FREKVENTNO-DIVERZITI¹ RADARSKI SISTEMI

Rad obrađuje frekventno-diverziti radarski sistem, koji je, zbog sve češće primene kod savremenih radarskih sistema, vrlo aktuelan. Kroz komparativni prikaz sa klasičnim jedno-frekventnim radarom, istaknute su najvažniji dobici: povećanje dometa i povećanje tačnosti određivanja koordinata ciljeva, na račun smanjenja fluktuacija reflektovanog signala od ciljeva u prostoru radarskog osmatranja. Frekventno-diverziti radarski sistemi su manje osetljivi na ometanje. Da bi bilo efikasno, ometanje mora biti širokopojasno ili ometač mora imati isti broj nosećih frekvencija kao i radarski sistem. Zaštita od pasivnih smetnji vrši se pomoću brisača stalnih odraza, koji, u ovom slučaju, »briše« vrlo uzak frekventni pojas signala, zbog toga što Dopplerov pomak frekvencija signala, reflektovanih od pokretnog cilja, zavisi od razlike nosećih frekvencija radarskog sistema.

Definicije i pojmovna određenja

Pod frekventno-diverziti radarskim sistemom podrazumeva se otkrivanje i određivanje koordinata objekata u prostoru pomoću elektromagnetnog polja, koje ima dve ili više noseće frekvencije ($f_1, f_2, \dots, f_m$). Ciljevi su, dakle, istovremeno »osvetljeni« sa višefrekventnim signalom (slika 1).

Sl. 1 — Frekventno-diverziti radarski sistem

Opravdanost primene ovako složenih radarskih sistema (slika 2) zasniiva se na velikim dobicima, u sledećim karakteristikama [1]:

- povećanje predajne snage, što uzrokuje povećanje dometa radara na račun većeg energetskog potencijala;

- povećanju zaštićenosti od smetnji i »slepih brzina«, i

- smanjenju fluktuacija reflektovanih elektromagnetskih talasa, što daje veću verovatnoću otkrivanja i tačnosti određivanja koordinata ciljeva.

O fenomenu fluktuacija reflektovanih signala

Sa stanovišta refleksije-raspršenja elektromagnetskih talasa, svi ciljevi se dela na: *proste* i *složene*. Prosti ciljevi su veštačke tvorevine (ugaoni reflektori, ravne ploče, kugle i sl.) i sreću se samo u laboratorijskim uslovima. Skoro svi realni ciljevi imaju složenu strukturu. Mogu se razložiti na konačan broj elementarnih raspršivača, koji, pak, po Huyghens-Kirchoffovom modelu raspršenja, postaju sekundarni izvori zračenja [2]. Kod pokretnih ciljeva stalni promena položaja elementarnih raspršivača u odnosu na radar, kao i položaj jednog u odnosu na drugi, utiče na promenu amplituda i faza elementarnih signala raspršenih od njih, a samim tim i rezultujućeg — sumarnog signala od cilja (slika 3).

¹ Prvi deo članka pod nazivom »Prostorno-diverziti radarski sistem« objavljen je u prethodnom broju.

Sl. 2 — Blok shema frekventno-diverziti radarskog sistema [6]

Sl. 3 — Princip refleksije — raspršenja elektromagnetnih talasa od složenog cilja a) elementarni signali, i b) sumarni signal — suma svih fazora elementarnih signala osvetljenih raspršivača

U slučaju da se cilj može nadomestiti sa dve reflektujuće tačke, simetrične u odnosu na centar, širina sekundarnog dijagrama zračenja može se odrediti pomoću izraza:

$$\Theta = \frac{\lambda}{4l_c} [\text{rad}] \quad (2.1)$$

gde je:

λ — talasna dužina predajnog VF signala,

l_c — rastojanje između centara refleksije.

Za centimetarsko talasno područje i realne ciljeve (~ 10 m), širina dijagrama sekundarnog zračenja je oko $0,05 \div 0,1^\circ$, pa stoga, samo u retkim slučajevima, promena položaja cilja u odnosu na radar može izazvati duboke modulacije raspršenih signala ($\sim 15 \div 20$ dB) [1].

Amplitudna fluktuacija reflektovanih signala, po pravilu, pogoršava ka-

rakteristike otkrivanja radara, jer uti-
če na smanjenje odnosa S/N. Step
smanjenja amplitudnih fluktuacija sig-
nala na uslove njihovog otkrivanja
kvantitativno se može oceniti pomoću
tzv. koeficijenta gubitaka u uslovima
fluktuacija (L_F), koji pokazuje koliko
puta odnos S/N, pri otkrivanju fluktu-
irajućih signala, reflektovanih od cilje-
va, treba da bude veći, nego u slučaju
otkrivanja nefluktuirajućih signala re-
flektovanih od istih tih ciljeva.

Na slici 4. grafički je prikazana
zavisnost koeficijenta gubitaka (L_F) od
verovatnoće otkrivanja ciljeva (D), za
različite verovatnoće lažne uzbune (F)
za dve vrste ciljeva: sporo fluktuira-
jućih (1. vrsta) i ovih koji imaju sta-
bilan centar refleksije sa grupom sit-
nijih elementarnih raspršivača (2. vrs-
ta). Dijagrami pokazuju da za $D > 0,3$,
negativan uticaj amplitudnih fluktua-
cija signala postaje sve veći. Tako, na
primer, za veće verovatnoće otkrivanja
ciljeva $D=0,9 \div 0,99$, smanjenje odno-
sa S/N, usled fluktuacija reflektova-
nih signala, može biti od $4 \div 12$ dB. Ako,
međutim, cilj ima stabilne centre re-
fleksije, onda refleksije ostalih eleme-
nata cilja ne izazivaju duboke modula-
cije reflektovanog (sumarnog) signala.
Iz toga se može zaključiti da su gubici
zbog fluktuacije reflektovanih signala
od ovakvih ciljeva daleko manji nego
kod sporofluktuirajućih ciljeva (upo-
redi ciljeve 1. i 2. vrste na slici 4).

Spektar fluktuacija amplituda re-
flektovanih signala zavisi od stepena iz-
rezanosti sekundarnog dijagrama zra-
čenja i brzine promene pravca cilja.
Najviša frekvencija spektra amplitud-
nih fluktuacija, približno se može od-
rediti pomoću izraza:

$$F_{Fmin} = \frac{\omega_{pmax}}{\Theta} \quad (2.2)$$

gde je:

ω_{pmax} — maksimalna brzina promene
pravca cilja, i

Sl. 4 — Zavisnost koeficijenta gubitaka od
verovatnoće otkrivanja ciljeva (D)

Θ — srednja vrednost širine lepeza
sekundarnog dijagrama zrače-
nja cilja ($0,005 \div 0,1^\circ$ za cen-
timetarsko talasno područje).

Spektar amplitudnih fluktuacija re-
flektovanih signala od manevrišućih ci-
ljeva naći će se u području od 0 do
 $100 \div 400$ Hz, a od ciljeva u pravoli-
nijskom letu s laganim bočnim naginja-
njem od 0 do $10 \div 40$ Hz. Pored toga,
mnogobrojni eksperimenti su pokazali
[3] da intenzitet amplitudnih fluktua-
cija u celom frekventnom opsegu nije
ravnomeran. Maksimalne promene in-
tenziteta fluktuacija nalaze se u frek-
ventnom opsegu od 0 do 10 Hz (sl. 5).

Sl. 5 — Zavisnost spektrala fluktuacija am-
plituda reflektovanih signala od aviona u letu

Fluktuacije amplitude reflektovanih signala utiču na smanjenje tačnosti određivanja koordinata ciljeva i jedan su od osnovnih uzroka pojave slučajnih grešaka kod automatskog praćenja. Tako, na primer, kod uređaja za automatsko praćenje ciljeva po ugao-
nim koordinatama, izvedenih na principu konusnog pretraživanja, greška pri određivanju pravca cilja u opsegu frekvencija, koje odgovaraju frekvenciji pretraživanja, upravo je proporcionalna intenzitetu fluktuacija.

Pri refleksiji elektromagnetskog talasa od složenog cilja, dolazi ne samo do fluktuacija amplitude, već i do fluktuacija njegovog faznog fronta. Kao što se složeni cilj ne može nadomestiti tačkastim izvorom zračenja, tako se ni fazni front, signala reflektovanog od njega, ne može nadomestiti pravilnom kuglom.

Uređaji za vođenje po ugaonim koordinatama cilja usmeravaju se po pravcu koji je normalan na fazni front. Međutim, kako fazni front fluktui-
ra po slučajnom zakonu, to se i pravac normale na njega menja po istom zakonu. To, naravno, uzrokuje greške u određivanju ugaonih koordinata cilja. Slikovito govoreći, usled fluktuacije faznog fronta reflektovanog signala od realnog pokretnog cilja, ne određuju se ugaone koordinate samog cilja, već tačka koja predstavlja njegov efektivni centar, koji »luta« po ograničenoj površini oko njega. Međutim, u uslovima jakih fluktuacija faznog fronta, efektivni centar može se naći i izvan spomenute površine, pa čak i daleko od cilja, što uzrokuje velike greške pri praćenju.

Činjenica da je greška u određivanju pravca cilja, usled fluktuacija faznog fronta reflektovanog signala, obrnuto proporcionalna udaljenosti od njega, čini ovu pojavu posebno neugodnom pri praćenju bližih ciljeva.

Spektar fluktuacija faznog fronta, kao i spektar fluktuacija amplitude, je-

ste niskofrekventan, sa najintenzivnijim fluktuacijama u opsegu frekvencija od 0 do 5 Hz.

Frekventno-diverziti metoda radiolokacije

Negativan uticaj fluktuacija reflektovanog signala od cilja na karakteristike radara može biti odstranjen ili, u krajnjem slučaju, umanjen, primenom frekventno-diverziti metode radiolokacije. Fizička suština smanjenja fluktuacija reflektovanih signala za predajne frekventno-diverziti signale je u tome što je, pri dovoljno velikoj razlici nosećih frekvencija, širina lepeza dijagrama sekundarnog zračenja ciljeva za različite noseće frekvencije različita (vidi izraz 2.1), a odgovarajuće tačke maksimuma u dijagramu se ne poklapaju — pomaknute su jedna u odnosu na drugu, zbog čega se smanjuje izrezanost dijagrama sekundarnog zračenja cilja (slika 6), pa samim tim i fluktuacije parametara reflektovanog signala. Najveći efekat smanjenja fluktuacija postiže se statistički nezavisnim signalima reflektovanim od cilja.

Frekvencija korelacije signala, reflektovanih od jednog te istog cilja, zavisi od brzine prostiranja elektromagnetnih talasa i radijalne dužine cilja. Pri tome se pod radijalnom dužinom podrazumeva: a) za tačkaste ciljeve — rezolucija radara po daljini; b) za izdužene ciljeve — njihova stvarna dužina. Signali su nekorelirani ako je fazna razlika sastavnih frekvencijsko-diverziti signala, reflektovanih od krajnjih tačaka cilja, izmerenih u odnosu na njegov centar, veća od 2π :

$$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 > 2\pi, \quad (2.3)$$

gde su:

$\Delta\varphi_1 = (2\pi l_{cr} f_1)/c$ i $\Delta\varphi_2 = (2\pi l_{cr} f_2)/c$ — pomaci faza frekventno-diverziti signala u odnosu na faze signala reflektovanih od centra cilja;

l_{cr} — radijalna dužina cilja.

Ako u izraz (2.3) uvrstimo vrednosti za $\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$, dolazimo do potrebnog iznosa razlike frekvencija:

$$\Delta\phi_r = f_2 - f_1 > \frac{c}{l_{cr}} = \frac{300}{l_{cr}[\text{m}]} [\text{MHz}] \quad (2.4)$$

Očito, neophodan uslov nezavisnosti signala, reflektovanih od jednog te istog cilja, dovoljan je iznos razlike

stižu se približno iste karakteristike otkrivanja reflektovanih signala od realnih — fluktuirajućih i idealnih — ne-fluktuirajućih ciljeva. Dobitak u odnosu S/N, koji se postiže primenom frekventno-diverziti metode radiolokacije, može se proceniti pomoću koeficijenta gubitaka usled fluktuacija, koji se kreće od L_F (slika 4) do $L_{FD} = {}^m\sqrt{L_F}$, gde je m — broj statistički nezavisnih

Sl. 6

frekvencija, što zavisi od fizičke dužine cilja. Za dužinu cilja $l_{cr} = 10$ m minimalna potrebna razlika frekvencija frekvencijsko-diverziti signala iznosi 30 MHz.

Smanjenjem fluktuacija reflektovanih frekvencijsko-diverziti signala po-

signala. Kvantitativno spomenuti dobitak može se oceniti preko koeficijenta dobitka zbog frekventno-diverziti metode radiolokacije:

$$K_D = \frac{L_F}{L_{FD}} = L_F^{1 - \frac{1}{m}} \quad (2.5)$$

ili izraženo u decibelima

$$K_D[\text{dB}] = \left(1 - \frac{1}{m}\right) 10 \log L_F. \quad (2.6)$$

Na slici 7 grafički je prikazana zavisnost verovatnoće otkrivanja cilja (D) od $q=S/N$ za: idealno nefluktuirajuće ciljeve (kriva 1), fluktuirajuće ciljeve kod klasičnih impulsnih radara (kriva 2) i za isti cilj kod frekventno-diverziti radara (kriva 3). U svim slučajevima verovatnoća lažne uzbune je ista ($F=2 \cdot 10^{-5}$) i isti je broj impulsa od cilja ($N=20$).

Sl. 7 — Zavisnost verovatnoće otkrivanja ciljeva od odnosa $q=S/N$

Iz odnosa krivih 1 i 3 vidi se da je kod frekventno-diverziti radara verovatnoća otkrivanja fluktuirajućih i nefluktuirajućih reflektovanih signala od realnih ciljeva približno ista. Najveća razlika je kod najviših i najnižih verovatnoća otkrivanja, ali, čak i tada, odnos $q=S/N$ ne prelazi $1,5 \div 2$ dB. Međutim, iz odnosa krivih 2 i 3 vidi se da frekventno-diverziti metoda radiolokacije ima prednost u području viših verovatnoća otkrivanja ciljeva ($D > 0,3$). Tako, na primer, za $q=5$ dB verovatnoća otkrivanja ciljeva je 100%, dok je kod klasičnog impulsnog radara, za iste uslove, verovatnoća otkrivanja manja od 70%. Za zadatu verovatnoću otkrivanja ciljeva, radar sa frekventno-diverziti metodom rada ima daleko veći domet od klasičnog impulsnog radara iste predajne snage. Na primer, za verovatnoću otkrivanja ciljeva $D=90\%$ gubici zbog fluktuacija kod jednofrekventnog radara iznose 8 dB, dok kod

radara sa frekvencijsko-diverziti metodom rada oni dostižu vrednost od 0,5 dB. Dobitak u odnosu S/N od 7,5 dB ekvivalentan je povećanju predajne snage za oko 6 puta, zbog čega se domet povećava za 1,565 puta.

Za niske verovatnoće otkrivanja ciljeva frekventno-diverziti metoda ima prednost, jer je pojava impulsa reflektovanih od ciljeva, koji nadvišuju prag, u paketu prijemnih impulsa, daleko verovatnija.

Pored smanjenja fluktuacija reflektovanih signala frekventno-diverziti metoda radiolokacije ima i druge kvalitativne prednosti: a) povećanje dometa radara, i b) tačnije određivanje koordinata ciljeva.

Povećanje dometa kod radara sa frekventno-diverziti metodom rada zavisi od niza faktora:

- broja nosećih frekvencija i razlike između njih;
- načina generisanja frekventno-diverziti signala;
- raspodele snaga po sastavnim komponentama, i
- načina obrade prijemnih signala.

Uticaj broja nosećih frekvencija radara na povećanje dometa može se proceniti pomoću izraza (2.5). Domet se povećava na račun smanjenja koeficijenta gubitaka zbog fluktuacija u skladu sa funkcijom $L_F^{1-1/m}$. U zavisnosti od širine spektra fluktuacija, povećavanje odnosa S/N se smanjuje, dok se za brze fluktuacije (za $\Delta F_F \cdot T \gg 1$, gde je ΔF_F — efektivna širina spektra fluktuacije, T — vreme integracije prijemnih signala) odnos S/N povećava proporcionalno $1/\sqrt{m}$.

Za baze fluktuacije reflektovanih signala verovatnoća otkrivanja ciljeva je približno jednaka verovatnoći otkrivanja sporofluktuirajućih ciljeva za frekvencijsko-diverziti reflektovane signale (kriva 3 na slici 7).

Zavisnost odnosa napona praga signala kod frekventno-diverziti radarskih sistema i napona praga signala jednofrekventnog radara od karaktera fluktuacija reflektovanih signala (veličina $\Delta F_F \cdot T$) prikazana je na slici 8.

Sl. 8 — Zavisnost povećanja dometa frekventno-diverziti radarskih sistema od karaktera fluktuacija signala

Efektivnost frekventno-diverziti radarskih sistema, u zavisnosti od broja nosećih frekvencija, jednoznačno je određena izrazom 2.5. Povećanjem broja nosećih frekvencija odnos $q=S/N$ raste težeći vrednosti L_F . Postoji, međutim, optimalni broj nosećih frekvencija kod kojih su gubici zbog fluktuacija reflektovanih signala minimalni. Optimalni broj nosećih frekvencija nije konstantan, već zavisi od verovatnoće otkrivanja ciljeva, verovatnoće lažne uzbune, metode obrade prijemnih signala i drugih faktora.

Zavisnost odnosa $q=S/N$ od broja nosećih frekvencija radarskih sistema, za različite verovatnoće otkrivanja ciljeva i konstantnu verovatnoću lažne uzbune ($F=10^{-4}$), grafički je prikazana na slici 9. Dijagrami pokazuju da za $D > 0,5$ odnos $q=S/N$ ima minimum, koji je tim niži što je D veći. Povećanjem D položaj minimuma odnosa $q=S/N$ pomera se ka većem broju nosećih frekvencija. Treba uočiti da odnos $q=S/N$ brzo pada za relativno mali broj nosećih frekvencija, zahvaljujući čemu se povećanje dometa radara, blizu maksimalnom, može postići samo sa 2÷4 noseće frekvencije.

Sl. 9 — Zavisnost odnosa $q=S/N$ od broja nosećih frekvencija frekventno-diverziti radarskih sistema

Na slici 10 prikazana je zavisnost povećanja dometa od broja nosećih frekvencija (verovatnoća lažne uzbune $F=10^{-4}$, broj prijemnih impulsa za jedan okret antene $N=100$), gde je D argument.

Ako se koriste 2÷5 nosećih frekvencija, povećanje dometa iznosi: za $D=0,9$ 23÷33%, dok je za $D=0,99$ do met veći čak za 50÷90%.

Sl. 10 — Zavisnost povećanja dometa frekventno-diverziti radarskih sistema od broja nosećih frekvencija

Izbor broja nosećih frekvencija i razlike između njih jedno je od najvažnijih pitanja, koje projektant treba da razreši. S jedne strane, mali broj nosećih frekvencija i mala razlika iz-

među njih ne doprinosi velikom smanjenju fluktuacija reflektovanih signala, što, u krajnjem, rezultira neznatnim ukupnim efektima frekventno-diverziti radarskih sistema. S druge strane, veliki broj nosećih frekvencija uzrokuje: vrlo složenu konstrukciju, enormno povećanje gabarita i težine radara, a u određenim uslovima i ne tako velike efekte.

Maksimalno mogući broj nosećih frekvencija, zavisi, pre svega, od raspoloživog vremena obrade prijemnog signala. Često je vreme obrade signala jednako vremenu pretraživanja prostora, kada je maksimalni broj nosećih frekvencija jednak broju primljenih impulsa za vreme pretraživanja ($m_{\max} = N$).

Dijagrami na slikama 9. i 10. konstruisani su uz pretpostavku da je snaga predajnog signala ravnomerno raspoređena na sve frekventne kanale. Međutim, često je svrsishodno, pa čak i nužno, da se snaga predajnog signala rasporedi na kanale neravnomerno. Neravnomerna raspodela različito utiče na karakteristike otkrivanja. Za visoke verovatnoće otkrivanja ciljeva odnos S/N se povećava, dok se za niske verovatnoće otkrivanja odnos S/N smanjuje.

Povećanje tačnosti merenja koordinata ciljeva kod frekventno-diverziti radarskih sistema, na račun smanjenja fluktuacija amplituda reflektovanih signala, postiže se poređenjem amplituda signala. Tačnost rada uređaja za automatsko praćenje zavisi od karaktera fluktuacija reflektovanog signala. Najveću opasnost predstavljaju spore fluktuacije, čija se frekvencija poklapa sa pojasnim propustom pratećih sistema, uzrokujući, pri tome, pojavu lažnog signala greške, koji se sporo menja. Primenom frekventno-diverziti metoda lažni signali greške postaju slučajni i brzo se menjaju, što omogućava njihovu filtraciju. Zahvaljujući tome, povećava se tačnost praćenja ciljeva i smanjuje

vremenska konstanta sheme praćenja, što poboljšava uslove otkrivanja ciljeva i određivanje karaktera njihovih manevara.

Zahvaljujući smanjenju fluktuacija faznog fronta reflektovanih signala, frekventno-diverziti radarski sistemi imaju daleko veću tačnost praćenja ciljeva po ugaonim koordinatima. To je vrlo važno za monoimpulsne radare, kod kojih se fluktuacije signala po fazi praktično jedini izvor greške merenja ugaonih koordinata. Perioda fluktuacije faznog fronta reflektovanih signala frekventno-diverziti radarskih sistema smanjuje se približno onoliki broj puta koliki je broj nosećih frekvencija, koji, pak, dovodi do isto tolikog smanjenja greške praćenja. Uticaj frekventno-diverziti radarskih sistema na tačnost praćenja ciljeva po uglu može se

Sl. 11 — Disperzija signala po azimutu nadvodnog cilja kod: a) jednofrekventnih, i b) frekventno-diverziti radarskih sistema

ilustrovati eksperimentalnim rezultatima, prikazanim na slici 11. Na slici je prikazana disperzija signala po azimutu nadvodnog cilja kod jednofrekventnih (a), i frekventno-diverziti (b) radarskih sistema. Disperzija ugaonih koordinata ciljeva kod frekventno-diverziti radarskih sistema je oko dva puta manja u odnosu na jednofrekventne radare.

Obrada signala kod frekventno-diverziti radara

Najefektivnija obrada signala kod frekventno-diverziti radarskih sistema postiže se, svakako, optimalnom obradom signala svih različitih frekvencija, zatim sumiranjem tako dobijenih parcijalnih signala i poređenjem sumarnog signala sa zadatim nivoom signala praga. Optimalni prijemnik frekventno-diverziti radarskih sistema sastoji se, dakle, od: više paralelnih kanala, sklopa za sumiranje i sklopa za poređenje (slika 2).

Sumiranje izlaznih signala iz kanala, u principu, može biti ostvareno na visokoj međufrekvenciji i niskoj (video) frekvenciji. Prva dva načina sumiranja signala različitih kanala jednako su efektivna, ali njihova realizacija zahteva koherentnu obradu. Sumiranjem signala na video frekvenciji dobija se nepovoljniji odnos S/N , ali je obrada puno jednostavnija. Pri optimalnoj obradi sumiraju se kvadrati parcijalnih signala, a rešenje o prisustvu cilja donosi se kada suma nadvisi postavljeni nivo praga (U_0^2), tj. u slučaju zadovoljenja nejednakosti:

$$U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_m^2 > U_0^2, \quad (2.8)$$

gde su:

$U_1, U_2, \dots, U_m$ — izlazni signali frekventnih kanala prijemnika,

U_0 — napon praga.

Međutim, kako su realizacije optimalnih prijemnika za obradu frekventno-diverziti radarskih signala vrlo složene, razrađene su jednostavnije metode tzv. dopunske obrade signala [4], sa doduše nešto manjim odnosom S/N , ali dosta često sa nizom prednosti u nekim drugim karakteristikama.

U zavisnosti od broja nosećih frekvencija, u sumatoru je, u principu, moguće primeniti sledeće načine dopunske obrade parcijalnih signala pojedinih kanala, kao što su:

- sumiranje izlaznih signala svih kanala;

- množenje izlaznih signala svih kanala;

- sumiranje izlaznih signala i množenje parcijalnih suma, i

- množenje izlaznih signala i sumiranje parcijalnih proizvoda.

Prva dva načina dopunske obrade primenljiva su za bilo koji broj nosećih frekvencija, dok se druga dva načina mogu primeniti kada je taj broj jednak ili veći od tri.

1. Najčešću primenu dopunske obrade signala frekventno-diverziti radara ima sabiranje sastavnih komponenata po modelu:

$$U_s = \sum_{i=1}^m U_i, \quad (2.9)$$

gde je:

U_s — sumarni signal;

U_i — signal i -tog frekventnog kanala;

m — broj frekvencija frekventno-diverziti signala (broj kanala).

U slučaju ovakve obrade za odluku o prisustvu cilja dovoljno je da signal ma kog kanala nadvisi nivo postavljenog praga. Verovatnoća otkrivanja ciljeva (D_s) jednaka je sumi verovatnoća nadvišenja nivoa praga od signala svih kanala:

$$D_s = \sum_{n=0}^m \frac{m!}{n!(m-n)!} D_0^n (1 - D_0)^{m-n},$$

gde je:

$\frac{m!}{n!(m-n)!}$ — broj kombinacija kanala, čiji izlazni signal istovremeno nadvisuju signal praga;

D_0 — verovatnoća otkrivanja cilja jednim kanalom;

$(1 - D_0)$ — verovatnoća propuštanja cilja jednog kanala.

Analogno tome, određuje se verovatnoća lažne uzbune (F_s) frekventno-diverziti radarskog prijemnika pomoću verovatnoće lažne uzbune jednog kanala (F_o):

$$F_s = \sum_{n=0}^m \frac{m}{n!(m-n)!} F_o^n (1-F_o)^{m-n},$$

ili, kako je $F_o \ll 1$, $F_s \approx m \cdot F_o$.

Na slici 12 grafički je izražena zavisnost verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva kod frekventno-diverziti radarskih prijemnika (dopunska obrada vrši se sumiranjem) od verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva pojedinih kanala (pune krive). Funkcija $D_s = f(D_o)$, povećanjem broja frekvencija m , raste. Naravno, povećanjem broja kanala povećava se i verovatnoća lažne uzbune, koja se, pak, smanjuje povećanjem nivoa praga, a što, opet, dovodi do smanjenja verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva.

Sl. 12 — Zavisnost verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva kod višekanalnih radara od verovatnoće pravilnog otkrivanja njegovih pojedinih kanala

Za ometanje ovakvih radarskih sistema dovoljno je da se ometa jedna noseća frekvencija: signal smetnje nesmetano prolazi kroz odgovarajući prijemni kanal do sklopa za sumiranje.

Signal smetnje, sumirajući se sa korisnim signalom iz ostalih prijemnih kanala, maskira ili stvara dezinformišuću sliku na radarskom pokazivaču. Dakle, frekventno-diverziti radarski sistemi, kod kojih se dopunska obrada signala vrši sumiranjem, osetljiviji su na smetnje od jednofrekventnih radara. Zaštita ovih sistema od smetnji moguća je jedino isključivanjem ometanih nosećih frekvencija.

2. *Množenjem signala* rezultujući signal ima oblik:

$$U_M = U_1 \cdot U_2 \cdot U_3 \dots U_m, \quad (2.10)$$

gde su:

$U_1, U_2, \dots, U_m$ — signali odgovarajućih frekventnih kanala prijemnika.

Da bi došlo do pravilnog otkrivanja cilja, potrebno je da signali u svim kanalima nadvisuju nivo praga. Izostankom signala u makar jednom kanalu izostaje detekcija cilja, jer je proizvod signala jednak nuli.

Ako se, dakle, dopunska obrada signala kod višekanalnih prijemnika vrši množenjem signala, verovatnoća otkrivanja ciljeva određuje se po formuli:

$$D_M = D_o^m,$$

a verovatnoća lažne uzbune:

$$F_M = F_o^m.$$

Kod frekventno-diverziti radarskih prijemnika, gde se dopunska obrada vrši množenjem signala svih kanala, verovatnoća pravilnog otkrivanja ciljeva, kao i verovatnoća lažne uzbune je veća, što je broj kanala manji.

Na slici 12 grafički je izražena funkcija $D_M = f(D_o)$, gde je broj kanala m argument (isprekidana linija).

Na slici 13 prikazane su krive zavisnosti verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva frekventno-diverziti radarskim sistemom ($m=3$), od odnosa $q = S/N$ na ulazu pojedinih prijemnih

kanala uz konstantnu verovatnoću lažne uzbune ($F=10^{-5}$) za različite načine dopunske obrade signala: *sumiranje* (kriva 1), *množenje* (kriva 2) i *sumiranje dva po dva signala, a zatim množenje dobijenih parcijalnih suma* (kriva 3).

Poređenjem krivih na slikama 12 i 13 za trokanalni radar, uz konstantnu verovatnoću lažne uzbune, razlike u karakteristikama otkrivanja ciljeva, izazvane različitim načinima dopunske obrade signala, smanjuju se, ali je prednost sumiranja nad drugim načinima očita.

Sl. 13 — Zavisnost verovatnoće pravilnog otkrivanja ciljeva kod trokanalnog radara od odnosa $q=S/N$, uz konstantnu verovatnoću lažne uzbune ($F=10^{-5}$)

Za uspešno ometanje frekventno-diverziti sistema, kod koji se dopunska obrada signala vrši množenjem, neophodno je ometati sve kanale. Frekventno-diverziti radarski sistemi sa množenjem signala, manje su osetljivi na ometanje od istog takvog sistema sa sabiranjem signala, u krajnjem, za onoliko puta koliki je broj njegovih nosećih frekvencija — m .

3. *Sumiranje, a zatim množenje parcijalnih suma i množenje, zatim sumiranje parcijalnih proizvoda* su kombinacije navedenih načina dopunske obrade — sumiranja i množenja. U zavisnosti od broja kanala prijemnika kombinacije mogu biti različite. Tako, na primer, kod trokanalnog prijemnika moguća je samo jedna kombinacija

dopunske obrade signala sumiranjem, a zatim množenjem parcijalnih suma:

$$U_{SM}=(U_1+U_2) \cdot (U_2+U_3) \cdot (U_1+U_3). \quad (2.11)$$

Dopunska obrada signala množenjem, a zatim sumiranjem parcijalnih proizvoda, kod trokanalnog prijemnika, moguća je samo u sledećoj varijanti:

$$U_{MS}=U_1U_2+U_2U_3+U_1U_3. \quad (2.12)$$

Iz izraza 2.11 i 2.12 vidi se uslov za pravilno otkrivanje ciljeva kod trokanalnog radara — da signali nadvise nivo praga u najmanje dva kanala. Verovatnoća pravilnog otkrivanja i lažne uzbune može se odrediti pomoću sledećih izraza:

$$D=3D_o^2(1-D_o)+D_o^3=3D_o^2-2D_o^3,$$

$$F=3F_o^2(1-F_o)+F_o^3=3F_o^2-2F_o^3.$$

Karakteristike pravilnog otkrivanja ciljeva kod višekanalnih prijemnika sa kombinovanim načinom dopunske obrade signala su lošije od karakteristika pravilnog otkrivanja prijemnika sa sumiranjem i množenjem signala pojedinih signala (slika 13).

Pored opisanih načina dopunske obrade signala kod frekventno-diverziti radarskih sistema uvek se vrši i selekcija signala po maksimumu amplitude ili maksimalnom odnosu S/N . Tako se u svakom kanalu prijemnika vrši nezavisna obrada signala, a odluka o prisustvu cilja donosi se samo na osnovu jednog signala — najjačeg po amplitudi ili po tome što najviše nadvisuje šum prijemnika. U poređenju sa jednofrekventnim radarima, frekventno-diverziti radarski sistemi sa selekcijom signala po, maksimumu amplitude signala ili najvećem odnosu S/N imaju znatno veću verovatnoću pravilnog otkrivanja ciljeva, a na račun toga, i znatno veći domet i, tačnije, određivanje koordinata (zahvaljujući smanjenju fluktuacija amplitude signala).

Frekventno-diverziti radarski sistemi sa kombinovanim načinom dopunske obrade signala po osetljivosti na

ometanje nalaze se između sistema sa sumiranjem i sistema sa množenjem signala. Ometanje sistema kod kojih se dopunska obrada vrši po šemi »množenje + sumiranje«, gde se, na primer, množi n od m signala i tako formirani signali sumiraju, postiže se ometanjem $(m-n+1)$ radnih frekvencija, jer je potrebno da sve sume, koje se množe, budu različite od nule. Zaštita od ometanja sistema sa dopunskom obradom po šemi »sabiranje + množenje« zavisi, kako od broja signala koji se sumiraju n , tako i od broja radnih frekvencija m . Ometanje radarskog sistema sa 5 nosećih frekvencija, kod kojeg se sumiraju dva po dva signala, a zatim tako formirane parcijalne sume pomnože, može se uspešno izvesti ometanjem 4 kanala. Međutim, isti efekat se postiže ako se sumiraju četiri po četiri signala i tako formirane parcijalne sume pomnože, ometanjem samo dva frekventna kanala.

Zaključak

Smanjenjem radarske površine savremenih ciljeva smanjuje se verovatnoća pravilne detekcije pomoću klasičnih radarskih sistema, što utiče na aktuelnost primene i uvođenje u naoružanje savremenih armija, novih radarskih sistema i metoda radiolokacije.

Frekventno-diverziti radarski sistemi, koji su, u suštini, vrlo složeni i skupi, jer sadrže više radara u jednom sistemu, imaju, na račun smanjenja fluktuacije amplituda reflektovanih-raspršenih signala od ciljeva, veći domet, tačnije automatsko praćenja ciljeva i manju osetljivost na smetnje. Da bi bio efikasan, ometač mora biti širokopojasan ili imati isti broj nosećih frekvencija, kao i radarski sistem. Pasivne smetnje se lakše eliminišu, jer zbog zavisnosti frekvencija Dopplera od razlike nosećih frekvencija, brisač stalnih odraza prigušuje vrlo uzak pojas frekvencija.

Literatura:

- [1] Višin, G. M.: MNOGOČATOTNAJA RADIOLOKACIJA, »Vojenoje izdateljstvo Ministarstva obrani 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] Grujić, V.: REČNIK FRANCUSKO-SRPSKO-HRVATSKI, »Prosveta«, Beograd, 1971.
- [6] Razingar, A.: PEZ RADARSKIH UREĐAJA (Lekcije — Poslediplomski studij PEO), TVA KoV JNA, Zagreb, 1980.
- [7] Bogdanović, M.: OSNOVE RADARSKE TEORIJE, CVTŠ KoV JNA »General armije Ivan Gošnjak«, Zagreb, 1989.
- [8] Zentner, E.: RADIOKOMUNIKACIJA, »Školska knjiga«, Zagreb, 1980.
- [9] Đorović, M.: RADARSKI DIVERZITI (Seminarski rad — Poslediplomski studij — Specijalizacija RRT), TVA KoV JNA, Zagreb, 1981.
- [10] Witt, M. & Reeder, D.: A New Generation Air Defence Radar, »Microwave journal«, No 2, Feb., 1984.
- [11] Mathieas, R. F. & Conningham, N. A.: Frequency-Scanning Technique Applied to Air-Defense Radar, »Microwave systems news«, No 2, Feb., 1986.