PROSTORNO-DIVERZITI¹ RADARSKI SISTEMI

Rad tretira suštinu prostorno-diverziti metode radiolokacije, koja je danas u aplikacijama savremenih radarskih sistema, kao direktan odgovor na brz razvoj radarskih ometača i ciljeva, postala vrlo aktuelna. Kroz komparativni prikaz, sa klasičnim monostatičkim radarskim sistemima, istaknut je niz prednosti prostorno-diverziti radarskih sistema — povećana daljina otkrivanja, smanjenje efekata ometanja, tačnije određivanje koordinata ciljeva, pouzdaniji rad sistema, veća žilavost... Na žalost, prednosti su plaćene cenom i složenošću ovih sistema.

Pristup problemu

Radarski diverziti (prostorni, frekvecijski, vremenski i njihove kombinacije) jesu proizvod dijalektičkog razvoja radiolokacije »po spirali« i direktan su uzrok, ili posledica, razvoja *radarskih ometača i radarskih ciljeva*.²

Razvoj ometača, uređaja koji imaju za cilj da onemoguće misiju radarskih sistema, uvek je izazivao pronalaženje adekvatnih metoda zaštite i njihove aplikacije na radarima. Razvoj sredstava za *protivelektronska dejstva* (PED) i metoda i uređaja za *protivelektronsku zaštitu* (PEZ), u periodu posle drugog svetskog rata, imao je vrtoglavi trend rasta. Ilustracije radi, do danas je na radarskim sistemima aplicirano na stotine metoda i uređaja PEZ-a, zbog čega su postali skupi, složeni, komplikovani za eksploataciju, pa i pored toga, još uvek jedni od najkritičnijih podсистема u sistemima višeg reda.

Savremena sredstva ratne tehnike (*radarski ciljevi*), bilo da su u pitanju letilice, plovila ili borbena i neborbena vozila, razvijaju se u pravcu povećanja brzine i smanjenja radarske površine što u prvi plan, pred projektante savremenih radarskih sistema, nameće za-

hteve za većom: daljinom otkrivanja, rezolucijom, pouzdanošću rada i zaštitom od ometanja.

Problem se, očigledno, može rešavati samo uvođenjem novih metoda radiolokacije kroz aplokacije u savremenim radarskim sistemima. Neki od njih — radarski diverziti npr., koji, iako poznati otkad i klasični radarski sistemi, tek danas, zahvaljujući naglom razvoju ometača i ciljeva, dostižu dominantnu primenu. Zahvaljujući svojim karakteristikama, posebno u zaštiti od ometanja i daljini otkrivanja, ovi sistemi postaju dominantni u razvoju i primeni — za šta vodeće armije planiraju ogromna sredstva za razvoj i uvođenje u naoružanje.

Zbog aktuelnosti teme, u ovom i naredna dva rada obrađuju se prostorni, frekvencijski, vremenski i jedna kombinacija — frekvencijsko-vremenski diverziti metoda radiolokacije respektivno, kroz odgovarajuće aplikacije u savremenim radarskim sistemima.

Definicije i pojmovna određenja

Pod *prostorno-diverziti radiolokacijom* podrazumevamo radarsku metodu otkrivanja i određivanja koordinata objekata u prostoru sa više različitih lokacija. Zasnovana je na prirodi raspršenja elektromagnetne energije od

¹ Naziv potiče od francuske reči »diversité«, što znači različitost, raznovrsnost, raznolikost [3].

² Nadalje ćemo sve objekte, od kojih se reflektuju prijemni signali, zvati *ciljevima*.

a)

b)

Sl. 1 — Prostorno-diverziti radarski sistemi realizovani od:
a) monostatičkih radara, i b) multistatičkih radara

»osvetljenih« radarskih ciljeva u svim pravcima, što omogućava istovremenu radiolokaciju na različitim lokacijama dva ili više prijemnika.³

Ova metoda radiolokacije primenjena je kod prostorno-diverziti radarskih sistema, koji mogu biti realizovani od: dva ili više monostatičkih radara ili, jednog ili više multistatičkih radara (slika 1).

Prema metodi određivanja koordinata, prostorno-diverziti radarski sistemi uslovno se mogu podeliti na: *pasivne*, *poluaktivne* i *aktivne*. Pasivni prostorno-diverziti radarski sistemi imaju samo prijemnike i vrše radiolokaciju samo onih ciljeva koji zrače elektromagnetnu energiju. Takvi sistemi nemaju predajnike.

Poluaktivni prostorno-diverziti radarski sistemi poseduju bar jedan aktivan predajnik kojim se »osvetljavaju« ciljevi u prostoru i više razdvojenih prijemnika pomoću kojih se, na temelju reflektovanih/raspršenih signala, vrši radiolokacija ciljeva. Ovi sistemi radiolokacije mogu biti realizovani od: dva ili više monostatičkih radara ili, jednog ili više multistatičkih radara (slika 1). Ako je sistem realizovan od dva ili više monostatičkih radara, aktivan je — zrači samo jedan predajnik, sve antene se sinhrono okreću i sistem ima kore-

zbog neznatnih efekata, posebno sa stanovišta zaštite od smetnji i žilavosti, neće biti predmet ovog rada.

Komparacija parametara signala prostorno-diverziti radarskih sistema i monostatičkih radara

Pri osmatranju prostora najveći problem je vernopreslikati skup ciljeva u skup signala.

Da bi skup ciljeva bio verno preslikan u skup radarskih signala, potrebno je:

- u prostoru ciljeva formirati elektromagnetsko polje, dovoljne jačine, da se od ciljeva reflektuju/rasprše signali potrebne snage;
- primiti sve signale koji dolaze iz određenog pravca u određenom vremenskom periodu;
- iz sume prijemnih signala izdvojiti signale ciljeva;
- proveriti izdvojene signale, da li su stvarno reflektovani/raspršeni od ciljeva i eliminisati signale dezinformacije.

Ako elektromagnetsko polje, u prostoru osmatranja, formiraju monostatički radari (slika 1 a), onda se suma reflektovanih signala od ciljeva može izraziti formulom [1]:

$$A_{\Sigma M} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{P_{ti} G_{ij}^2 \sigma_{ij} \eta_{ij} \lambda_i^2}{64\pi^3 R_{ij}^4}} \cdot s\left(t - \frac{2R_{ij}}{c}\right) \exp j\left[\omega_i t - 2K_i\left(R_{ij} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} t\right) + \varphi_{ij}\right] \quad (1.1)$$

lacioni uređaj, koji služi za obradu prijemnih signala svih prijemnika. Jasno, korelacioni uređaj mora biti prisutan i kada je prostorno-diverziti sistem realizovan od jednog ili više multistatičkih radara.

Aktivni prostorno-diverziti radarski sistemi u načelu, imaju jednak broj aktivnih predajnika i prijemnika i predstavljaju prostu kombinaciju više monostatičkih radarskih sistema i one,

gde je:

m	— broj monostatičkih radara u prostorno-diverziti sistemu;
N	— broj radarskih ciljeva;
P_{ij}	— predajna snaga i-tog radara;
G_{ij}	— faktor pojačanja antene i-tog radara u pravcu j-tog cilja;
σ_{ij}	— efektivna radarska površina j-tog cilja osvetljena i-tim radarom;

³ Pod *prijemnikom*, pored prijemnog sistema, podrazumevamo i sistem za obradu i prikazivanje podataka o cilju.

η_{ij}	— koeficijent gubitaka energije na trasi i-ti radar — j-ti cilj;			— -tog cilja i od j-tog cilja do l-tog prijemnika;
R_{ij}	— rastojanje od i-tog radara do j-tog cilja;	σ_{ijl}	—	efektivna radarska površina j-tog cilja osvetljenog i-tim predajnikom »viđenog« l-tim prijemnikom;
$s\left(t - \frac{2R_{ij}}{c}\right)$	— vremenska karakteristika signala i-tog radara reflektovanog od j-tog cilja;	R_{ij}, R_{jl}	—	rastojanje od i-tog predajnika do j-tog cilja i od j-tog cilja do l-tog prijemnika;
ω_i	— kružna frekvencija predajnog signala i-tog radara;	P_{ti}, G_{tij}	—	snaga i-tog predajnika i faktor pojačanja njegove antene u pravcu j-tog cilja;
$K_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$	— talasni faktor množenja;	G_{rjl}	—	faktor pojačanja antene l-tog prijemnika u pravcu j-tog cilja;
φ_{ij}	— promena faze signala i-tog radara pri refleksiji od j-tog cilja;	$s(t - R_{ij}/c - R_{jl}/c)$	—	vremenska karakteristika reflektovanog signala od j-tog cilja za i-ti predajnik i l-ti prijemnik;
λ_i	— talasna dužina signala i-tog radara;	$K_i(R_{ij} - R_{jl})$	—	promena faze signala na račun prostiranja signala od i-tog predajnika do j-tog cilja i od j-tog cilja do l-tog prijemnika;
$2K_i R_{ij}$	— promena faze signala na trasi (i-ti radar — j-ti cilj i obrnuto);			
$2K_i \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} t$	— promena faze signala usled kretanja cilja.			

U slučaju da elektromagnetsko polje, u prostoru osmatranja, stvaraju multistatički radari (slika 1b), onda se suma reflektovanih signala od ciljeva može izraziti kao:

$$A_{\Sigma B} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^M \sqrt{\frac{P_{ti} G_{tij} \sigma_{ijl} \eta_{ij} \eta_{jl} G_{rjl} \lambda_i^2}{64\pi^3 R_{ij}^2 R_{jl}^2}} s\left(t - \frac{R_{ij}}{c} - \frac{R_{jl}}{c}\right) \times \exp j \left[\omega_{it} - K_i \left(R_{ij} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} t + R_{jl} + \frac{\partial R_{jl}}{\partial t} t \right) + \varphi_{ijl} \right] \quad (1.2)$$

gde je:

n	— broj predajnika prostorno-diversiti radarskog sistema;
m	— broj ciljeva;
M	— broj prijemnika prostorno-diversiti radarskog sistema;
η_{ij}, η_{jl}	— koeficijent gubitaka energije na trasi od i-tog predajnika do j-

$K_i(\partial R_{ij}/\partial t + \partial R_{jl}/\partial t)t$	— promena faze signala zbog kretanja cilja;
φ_{ijl}	— promena faze predajnog signala i-tog predajnika na j-tom cilju primljenog l-tim prijemnikom usled refleksije.

Poređenjem jednačina (1.1) i 1.2). vidi se da, ako se l-ti prijemnik i i-ti predajnik postave na isto mesto, uz us-

lov da su sličnih osobina kao i isti pod-
 sistemi monostatičkog radara, iz (1.2)
 lako se dobija (1.1). Dakle, polje stvo-
 reno monostatičkim radarima je samo
 specijalni slučaj polja stvorenog bista-
 tičkim radarima, kada su baze bistatič-
 kih radarat jednake nuli. Opštiji slu-
 čaj, multistatička radiolokacija, ima no-
 vi kvalitet: *svaki od prijemnika može*
da primi reflektovane signale od cilje-
va, osvetljenih ma kojim predajnikom,
 dok to nisu u mogućnosti prijemnici
 monostatičkih radara.

Osnovni parametri prostorno-di-
 verziti radarskih signala, formiranih
 monostatičkim ili multistatičkim rada-
 rima, radi boljeg pregleda, dati su u ta-
 beli 1.

Sl. 2 — Elementi bistatičkog radara kao ele-
 menta prostorno-diverziti radarskog sistema:
 P_i — predajnik, Q_i — prijemnik, C_j — cilj i
 b_{ii} — baza

Tabela 1

Osnovni parametri radarskog signala	Monostatički radar	Multistički radar
Pojačanje antena pri predaji i prijemu	G_{tij}^2	$G_{tij} G_{rjl}$
Efektivna radarska površina cilja	σ_{ij}	σ_{ijl}
Normalni gubici zbog prostiranja	$1/R_{ij}^4$	$1/R_{ij}^2 R_{jl}^2$
Dopunski gubici zbog prostiranja	η_{ij}^2	$\eta_{ij} \eta_{jl}$
Promena faze zbog prostiranja	$2K_i R_{ij}$	$K_i (R_{ij} + R_{jl})$
Promena faze zbog kretanja cilja	$2K_j \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} t$	$K_j \left(\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial R_{jl}}{\partial t} \right)$
Vremenski pomak reflektovanog signala	$2 \frac{R_{ij}}{c}$	$\frac{1}{c} (R_{ij} + R_{jl})$

Domet prostorno-diverziti radarskih sistema

Domet multistatičkih radarskih sis-
 tema može se jednoznačno odrediti pre-
 ko energetskeg potencijala. Za različite
 uzajamne položaje cilja, predajnika i
 prijemnika, za jedan te isti energetskeg
 potencijal, dobijaju se različiti dometi.
 Domet, pre svega, zavisi od toga šta
 se pod njim podrazumeva: rastojanje
 predajnik-cilj (R_{ij}) ili rastojanje cilj-
 -prijemnik (R_{jl}).

Iako ne postoji jedinstveni dogo-
 vor, pod dometom kod prostorno-diver-
 ziti radarskih sistema podrazumeva se
 rastojanje R_{jl} (slika 2). Po analogiji sa
 monostatičkom radiolokacijom, izraz za
 domet može se pisati u obliku:

$$R_{jl} = \frac{1}{R_{ij}} \sqrt{\frac{P_{ti} G_{tij} \sigma_{ijl} G_{ij} \eta_{il} \eta_{jl} \lambda_i^2}{64 \pi^3 P_{rimin}}} \quad (1.3)$$

gde je:

P_{rimin} — realna osetljivost l-tog pri-
 jemnika.

Ako je $b_{11}=0$ jednačina (1.3) prelazi u jednačinu za domet monostatičnog radara, jer je $R_{j1}=R_{ij}$. Za $b_{11}\neq 0$ domet je u funkciji rastjanja R_{ij} . Zato se poređenje dometa bistatičkihi monostatičkih radara vrši preko zona u kojima se vrši detekcija ciljeva određene radarske površine sa određenom vjerovatnoćom pravilne detekcije.

Kod monostatičkih radara to je krug poluprečnika $R_{\max}$:

$$S = \pi R_{\max}^2, \quad (1.4)$$

gde je:

$R_{\max} = \sqrt{P_m \eta_c}$ — maksimalni domet monostatičkog radara;

$P_m = \frac{P_{tm} G_{tm}^2 \sigma_c \lambda^2}{64 \pi^3 P_{r\max}}$ — energetski potencijal monostatičkog radara;

η_c — slabljenje signala na trasi predajnik-cilj;

$P_{r\max}$ — osetljivost prijemnika monostatičkog radara.

Kod bistatičkog radara kriva, koja ograničava površinu zone otkrivanja, dobija se iz jednačine:

$$R_p R_q = \sqrt{P_b \eta_c \eta_r}, \quad (1.5)$$

gde je:

R_p i R_q — rastojanja od cilja do prijemnika i predajnika respektivno;

$P_b = \frac{P_{tb} G_{tb} \sigma_{cb} G_{rb} \lambda^2}{64 \pi^3 P_{r1}}$ — energetski potencijal bistatičkog radara;

η_i — stabljenje signala na trasi cilj-prijemnik;

σ_{cb} — efektivna radarska površina cilja za bistatički radar.

U zavisnosti od odnosa veličine baze bistatičkog radara (b) i veličine $a = \sqrt{R_p R_q}$, dobijaju se različite krive koje ograničavaju zonu otkrivanja, pa samim tim i različite površine [1] (slika 3).

Sl. 3 — Površina zona detekcije bistatičkog radara ograničene različitim krivama:
a) elipsom; b) Bernulijevom leminiskatom; d) dvema krivama oko fokusnih tačaka

U poređenju karakteristika bistatičkih i monostatičkih radara treba znati da je:

$$R_{\max} = a. \quad (1.6)$$

Na slici 4 prikazane su zone otkrivanja prostorno-diverziti radarskog sistema i monostatičkog radara za $a = 0,707b$. Površina zone otkrivanja prostorno-diverziti sistema je tri puta veća i dobija se na račun višestrukog korišćenja predajnika i racionalnog iskorišćenja energije. Kod rasporeda predajnika i prijemnika, kao na slici 4, predajni signal ne prelazi put predajnik-cilj i obratno, kao kod monostatičkog radara, već put predajnik-cilj-prijemnik, koji je u istom smeru.

radiolokacije približno jednake monostatičkoj za ugao $\gamma = 0 \div 135^\circ$. Povećanjem ugla γ radarska površina naglo raste i za $\gamma = 180^\circ$ iznosi:

$$\sigma_{cb} = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2} \quad (1.7)$$

gde je:

A — površina poprečnog preseka cilja, normalnog na pravac prostiranja elektromagnetskog talasa.

Povećanje radarske površine ciljeva za $\gamma \approx 0^\circ$ dostiže vrednosti čak i do 1000 puta veću u odnosu na monostatičku radiolokaciju. Za izražavanje za-

Sl. 4 — Zona otkrivanja prostorno-diverziti radarskog sistema

Radarska površina cilja za prostorno-diverziti radarske sisteme

Teoretski radovi o radarskoj površini prostijih tela pokazali su da porastom ugla γ (slika 3) radarska površina takođe raste [2].

Eksperimenti su pokazali [4] da su radarske površine ciljeva kod bistatičke

visnosti radarske površine u funkciji ugla γ koristi se empirijska formula [1]:

$$\sigma_b(\gamma) = \sigma(0) \{1 + \exp[n|\gamma| - (2,4n + 1)]\} \quad (1.8)$$

gde je:

$\sigma(0)$ — radarska površina kod monostatičke radiolokacije,

$$\gamma = \arccos \left[\frac{1}{R_{ij} R_{jl}} (R_{ij}^2 + R_{jl}^2 - b_{il}^2) \right]$$

$n=7 \div 10$ — empirijski koeficijent, koji zavisi od strukture i oblika cilja.

Efekt *protivradarskih maski* kod bistatičke radiolokacije je znatno smanjen, jer su one proračunate da priguše raspršenje VF signala u pravcu njihovog dolaska. Posebno je smanjen za $\gamma \approx 180^\circ$, kada je radarska površina ciljeva određena pomoću izraza (1.8), bez obzira na njihove karakteristike.

Radarska refleksna površina *oblaka pasivnih dipola* određuje se pomoću izraza [2]:

$$\sigma(\gamma) = 0,17\lambda^2 \cos^2 \gamma + 0,11\lambda^2 \sin^2 \gamma \quad (1.9)$$

Razlika radarske površine za uglove $\gamma = 0^\circ$ i 90° je 1,5 puta.

Lako se može pokazati da je radarska površina oblaka pasivnih dipola kod bistatičke radiolokacije smanjena u odnosu na monostatičku, za $\gamma = 90^\circ$, i do 20 puta. Srednja vrednost radarske površine za sve vrednosti ugla γ je smanjena za 2,14 puta u odnosu na vrednost za $\gamma = 0^\circ$. Pored smanjene apsolutne vrednosti radarske površine, kod bistatičke radiolokacije menja se i karakter fluktuacija signala. Zavisnost radarske površine od geometrije cilja i ugla γ koristi se kod prostorno-diverziti sistema za selekciju ciljeva po njihovoj strukturi, pa čak i određivanju same strukture.

Pouzdanost prostorno-diverziti radarskih sistema

Pouzdanost elektronskih uređaja zavisi od pouzdanosti sastavnih elemenata, njihovog broja i kvaliteta, kao i eksploatacionih faktora (uslovi rada, koeficijent eksploatacije, obučenosť posluge, kvalitet održavanja, i dr.). Prostorno-diverziti radarski sistem ima niz faktora koji mu smanjuju, ali isto tako

i niz faktora koji mu povećavaju pouzdanost, u odnosu na monostatički radar.

U *prvu grupu* spada složenija struktura i povećan broj uređaja (starter, sistem za sinhronizaciju antena predajnika i prijemnika, računar). Međutim, visoka pouzdanost elektronskih komponenta, od kojih su ovi uređaji napravljeni, ima neznatni uticaj na smanjenje pouzdanosti sistema.

Daleko je veći broj faktora koji spadaju u *drugu grupu*:

- *smanjen broj nepouzdatih elemenata* u VF traktu (nema primopredajne skretnice kod impulsnih radara i elemenata za izolovanje predajnog od prijemnog kanala kod radara sa kontinuiranim zračenjem);

- *razdvojenost predajnika* (par MW) *od prijemnika* ($10^{-12} \div 10^{-14} \text{W}$) isključuje mogućnost oštećenja VF pojačala, mešačkih dioda i sl. u prijemniku;

- *»sakrivenost« položaja prijemnika* znatno utiče na povećanje žilavosti sistema, jer je dejstvu protivradarskih raketa izložen samo predajnik ($10 \div 30\%$ vrednosti radara). U slučaju oštećenja, sistem nastavlja sa radom aktiviranjem drugog predajnika;

- *smanjenje štetnog delovanja VF energije* na veći deo posluge koji se nalazi na prijemnicima, dok je delovanju VF energije izložen manji deo koji opslužuje predajnik;

- *proizvoljan raspored sistema*, što je posebna pogodnost kod brodskih prostorno-diverziti sistema. »Osvetljenje« prostora vrši se obično sa kopna, čime se znatno povećava pouzdanost brodskih uređaja (nema predajnika sa svim manje pouzdanim elementima).

PEZ prostorno-diverziti radarskih sistema

Budući da su savremena sredstva i metode radarskih PED namenjene protiv monostatičkih radara, mnoga ta

sredstva i metode na prostorno-diverziti radarske sisteme nemaju uticaj ili je on simboličan. Sa tog stanovišta, ovi sistemi imaju veću mogućnost PEZ od monostatičkih radara, jer sve poznate zaštite od smetnji, koje su primenjene kod monostatičkih radara, mogu biti primenjene i kod prostorno-diverziti sistema.

Međutim, prostorno-diverziti sistemi mogu imati i dodatne zaštite, zasnovane na:

— sakrivenosti položaja prijemnika, jer je signal smetnje daleko manji u pravcu prijemnika nego u pravcu predajnika, u kom pravcu je ometač usmeren;

— povoljnijem energetskom bilansu, isturanjem predajnika bliže ciljevima, što zahteva veće snage signala smetnje.

Efekt sakrivenosti može se kvantitativno oceniti preko koeficijenta sakrivenosti prijemnika prostorno-diverziti sistema u odnosu na monostatički radar:

$$V = \frac{\left(\frac{P_s}{P_{\delta}} \right)_{pds}}{\left(\frac{P_s}{P_{\delta}} \right)_m} = \frac{P_{\delta}(R) P_s(R_i)}{P_{\delta}(R_i) P_s(R)} \quad (1.10)$$

gde su:

$P_{\delta}(R)$ i $P_{\delta}(R_i)$ — snaga šumne smetnje ometača na anteni predajnika (R) i i-tog prijemnika (R_i);

$P_s(R)$ i $P_s(R_i)$ — snaga reflektovanog signala od cilja na anteni predajnika (R) i i-tog prijemnika (R_i).

Uz pretpostavku da se predajnik i i-ti prijemnik prostorno-diverziti sistema nalaze na istoj udaljenosti od ometača, možemo pisati da je:

$$\frac{P_{\delta}(R)}{P_{\delta}(R_i)} = \frac{G(0, 0)}{G(\epsilon_i, \beta_i)}, \quad (1.11)$$

gde su:

$G(0, 0)$ i $G(\epsilon_i, \beta_i)$ — koeficijenti pojačanja antene ometača u pravcu predajnika ($\epsilon = \beta = 0$) i u pravcu i-tog prijemnika prostorno-diverziti sistema;

β_i, ϵ_i — azimut i mesni ugao i-tog prijemnika u odnosu na pravac usmerenosti ometača (pravac predajnika).

Na primer, za hipotetički ometač na visini 20 km, sa antenskim dijagramom širine po azimutu $\Delta\beta = 50^\circ$, po mesnom uglu $\Delta\epsilon = 25^\circ$ i ravnomernom gustinom polja, dobija se vrednost odnosa (1.11) u tački 1 — 1,2 (slika 5); u tački 2 — 3,8; u tački 3 — 22,2 i u tački 4 — 590. Rastojanje predajnik-prijemnik je 100 km. Očito, smanjenjem rastojanja prostorno-diverziti sistem — cilj (ometač) drastično se smanjuje. Usmerenost antene dodatno utiče na smanjenje efekta ometanja.

Odnos snaga reflektovanih signala od cilja u pravcu predajnika $P_s(R)$ i u pravcu i-tog prijemnika $P_s(R_i)$ prostorno-diverziti sistema zavisi od:

$$\frac{P_s(R)}{P_s(R_i)} = \frac{\sigma(\gamma_i)}{\sigma(0)} \quad (1.12)$$

gde je:

γ_i — ugao između pravaca cilj-i-ti prijemnik i cilj-predajnik.

Uzimajući u obzir relacije (1.8), (1.10) i (1.12) koeficijent sakrivenosti prostorno-diverziti sistema pri delovanju šumnih smetnji može se izraziti kao:

$$v = \frac{G(0, 0)}{G(\epsilon_i, \beta_i)} \{ + \exp[n(\gamma_i) - (2,4n + 1)] \} \quad (1.13)$$

a)

b)

Sl. 5 — Otkrivanje ciljeva prostorno-diverziti sistemom u zavisnosti od daljine u:

a) vertikalnoj ravni, ib) horizontalnoj ravni

Primena apsorpcionih materijala, radi smanjenja radarske površine vazduhoplova, kod prostorno-diverziti sistema je manje efikasna, jer su oni proračunati za smanjenje refleksije u pravcu upadnog talasa.

Zaštićenost prostorno-diverziti sistema na račun povoljnijeg energetskog bilansa (isturanjem predajnika bliže ciljevima), može se oceniti preko koeficijenta nadvišenja signala reflektovanog od cilja. Odnos reflektovanog signala od cilja do prostorno-diverziti sistema i monostatičkog radara može se proceniti pomoću izraza:

$$\zeta = \frac{R_m^4 P_{tpds} G_{tpds} \sigma_c(\gamma_i)}{R_i^2 R_j^2 P_{tm} G_{tm} \sigma_s(0)} \quad (1.14)$$

gde je:

R_m — rastojanje monostatičko radar — cilj;

R_i — rastojanje i-ti prijemnik — cilj;

R_j — rastojanje j-ti predajnik — cilj;

P_{tpds} — snaga predajnika prostorno-diverziti sistema;

G_{tpds} — pojačanje antene predajnika prostorno-diverziti sistema;

$\sigma_c(\gamma_i)$ — radarska površina cilja u pravcu i-tog prijemnika;

P_{tm} — snaga predajnika monostatičkog radara;

G_{tm} — pojačanje antene predajnika monostatičkog radara, i

$\sigma_c(0)$ — radarska površina cilja za monostatički radar.

Kombinovanjem parametara kod prostorno-diverziti sistema može se postići željeni ζ . Zbog toga je, za postizanje istog efekta ometanja, kod prostor-

no-diverziti sistema potrebna veća snaga ometača za 5 puta.

Efikasno ometanje prostorno-diverziti sistema odgovaračkim smetnjama vrlo je teško postići, zbog nepoznavanja položaja prijemnika. Protivnik je prinuđen da antenu ometača usmeri u smeru predajnika, vodeći pri tome računa o snazi signala odgovora, trajanju impulsa, nosećoj i impulsnoj frekvenciji. Kako su mnogi od navedenih parametara nepoznati, dolazi do znatnih razlika u intenzitetu i položaju odraza na pokazivaču, pa time i ometanje učini neefikasnim. Ako se, međutim, ometanje dobro izvede, lažni odrazi su identični odrazima od stvarnih ciljeva. No, bez obzira na to, razlike nastaje u koordinatima lažnih ciljeva, otkrivenih pomoću više prijemnika (slika 6). Za svaki prijemnik lažni ciljevi imaju drugačije koordinate, dok se koordinate stvarnih ciljeva poklapaju. Zahvaljujući tome, koordinacioni uređaj za obradu podataka lako, upoređujući koordinate ciljeva dobijenih od svih prijemnika prostorno-diverziti sistema, selektira i eliminiše lažne odraze.

Žilavost prostorno-diverziti radarskih sistema

Sistemi PVO su sigurno prvi na udaru agresora, a samim tim i radarski podsistemi u njima. Po mišljenju svet-skih autora, protivradarske rakete su sve moćnija sredstva i njihov efekat je to veći što je složenost radara veća. Sovjetski autori [5] smatraju da je protiv savremenih radara, koji su pretrpani raznim zaštitama od smetnji, efikasnije i lakše da avioni na borbeni zadatak kreću sa samozaštitnim raketama nego ogromnim količinama raznih sredstava PEZ-a.

Pri oceni žilavosti prostorno-diverziti radarskih sistema u odnosu na monostatički radar može se poći od pretpostavke da je efikasnost protivradarske rakete u oba slučaja isti. Međutim, uništenjem predajnika prostorno-diverziti radarskog sistema nastaje daleko manji gubitak (10÷30 cene monostatičkog radara) nego uništenjem monostatičkog radara. Istaknimo na ovom mestu i to da se zaštita od protivradarskih raketa može puno efikasnije izvesti kod

Sl. 6 — Eliminisanje lažnih ciljeva kod prostorno-diverziti radarskih sistema

predajnika prostorno-diverziti radarskog sistema nego kod monostatičkog radara. Na kraju, treba reći i to da se u slučaju oštećenja predajnika prostorno-diverziti radarskog sistema on može relativno lako aktivirati uključanjem drugog predajnika, što se, naravno, kod monostatičkog radara ne može. U tome se sastoji i najveća prednost prostorno-diverziti radarskih sistema u odnosu na monostatičke radare, jer su fleksibilniji i adaptivniji.

Zaključak

Potreba za otkrivanjem savremenih ciljeva, koji svakim danom postaju sve brži, a njihova radarska površina sve manja, na što većoj udaljenosti, kao i potreba za ispunjenjem misije radara

u uslovima delovanja savremenih ometača, utiču na uvođenje kvalitativno novih radarskih sistema i metoda radiolokacije.

Prostorno-diverziti radarski sistemi, koji, iako poznati otkad i klasični — monostatički radari, tek danas, zahvaljujući naglom razvoju ometača, dostižu svoju punu afirmaciju.

U radu je pokazano da prostorno-diverziti sistemi, iako složeni i skupi, jer se sastoje od nekoliko radara, računara, retranslatora, itd., zbog niza prednosti opravdano imaju sve veću primenu. Analizom je pokazano da prostorno-diverziti radarski sistemi imaju: veći domet, manje su osetljivi na smetnje, tačnije određuju koordinate ciljeva, imaju pouzdaniji rad, žilaviji su, adaptivniji i fleksibilniji od klasičnih monostatičkih radara.

Literatura:

- [1] Averjanov, V. JA.: RAZNESENIJE RADIOLOKACIONIJE STANCIJI I SISTEMI, »Nauka i tehnika«, Minsk, 1978.
- [2] Kobak, V. O.: RADIOLOKACIONIJE OTRAŽATELJI, »Sovjetskoe radio«, Moskva, 1975.
- [3] Grujić, V.: REČNIK FRANCUSKO-SRPSKO-HRVATSKI, »Prosveta«, Beograd, 1971.
- [4] Barton, D. & Vard, D.: SPRAVOČNIK PO RADIOLOKACIONNIM IZMERENIJAM (Perev. s angl. pod red. M. M. Vejsbejna), »Sovjetskoe radio«, Moskva, 1976.
- [5] Razingar, A.: PEZ RADARSKIH UREĐAJA (Lekcije — Poslediplomski studij (PEO), TVA KoV JNA, Zagreb, 1980.
- [6] Razingar, A.: RADARSKI OMETAČI (Lekcije — Poslediplomski studij PEO), TVA KoV JNA, Zagreb, 1980.

- [7] Đorović, M.: RADARSKI DIVERZITI (Seminarski rad — Poslediplomski studij — Specijalizacija RRT), TVA KoV JNA, Zagreb, 1981.
- [8] Skolnik, M. I.: RADAR HANDBOOK, McGraw-Hill Co., New York, 1970.
- [9] Ewing, E. F.: THE APPLICABILITY OF BISTATIC RADAR TO SHORT RANGE SURVEILLANCE, Conference Proceedings, Computer Simulations, Montreal, Quebec, July 1987, pp. 53—58.
- [10] Milne, K.: PRINCIPLES AND CONCEPTS OF MULTISTATIC SURVEILLANCE RADARS, Conference Proceedings, Computer Simulations, Montreal, Quebec, July 1987, pp. 46—52.