FREKVENTNO-VREMENSKI¹ DIVERZITI RADARSKIH SISTEMA

Rad obrađuje frekventno-vremenske diverzite radarskih sistema, kao jednu od mogućih kombinacija radarskih diverzita sistema, koji imaju sve dobrotke frekventnih-diverzita i vremenskih-diverzita radarskih sistema u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih karakteristika. Ilustracije radi, proračunati su dobici hipotetičkog frekventno-vremenskog diverzita radarskog sistema sa dva vremenski pomaknuta impulsna signala, koji uz to imaju i različite noseće frekvencije.

Pored većeg dometa, tačnije procene koordinata detektovanih ciljeva i veće verovatnoće njihove pravilne detekcije, hipotetički frekventno-vremenski diverziti radarskih sistema ima, a što svakim danom postaje sve važnije, i dosta veću zaštićenost od smetnji. To se posebno odnosi na: zaštitu od pasivnih smetnji i zaštitu od uskopojasnih smetnji s prebrisavanjem. Zahvaljujući većem energetsom potencijalu, »samozaštitna daljina« im je, takođe, dosta veća.

Definicije i lociranje problema

Radiolokacija ciljeva (detekcija i određivanje koordinata), kod *frekventno-vremenski diverziti radarskih sistema* vrši se pomoću vremenski pomaknutih impulsnih predajnih signala, koji uz to imaju i različite noseće frekvencije ($f_1, f_2, \dots, f_m$) (slika 1). Ciljevi su, dakle, istovremeno »osvetljeni« višefrekventnim, vremenski pomaknutim impulsnim signalima.

Sl. 1 — Frekventno-vremenski diverziti radarski sistem (a) i njegov predajni impulsni signal (b)

Problem generisanja predajnih višefrekventnih, vremenski pomaknutih impulsnih signala, prouzrokovao je pojavu nove koncepcije radarskih predajnika, kod kojih generisanje signala osnovnih frekvencija vrše niskofrekventni

klasičnih radarskih sistema s magnetronskim predajnicima, zahvaljujući baš ovakvoj koncepciji predajnika.

Opravdanost izvođenja ovako složenih radarskih sistema nalazi se u »združenim« dobicima frekventno-diverziti i vremensko-diverziti radarskih sistema (vidi sliku 2). Dobici se odnose na [1]:

¹ Nastali su kao kombinacija frekventno-diverziti i vremensko-diverziti radarskih sistema, tj. imaju sve dobre osobine i jednih i drugih sistema.

● **povećanje dometa i »samozaštitne daljine«**, zahvaljujući većem energetskom potencijalu;

● **veću zaštićenost od smetnji i »slepih brzina«** i

● **veću verovatnoću pravilne detekcije ciljeva i tačniju procenu njihovih koordinata**, zahvaljujući smanjenju fluktuacija reflektovanih/raspršenih elektromagnetskih talasa od njih.

sa). Razlika nosećih frekvencija f_1 i f_2 je $\Delta f_r = f_1 - f_2 = 125 \text{ MHz}$.

Uvrštavanjem vrednosti za Δf_r u izraz [1]:

$$\Delta f_r = f_2 - f_1 > \frac{c}{l_{cr}[m]} [\text{MHz}], \quad (1)$$

dolazimo do vrednosti za radijalnu dužinu cilja od $l_{cr} = 2,4 \text{ m}$. Znači da su impulsi sa ovolikom i većom razlikom no-

Sl. 2 — Dobici frekventno-vremenski diverziti radarskih sistema u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih performansi

Analiza frekventno-vremenski diverziti radarskih sistema svela bi se na razmatranje dobika jednog po jednog sadržajnog diverziti radarskog sistema (vidi sliku 2), čemu su u celini posvećeni radovi [7, 8]. Stoga, u ovom radu dajemo samo procenu ukupnih dobika jednog hipotetičkog osmatračkog frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih performansi.

Hipotetički frekventno-vremenski diverziti sistem

Hipotetički frekventno-vremenski diverziti osmatrački radarski sistem vrši radiolokaciju ciljeva sa impulsnim signalima datim na slici 1, pri čemu je $m=2$. Razmak između impulsa je $2\tau_i$ ($\tau_i = 1,5 \mu\text{s}$ — dužina predanog impul-

sećih frekvencija nezavisni čak i za ciljeve ovako malih dimenzija.

Neophodan uslov nezavisnosti signala reflektovanih od jednog te istog cilja, a što u suštini zavisi od njegovih fizičkih dimenzija, je dovoljan iznos razlike frekvencija. Tako, na primer, za realne dimenzije savremenih ciljeva od oko $l_{cr} = 10 \text{ m}$, potrebna razlika frekvencija frekventno-diverziti signala iznosi samo 30 MHz.

Hipotetički radarski sistem vrši kružno pretraživanje prostora. Brzina pretraživanja mu je $n_a = 12$ ili 18 okretaja/min. Širina antenskog snopa po azimutu je $\Delta\beta = 1^\circ$, a impulsna frekvencija može imati samo fiksne vrednosti $f_i = 400, 630$ i 800 Hz .

Uvrštavanjem vrednosti za promenljive $\Delta\beta$, f_i i n_a u izraz za proračun

broja reflektovanih impulsa od tačkastih ciljeva [5]:

$$n_i = \frac{\Delta\beta \cdot f_i}{6 \cdot n_a} \quad (2)$$

dolazi se do broja reflektovanih impulsa od tačkastih ciljeva za klasične impulsne radarske sisteme (datih u brojiocu — tabela 1), dok se za hipotetički frekvencijsko-vremenski diverziti radarski sistem broj reflektovanih impulsa dobija jednostavno množenjem sa dva (datih u imeniocu — tabela 1).

Tabela

Broj reflektovanih impulsa od tačkastog cilja

f_i [Hz]	Br. impul. po cilju n_i n_a [okret./min.]	
	12	18
400	6/12	4/8
630	9/18	6/12
800	11/22	7/14

Kako je naš hipotetički radarski sistem osmatrački, to uz pretpostavku da je $D=0,5$ a $F=10^{-5}$, lako se može odrediti dobitak na smanjenju fluktuacije signala reflektovanih od ciljeva na račun primene frekventno-diverziti sistema radiolokacije. Sa dijagrama na slici 3 očita se potreban odnos S/N , impulsa reflektovanog od nefluktuirajućeg cilja $q_0=11,2\text{dB}$. Na isti način, sa dijagrama na slici 4, očita se odnos S/N impulsa reflektovanog od fluktuirajućeg cilja od $q_1=16,25\text{dB}$. Pomoću izraza za koeficijent gubitaka usled fluktuacija reflektovanih signala ($L_F=q_1/q_0$) dobijamo $L_F=16,25/11,20=1,45$.

Uvrštavanjem vrednosti L_F u izraz za koeficijent dobitaka na račun frekventno-diverziti signala [1]:

$$K_D[\text{dB}] = \left(1 - \frac{1}{m}\right) \cdot 10 \log L_F, \quad (3)$$

za $m=2$, dobijamo $K_D=0,8\text{dB}$.

Sl. 3 — Verovatnoća otkrivanja ciljeva u zavisnosti od odnosa S/N za nefluktuirajuće ciljeve

Sl. 4 — Verovatnoća otkrivanja ciljeva u zavisnosti od odnosa S/N za fluktuirajuće ciljeve

Sl. 5 — Odnos S/N u zavisnosti od broja integrisanih impulsa za linearni detektor i nefluktuirajući cilj za različite verovatnoće lažne uzbune i verovatnoću $D=0,5$

Dakle, za detekciju reflektovanih signala od fluktuirajućih ciljeva, uz $D=0,5$ i $F=10^{-5}$, kod hipotetičkog frekventno-diverziti radarskog sistema, potreban je odnos S/N od 11,2 dB, a ne 12 dB, kao kod klasičnih impulsnih radarskih sistema. Dobitak u odnosu S/N od 0,8 dB može se postići i povećanjem snage predajnog impulsnog signala za 1,2 puta. Ovoliko povećanje snage predajnog signala može da poveća domet za 4,7% ili verovatnoću detekcije ciljeva za 5%.

Navedena razlika odnosa S/N pri otkrivanju fluktuirajućih i nefluktuirajućih ciljeva odnosi se na slučaj donošenja odluke o prisustvu ciljeva na osnovu jednog impulsa. Kako je, međutim, broj impulsa reflektovanih od ciljeva veći od jedan (vidi tabelu 1), to se uzimanjem u obzir efekata integracije niza prijemnih impulsa potreban odnos S/N smanjuje. Tako se, na primer, nefluktuirajući cilj može detektovati, sa $D=0,5$ i $F=10^{-4}$, na osnovu pet reflek-

tovanih impulsa čiji je odnos $S/N=4,5$ dB ili pomoću deset impulsa čiji je odnos $S/N=2,5$ dB (vidi dijagram na slici 5).

Dobici hipotetičkog frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih performansi su u:

- povećanju dometa,
- povećanju verovatnoće detekcije ciljeva i
- tačnijoj proceni koordinata detektovanih ciljeva.

Povećanje dometa — Uz pretpostavku da su oba impulsa jednakih snaga, pomoću izraza $\Delta R = R_{\max}(\sqrt[4]{m}-1)$, gde je $R_{\max}$ — maksimalni domet klasičnog impulsnog radara i m — broj vremenski-diverziti impulsa, možemo izračunati da povećanje dometa iznosi 18,9%. Kako se, s druge strane, detekcija fluktuirajućih ciljeva kod hipotetičkog vremenski-diverziti sistema vrši

Sl. 6 — Odnos S/N u zavisnosti od broja integriranih prijemnih impulsa reflektovanih od fluktuirajućih ciljeva za $D=0,5$ i različite verovatnoće lažne uzbune

na osnovu integracije 10 impulsa ($f_i = 400$ Hz), a ne na osnovu 5 impulsa kao kod klasičnih impulsnih radarskih sistema, to se potreban odnos S/N (pre integracije) smanjuje sa 6,5 dB na 3,25 dB (vidi sliku 5). Razlika u odnosu S/N je 3,25 dB, što znači da je za detekciju ciljeva kod hipotetičkog vremensko-diverziti radarskog sistema dovoljno 3,25 dB manja snaga prijemnih impulsa. Kako se snaga prijemnog signala, po daljini, smanjuje sa četvrtim stepenom, to će se kod frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema domet, u odnosu na klasične impulsne radarske sisteme, povećati za 20,2% ($3,25/4 = 0,81$).

Povećanje verovatnoće detekcije ciljeva — Kako se donošenje odluke o prisustvu fluktuirajućih ciljeva kod klasičnih impulsnih radarskih sistema, za $D=0,5$ i $F=10^{-5}$, vrši na osnovu 5 integrisanih reflektovanih impulsa od cilja ($f_i=400$ Hz), koji imaju odnos S/N = 6,5 dB (slika 5), a kod našeg hipotetičkog frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema odluka se donosi na osnovu dvostruko većeg broja impulsa, koji imaju isti odnos S/N, to će posle integracije i odnos S/N biti skoro dvostruko veći. Sa dijagrama na slici 3 vidimo da se kod signala sa odnosom S/N od 12 dB, isto je što i 5 integrisanih impulsa sa odnosom S/N od 6,5 dB, može se sa verovatnoćama od $D=0,5$ i $F=10^{-5}$ doneti odluka o prisustvu cilja.

Kako, međutim, kod našeg hipotetičkog diverziti radarskog sistema imamo odnos S/N od 24 dB (integracija 10 prijemnih impulsa sa odnosom S/N od 6,5 dB), to se odluka o prisustvu cilja može doneti sa verovatnoćom od $D=0,97$ (slika 4).

Dakle, povećanje verovatnoće pravilnog otkrivanja kod našeg hipotetičkog frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema, u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih performansi, iznosi oko 47%.

Tačnija procena koordinata cilja — Primena frekventno-diverziti radarske metode radiolokacije omogućila je su-

ženje antenskog dijagrama usmerenosti po azimutu na $\Delta\beta = 1^\circ$, pa je zahvaljujući tome procena azimutalne koordinate ciljeva dosta tačnija. Tačnost procene azimutalne koordinate ilustrovana je na slici 7. Očigledno, tačnost procene azimutalne koordinate raste sa smanjenjem udaljenosti do cilja, što je veoma važno za radarske sisteme u sistemu PVO.

Sl. 7 — Tačnost procene azimutalne koordinate cilja

Zaštićenost od smetnji

Zahvaljujući primeni frekventno-vremenski diverziti metode radiolokacije naš hipotetički radar ima, u odnosu na klasične radarske sisteme sličnih performansi, puno veću zaštićenost od smetnji. Posebno se to odnosi na:

- zaštitu od pasivnih smetnji i
- zaštitu od uskopojasnih smetnji s prebrisavanjem.

Zaštita od pasivnih smetnji zasnovana je na korišćenju dvofrekventno koherentno-impulsne metode selekcije pokretnih ciljeva (SPC) primenom dvostruke krosperiodne kompenzacije (KPK).

Zakon modulacije amplitude signala zavisi od: karakteristika prijemnika, predajnika (razlika nosećih frekvencija Δf_r — primenom metode formiranja razlike frekvencije Dopplera) i radijalne komponente brzine ciljeva. Modulacija amplituda impulsnih signala reflektovanih od ciljeva vrši se frekvencijom:

$$f_d = \frac{2V_r}{c} (f_1 - f_2) = \frac{2V_r}{\lambda_r} \quad (4)$$

gde je:

- f_d — frekvencija modulacije amplitude paketa impulsa (frekvencija Dopplera) [Hz];
- V_r — radijalna komponenta brzine cilja [m/s];
- λ_r — talasna dužina (odgovara razlici frekvencija $\Delta f_r = f_1 - f_2$) [m].

U cilju poboljšanja kompenzacije — »brisanje« signala pasivnih smetnji koristi se dvostruka KPK. Na slici 8 prikazana je promena osetljivosti jednokratne i dvokratne KPK u odnosu na radijalnu komponentu brzine cilja (frekvencija Dopplera).

Sl. 8 — Funkcija osetljivosti kola KPK od radijalne komponente brzine ciljeva

Signali reflektovani od oblaka pasivnih dipola, čiji je spektar smešten blizu nulte frekvencije, primenom dvostruke KPK dosta efikasno se eliminišu. Osetljivost dvostruke KPK je manja od jednostruke KPK u oblasti frekvencije Dopplera pasivnih smetnji (vidi sliku 8). Amplituda signala, reflektovanih od pokretnih ciljeva, na izlazu kola dvostruke KPK menja se u zavisnosti od radijalne komponente brzine po zakonu $\sin^2(2\pi f_d T_i)/2$, tj. pulsira po sinusoidalnom zakonu, što pogoršava detekciju i tačnost procene koordinata ciljeva.

Ako je kod našeg hipotetičkog dvo-frekventnog radara $\Delta f_r = 125$ MHz, uz

pretpostavku da se oblak pasivnih dipola kreće brzinom od 50 m/s, pomoću izraza (4) dobijamo da je $f_d \approx 42$ Hz. Znajući, nadalje, da je noseća frekvencija klasičnih osmatračkih radara ≈ 3 GHz i uz pretpostavku da se oblak pasivnih dipola kreće istom brzinom, za frekvenciju Dopplera dobijamo dvadesetak puta veću vrednost.

Zaštita od pasivnih smetnji je, dakle, kod našeg hipotetičkog frekventno-vremenski diverziti radarskog sistema dosta lakša od klasičnih radarskih sistema, jer se radi o dosta užem frekventnom opsegu kojeg treba eliminisati. Na slici 8 vidi se da je za uski

opseg oko nulte frekvencije i osetljivost kola KPK mala, dok je kod klasičnih jednofrekventnih radarskih sistema situacija sasvim drugačija, kada se zna da je opseg frekvencija povećan dvadesetak puta. Prvo, obrada signala na nižim frekvencijama je daleko jednostavnija i, drugo, osetljivost kola kompenzacije je daleko veća u području frekvencija Dopplera signala reflektovanih od brzih ciljeva nego u opsegu frekvencija Dopplera signala reflektovanih od sporih ciljeva (oblaka pasivnih dipola) gde su kola KPK vrlo tro-ma. U tome se i ogleda velika prednost frekventno-vremenski diverziti radar-

skih sistema u zaštiti od pasivnih smetnji u odnosu na klasične radarske sisteme.

Zaštita od uskopojasnih smetnji s prebrisavanjem (USP) kod frekventno-vremenski diverziti radarskih sistema zasnovana je na činjenici da signal smetnji, sa spektrom od realnih 40 MHz, ne može istovremeno delovati na oba frekventna kanala jer je njihova razlika 125 MHz.

Princip zaštite od USP zasnovan je na iskorišćavanju ometanog frekventnog kanala u amplitudnom režimu rada prijemnika, i na eliminisanju smetnji u koherentnom režimu rada.

U amplitudnom režimu rada prijemnika signali se pojačavaju, detektuju i vode na kolo za poređenje. Kolo je izvedeno po shemi diferencijalnog pojačala, gde se izdvaja razlika signala suprotnog polariteta. Na izlazu kola za poređenje poznato je u kom kanalu je prisutna smetnja. Pri postojanju samo signala od cilja i za jednaka pojačanja u oba frekventna kanala, signali se kompenziraju i prigušenje izostaje. Ako je u nekom kanalu prisutna smetnja, kolo formira impuls prigušenja, koji traje onoliko vremena koliko signal smetnje nadvisuje postavljeni prag. Impuls prigušenja preko sheme diodnih ključeva ne dozvoljava prolazak signala u sumator. Ako signala smetnje nema, signali oba frekventna kanala dovode se na sumator.

U koherentnom režimu rada prijemnika signali se obrađuju na tzv. balansnom faznom detektoru (BFD). Signali iz međufrekventnog pojačala (MFP) i kanala i MFP II kanala dovode se na BFD. U slučaju kada reflektovani signali od ciljeva postoje u oba kanala, a signal smetnje samo u jednom kanalu, na izlazu iz BFD pojaviće se samo signal od cilja.

Odnos S/N na izlazu iz BFD, za slučaj kada je smetnja prisutna samo u jednom kanalu, a signali od cilja u oba, određuje se pomoću izraza [1]:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{izl} = \frac{U_{s1}^2 U_{s2}^2 + U_{s1}^2 U_{s2}^2 + U_{o1}^2 U_{s2}^2}{U_{o1}^2 + U_{s2}^2} \approx \frac{U_{s2}^2}{U_{s2}^2} \left(1 - \frac{U_{s1}^2}{U_{o1}^2}\right) \quad (5)$$

gde su:

- U_{s1}, U_{s2} — naponi signala ciljeva u 1. i 2. kanalu respektivno;
- U_{o1} — napon signala smetnje u 1. kanalu;
- U_{s2} — napon šumne smetnje u 2. kanalu.

Očigledno, ovakva zaštita od USP moguća je samo zahvaljujući primeni frekventno-diverziti metode radiolokacije.

Zahvaljujući primeni **vremenski-diverziti sistema radiolokacije** naš hipotetički radar ima duplo bolji energetski bilans, pa mu je tzv. **samozaštitna daljina veća**. Ako se ometač nalazi na cilju ($R_r = R_o$), samozaštitna daljina se povećava za $\sim 41\%$, a ako se ometanje vrši iz zone ($R_r \neq R_o$) povećanje samozaštitne daljine je za $\sim 19\%$.

Zaključak

Radarski diverziti sistemi, nastali kao odgovor na veoma brz razvoj radarskih ciljeva (manja radarska površina, veća brzina...), sve su prisutniji u razvoju i uvođenju u naoružanje savremenih armija.

Hipotetički frekventno-vremenski diverziti radarski sistem sa dva vremenski pomaknuta impulsa za $2\tau_i$ i razlikom nosećih frekvencija od $\Delta f_r = 125$ MHz, u odnosu na klasičan radarski sistem sličnih performansi, ima:

● **veći domet za oko 25%** ($\sim 20\%$ zbog primenjenog vremenski-diverziti sistema i $\sim 5\%$ zbog primenjenog frekventno-diverziti sistema);

● **veću verovatnoću pravilne detekcije za oko 52%** ($\sim 47\%$ zbog vre-

mensko-diverziti i 5% zbog frekventno-diverziti sistema);

● tačniju procenu koordinate azimuta ciljeva, zahvaljujući uskom antenskom dijagramu usmerenosti po azimutu ($\Delta\beta \approx 1^\circ$);

● bolju zaštitu od pasivnih smetnji, jer je spektar frekvencija Dopplera, zahvaljujući razlici nosećih frekvencija od $\Delta f_r = 125$ MHz, samo ≈ 50 Hz;

● bolju zaštitu od uskopojasnih smetnji s prebrisavanjem, jer spektar smetnji od realnih 40 MHz ne može istovremeno da blokira oba frekventna kanala ($\Delta f_i = 125$ MHz);

● veću »samozaštitnu daljinu« za 41%, ako se ometač nalazi na cilju ($R_r = R_o$), a $\sim 19\%$ ako se ometanje vrši iz zone ($R_r \neq R_o$).

Literatura:

- [1] Višin, G. M., MNOGOČASTOTNAJA RADIOLOKACIJA, »Vojenoje izdateljstvo Ministarstva obaroni SSSR«, Moskva, 1973.
- [2] Zubkovič, S. G., STATISTIČESKIJE KARAKTERISTIKI RADIOSIGNALOV, OTRAŽENIH OT ZEMNOJ POVERHNOSTI, »Sovjetskoje radio«, Moskva, 1968.
- [3] Kobak, V. O., RADIOLOKACIONIJE OTRAŽATELJI, »Sovjetskoje radio«, Moskva, 1975.
- [4] Skolnik, M. I., RADAR HANDBOOK, McGraw-Hill Co., New York, 1970.
- [5] Bogdanović, M., OSNOVE RADARSKE TEORIJE, CVTŠ KoV JNA »General armije Ivan Gošnjak«, Zagreb, 1989.
- [6] Đorović, M., RADARSKI DIVERZITI (Seminarski rad — Poslediplomski studij — Specijalizacija RRT), TVA KoV JNA, Zagreb, 1981.
- [7] Đorović, M., FREKVENTNO-DIVERZITI RADARSKI SISTEMI, Vojnotehnički glasnik, № 4, Jul—Avgust 1993, 282—293.
- [8] Đorović, M., VREMENSKO-DIVERZITI RADARSKI SISTEMI, Vojnotehnički glasnik № 5, Septembar—Oktobar 1993.
- [9] Witt, M. & Reeder, D., A New Generation Air Defence Radar, »Microwave journal«, № 2, February, 1984.