 1/2, M_1$		rand	—	—	-28.94
		LFM	204.0	28.12	-30.80
		LFM	—	—	-33.00

Tabela IV. ODREĐIVANJE UDALJENOSTI OBJEKTA U USLOVIMA JAKOG ŠUMA

Zadato	Estimirano	SNR
$r_0$ [m]	$r$	[dB]
100	90	-36.09
200	198	-35.50
500	498	-34.50
500	—	-36.40

Tabela V. REZULTATI SIMULACIJE ZA SLUČAJ SINUSOIDALNE SMETNJE KOD LFM RADARA

Zadato	Estimirano	SNR
$r_0$ [m], $w_1, t_1$	$r$	[dB]
$r_0=400$	390	-30.16
$w_1 = 0.5$	390	-31.50
$t_1 = -3/2, 3/2, M$	390	-42.00
	—	-42.50

Tabela VI. REZULTATI SIMULACIJE ZA SLUČAJ LFM SMETNJE KOD LFM RADARA

Zadato	Estimirano	SNR
$r_0$ [m], $w_2, t_2$	$r$	[dB]
$r_0 = 200$	198	-30.80
$w_2 = \pi B/10$	198	-33.00
$t_2 = -1/2, 1/2, M$	198	-48.00
	—	-48.50