

OMETANJE RADARSKIH GLAVA ZA SAMONAVOĐENJE AMPLITUDNO MODULISANOM METODOM OMETANJA „CROSS EYE“

Kapetan mr *Bojan* Milanović, dipl. inž.
Vojna akademija

Rezime:

U radu je prikazan uticaj metode ometanja „Cross eye“ na uspešno vođenje rakete monoimpulsnom radarskom glavom za samonavođenje. Analiza dobijenih rezultata pokazala je: da se maksimalna greška određivanja položaja cilja postiže kada ometači emituju koherentne signale čija je fazna razlika 180° , da je greška veća što je međusobno rastojanje između antena ometača veće, da je, suprotno očekivanju, efikasnost ometanja veća što je rastojanje između ometača i rakete koja se ometa manje.

Ključne reči: monoimpulsni radar, amplitudna modulacija, proporcionalno približavanje, samonavođena raketa, metoda ometanja „Cross eye“, ometanje monoimpulsnih radara.

MONOPULSE HOMING MISSILE JAMMING WITH THE AMPLITUDE MODULATED CROSS EYE METHODE

Summary:

This article shows the effect of the “Cross eye” jamming method on successful guidance of monopulse homing missiles. The analysis of the results has shown that the maximal tracking error is made if the jamming signals are coherent and out of phase, that a larger distance between jamming antennas causes a greater error, and that, opposite to expectations, a smaller distance between the jammer and the missile results in better jamming effects.

Key words: monopulse radar, amplitude modulation, proportional guidance, homing missile, “Cross eye” jamming, monopulse radar jamming

Uvod

Samonavođene rakete su deo savremenog vojnog koncepta „pametnog“ oružja koje radi prema principu „ispali i zaboravi“. Na osnovu energije koja nosi informaciju o položaju i kretanju cilja sistemi samonavođenja mogu se podeliti na: radio (radarski), toplotne (infracrveni), optičke (TV i

laserski), akustičke (zvučni) i kombinovane. Nesumnjivo najveće iskorišćenje borbenih mogućnosti sistema za navođenje rakete ostvaruje se u radarskom režimu rada, u kojem su i najveće daljine otkrivanja i praćenja cilja.

Među radarskim sistema samonavođenja monoimpulsni radarski sistemi pokazali su najbolje performanse po pitanju preciznosti i osetljivosti na vremenske fluktuacije signala. Narušavanje normalnog rada monoimpulsne radarske glave za samonavođenje moguće je ometanjem kanala za vođenje po uglovnim koordinatama ili kanala za automatsko praćenje po daljini. Osnovni pristup ometanja kanala za vođenje po uglovnim koordinatama jeste korišćenje prostorno razdvojenih izvora ometanja. Fazna karakteristika tako postavljenih ometača može biti koherentna (međusobno zavisna) ili nekoherentna (međusobno nezavisna). Kod nekoherentnih ometača, usled greške u vođenju, raketa prolazi kroz prostor (bazu) između dva ometača. Zato se kod ove metode ometači nalaze na dve različite letelice od kojih je jedna manje važnosti (npr. bespilotna letelica). Ona će odvlačiti raketu na sebe kako bi zaštitila letelicu veće važnosti (npr. bombarder). Kod koherentnih ometača greška vođenja je takva da raketa ne prolazi između antena ometača. To znači da je moguće postaviti antene na istoj letelici, što je od velikog značaja za ostvarivanje koherentnosti signala.

Kada se raketa vodi metodom proporcionalnog navođenja, u toku leta rakete prema cilju, ugaona brzina θ obrtanja vektora brzine rakete \vec{V}_R treba da bude srazmerna ugaonoj brzini ($\dot{\varepsilon}$) obrtanja linije cilja (slika 1):

$$\frac{d\theta}{dt} = c \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

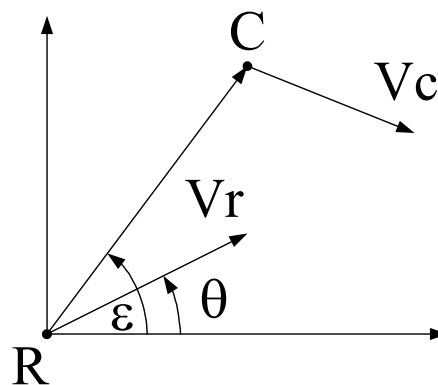
gde je c – navigaciona konstanta.

Kako je normalno ubrzanje rakete a_y povezano sa ugaonom brzinom odnosom:

$$a_y = V_R \cdot \dot{\theta} \quad (2)$$

jednačina (1) može se napisati u obliku:

$$a_y = c \cdot V_R \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3)$$



Sl. 1 – Vođenje rakete metodom proporcionalnog navođenja

što znači da kod ove metode navođenja normalno ubrzanje rakete treba da bude srazmerno brzini rakete i ugaonoj brzini linije cilja.

Ugao linije cilja ε , koji je određen koordinatom, biće:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \Theta, \quad (4)$$

gde je ε' – stvarni ugao, a Θ – uneta greška usled ometanja.

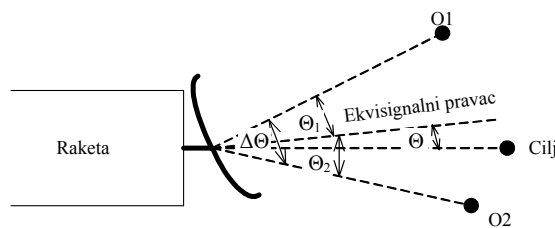
Jednačina proporcionalnog navođenja tada se može napisati u obliku:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\varepsilon' + \Theta)}{dt} = \frac{d\varepsilon'}{dt} + \frac{d\Theta}{dt} \quad (5)$$

Iz izraza (5) vidi se da, ukoliko je uneta greška pri određivanju položaja cilja prouzrokovana ometanjem, konstantna u vremenu, ometanje neće uticati na vođenje rakete, odnosno raketa će biti u mogućnosti da pogodi cilj. Da bi se ostvario efekat ometanja, ugaona greška nastala usled ometanja mora biti promenljiva u vremenu.

Ometanje nekorelisanim signalima

Pod nemodulisanim, nekoherentnim ometajućim signalima podrazumevaju se signali koji potiču od dva prostorno razdvojena izvora zračenja, čije faze nisu korelisane. Uticaj ovih signala, koji dolaze iz različitih



pravaca na monoimpulsni sistem sa amplitudnom komparacijom, prikazan je na slici 2. Neka signal koji potiče od ometača 1 dolazi pod uglom Θ_1 , a signal koji potiče od ometača 2 pod uglom Θ_2 . Neka je ugao pod kojim se vide antene ometača označen sa $\Delta\Theta$. Signali detektovani na ulazu koordinatora tada se mogu napisati u obliku:

Sl. 2 – Položaj ekvisignalnog pravca antene u slučaju praćenja dva izvora zračenja

$$u_1 = U_1 \cdot F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 \cdot F(\Theta_0 - \Theta_2) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t), \quad (6)$$

$$u_2 = U_1 \cdot F(\Theta_0 + \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 \cdot F(\Theta_0 + \Theta_2) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t), \quad (7)$$

gde su U_i i ω_i amplituda i učestanost detektovanog napona signala koji dolazi od odgovarajućeg ometača.

Na izlazu sumarnog kanala (u_s) i kanala razlike (u_d) dobija se:

$$u_s = U_1 \cdot [F(\Theta_0 - \Theta_1)] + F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 [F(\Theta_0 - \Theta_2) + F(\Theta_0 - \Theta_2)] \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (8)$$

$$u_d = U_1 \cdot [F(\Theta_0 - \Theta_1)] + F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 [F(\Theta_0 - \Theta_2) + F(\Theta_0 - \Theta_2)] \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (9)$$

Na izlazu faznog detektora dobiće se signal:

$$u_{fd} = k_{fd} \cdot \overline{u_s \cdot u_d} \quad (10)$$

gde je k_{fd} – konstanta faznog detektora, odnosno:

$$u_{fd} = k_1 \cdot \left\{ \beta^2 \cdot [F^2(\Theta_0 - \Theta) - F^2(\Theta_0 + \Theta)] + [F^2(\Theta_0 - \Theta + \Delta\Theta) - F^2(\Theta_0 + \Theta - \Delta\Theta)] \right\} \quad (11)$$

gde je k_1 – konstanta, $\Theta = \Theta_1$, a $\Theta + \Delta\Theta = \Theta_2$, $\beta = \frac{U_1}{U_2}$.

Izraz (11) određuje opštu pelengacionu karakteristiku, koja predstavlja zavisnost napona na izlazu faznog detektora od ugaonog položaja antena ometača.

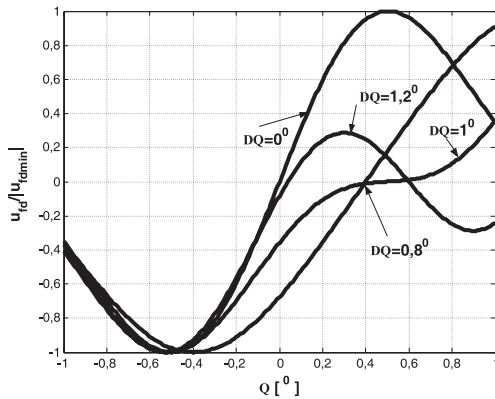
Analiza pelengacione karakteristike biće izvršena grafički i linearizacijom funkcije dijagrama zračenja. Cilj analize usmeren je ka prikazu uticaja rastojanja i snage signala koji emituju ometači na izgled pelengacione karakteristike.

Grafička analiza nekoherentnih ometača

Ukoliko se za funkciju dijagrama zračenja uzme funkcija oblika

$$F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}, \text{ gde je za } k \text{ uzeto } k = 160, \text{ kako bi se dobio dijagram}$$

zračenja širine 1° (što se često dešava kod nišanskih radara) i neka je $\Theta_0 = 0,4^\circ$, $\beta = 1$ (signali sa oba ometača održavaju se na jednakim nivoima snaga, a menja se ugao pod kojim se vide antene ometača), za napon na izlazu faznog detektora, prema izrazu (11), dobiće se krive kao na slici 3. Sa slike 3 vidi se da će u slučaju nekoherentnih smetnji pri dejstvu jednakim snagama ometača $\beta=1$ ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu središta baze ometača (za ugao pod kojim se vide antene ometača od $\Delta\Theta=0^\circ$, ekvisignalni pravac je usmeren u pravcu ugla $\Theta = 0^\circ$, za

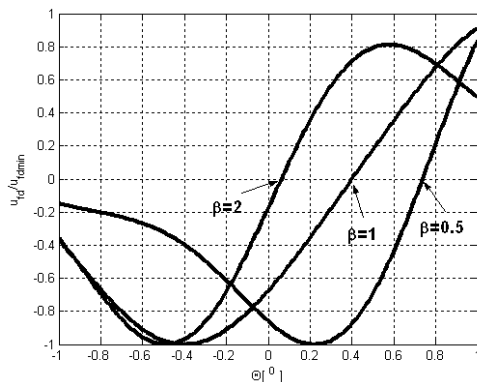


Sl. 3 – Normalizovana vrednost napona faznog detektora u funkciji položaja ometača ($\beta = 1$)

ugao pod kojim se vide antene ometača od $\Delta\Theta = 0,8^\circ$, ekvisignalni pravac je usmeren u pravcu ugla $\Theta = 0,4^\circ$). Sa slike se, takođe, može uočiti da se sa porastom rastojanja između ometača smanjuje nagib pelengacione karakteristike. Pri nekoj kritičnoj vrednosti ugla pod kojim raketa „vidi“ antene ometača $-\Delta\Theta_r$, koeficijent nagiba pelengacione karakteristike biće jednak nuli (kriva označena sa $\Delta\Theta = 1^\circ$), pa će pod dejstvom slučajnih faktora antena koordinatora početi da se okreće ka jednom od ometača. Ukoliko se nastavi povećanje rastojanja između antena ometača tako da ugao pod kojim raketa „vidi“ antene ometača bude iznad vrednosti kritičnog ugla, pojaviće se dve tačke ravnoteže (kriva označena sa $\Delta\Theta = 1,2^\circ$).

Za uglove veće od kritičnog ugla antena će preći na praćenje jednog od ometača. Vrednost kritičnog ugla dobija se izjednačavanjem izvoda funkcije napona faznog detektora u okolini tačke $\Theta = \Delta\Theta/2$ sa nulom.

$$\left. \frac{\partial u_{fd}}{\partial \Theta} \right|_{\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2}} = 0 \tag{12}$$



Sl. 4 – Normalizovana vrednost napona faznog detektora u funkciji odnosa snaga ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

Ukoliko se položaj ometača drži konstantnim, a menja se snaga ometača, dobija se karakteristika prikazana na slici 4. Sa slike 4 može se videti da će ekvisignalni pravac biti usmeren ka energetsom težištu ometača, odnosno da će biti pomeren ka ometaču koji emituje veću snagu ($\beta = \frac{U_1}{U_2}$).

Na osnovu slika 3 i 4 može se doći do zaključka da će pri ometanju monoimpulsnog radar-

skog sistema nekoherentnim ometačima ekvisignalni pravac, bez obzira na rastojanje ometača i odnos njegovih snaga, biti usmeren u pravcu unutar baze ometača. S obzirom na tu činjenicu, pri ometanju nekoherentnim ometačima potrebne su dve letelice koje će nositi ometače.

Analiza linearizacijom funkcije dijagrama zračenja

Približna vrednost ugla za koji je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti ukoliko se funkcija $F(\Theta)$ linearizuje u okolini ekvisignalnog pravca. To se može učiniti ukoliko je ugaono rastojanje $\Delta\Theta$ između ometača malo u odnosu na ugao Θ_0 . Tada su:

$$F(\Theta_0 \pm \Theta) = F(\Theta_0) \mp |F'(\Theta_0)| \cdot \Theta \quad (13)$$

$$F[\Theta_0 \mp (\Theta - \Delta\Theta)] = F(\Theta_0) \pm |F'(\Theta_0)| \cdot (\Theta - \Delta\Theta) \quad (14)$$

pa se izraz (11) može napisati u obliku:

$$u_{fd} = 4 \cdot k_1 \cdot F'(\Theta_0) \cdot [\Theta \cdot (1 + \beta^2) - \Delta\Theta] \quad (15)$$

Iz uslova $u_{fd} = 0$, dobija se:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{1 + \beta^2} \quad (16)$$

Iz izraza (16) vidi se da će ekvisignalni pravac biti usmeren u energetski centar ometača. Za odnos snaga signala $\beta = 1$ ekvisignalni pravac biće usmeren u pravcu središta između ometača, ukoliko je $\beta > 1$ biće usmeren u pravcu bliže prvom ometaču, a u slučaju $\beta < 1$ – u pravcu bliže drugom ometaču.

Ometanje koherentnim ometačima

Kada izvori ometanja emituju nekoherentne signale, sistem samonavođenja rakete vodiće raketu u pravcu energetskog centra izvora zračenja, dakle između antena ometača. Ukoliko na ulaz antene dođu dva koherentna signala, ekvisignalni pravac antene pod odgovarajućim uslovima biće usmeren van baze (zamišljene linije koja spaja antene) ometača.

Pravac na kojem je signal na izlazu detektora jednak nuli, u slučaju da postoje dva koherentna izvora zračenja, određuje se iz uslova da je signal kanala razlike jednak nuli. Posmatrajmo polja u otvoru antene ko-

ordinatora. Neka se antene koherentnih ometača nalaze pod uglom $\Delta\theta$, a ugao između ekvisignalnog pravca i središta baze ometača Θ . Pretpostavka je da je amplituda polja (u otvoru antene) koje potiče od ometača C_2 jednaka 1, a amplituda polja koje potiče od ometača C_1 jednaka β . Mogu se analizirati dva slučaja: $\varphi = 0$ i $\varphi = \pi$.

Slučaj kada je fazna razlika signala $\varphi=0$

Signali koji su detektovani na anteni koordinatora mogu se napisati u obliku:

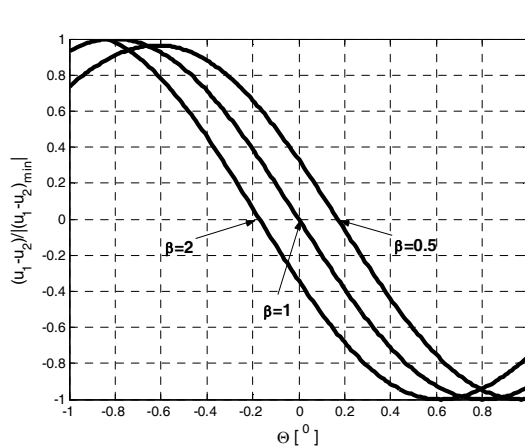
$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) + F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (17)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) + F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (18)$$

gde je $F(\Theta)$ funkcija dijagrama zračenja antene (ugao Θ se čita od maksimuma dijagrama zračenja).

Na slici 5 prikazan je grafik normalizovane vrednosti napona kanala razlike u zavisnosti od položaja ekvisignalnog pravca. Za funkciju dijagrama zračenja uzeto je $F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}$, gde je $k=160$ i $\Theta_0 = 0,4^\circ$. Na grafiku

su date tri krive za tri različita odnosa snaga ometača ($\beta = 0,5$, $\beta = 1$, $\beta = 2$).



Sl. 5 – Normalizovana vrednost signala razlike koherentnih ometača za različite snage ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

Ugao $\Theta = 0$ odgovara sredini baze ometača. Sa slike se vidi da će u slučaju jednakih snaga signala ometača ($\beta = 1$) ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu sredine baze ometača. U slučaju da je snaga jednog od ometača veća od snage drugog ometača, ekvisignalni pravac biće usmeren u pravcu bliže jačem izvoru ometanja.

Pravac na kojem je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti bilo zame-nom izraza funkcije dijagrama zračenja u jednačine (17) i (18)

i rešavanjem sistema, bilo grafički (slika 5). Međutim, približna vrednost ugla za koji je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti ukoliko se funkcija $F(\Theta)$ linearizuje u okolini ekvisignalnog pravca (to se može uraditi ukoliko su $\Delta\Theta/2$ i Θ , male vrednosti u odnosu na ugao Θ_0). Tada je:

$$u_1 = \beta \left[F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] + F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (19)$$

$$u_2 = \beta \left[F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] + F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (20)$$

$$u_1 - u_2 = -2 \cdot \beta |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) + 2 \cdot |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (21)$$

Iz uslova $u_1 - u_2 = 0$, dobija se:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (22)$$

Imajući u vidu da $\Theta = 0^\circ$ predstavlja pravac sredine između antena ometača, iz poslednjeg izraza se vidi da će ekvisignalni pravac biti usmeren u tačku koja se nalazi između izvora ometajućih signala. U slučaju da je $\beta = 1$, ekvisignalni pravac se usmerava ka sredini baze između antena ometača. U slučaju da $\beta \rightarrow \infty$ ili $\beta \rightarrow 0$, ekvisignalni pravac biće usmeren ka jednom od ometača.

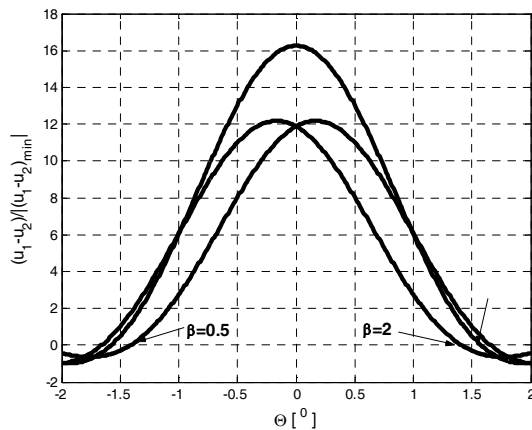
Slučaj kada je fazna razlika signala $\varphi = \pi$

U slučaju kada je fazna razlika signala $\varphi = \pi$ polja koja potiču od antena ometača u centru otvora antene koordinatora nalaze se u „protivfazi“. Tada su:

$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) - F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (23)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) - F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (24)$$

Grafičko rešenje izraza ($u_1 - u_2 = 0$) u slučaju koherentnih izvora ometanja fazno pomerenih za ugao $\varphi = \pi$ prikazano je na slici 6. Za funkciju dijagrama zračenja uzeta je $F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}$, gde je $k = 160$ i $\Theta_0 = 0,4^\circ$. Ugao $\Theta = 0$ odgovara pravcu središta baze ometača.



Sl. 6 – Normalizovana vrednost signala razlike koherentnih ometača fazno pomerenih za ugao $\varphi = \pi$ za različite snage ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

budu smeštena na istoj letelici, što olakšava uspostavljanje koherentnosti signala i održavanje konstantne vrednosti fazne razlike.

Sa slike 6 vidi se da će pri ometanju koherentnim ometačima, fazno pomerenim za ugao $\varphi = \pi$, signal u kanalu razlike biti jednak nuli za uglove koji su veći od ugaonog rastojanja ometača ($\Delta\Theta/2 = 0,4^\circ$). To znači da će ekvisignalni pravac biti usmeren van baze ometača. Ova osobina ima niz prednosti. Pri izvršenju zadatka ni jedna od letelica ne mora biti žrtvovana radi zaštite one druge. Pored toga, činjenica da će ekvisignalni pravac biti usmeren van baze ometača daje mogućnost da oba ometača

Analiza uticaja metode ometanja „Cross eye“

Matematička analiza uticaja metoda ometanja „Cross eye“ na određivanje ugla ekvisignalnog pravca ostvarena je linearizacijom funkcije dijagrama zračenja. Polja koja potiču od antena ometača u centru otvora antene koordinatora nalaze se u protivfazi. Pošto su:

$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) - F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (25)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) - F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (26)$$

Linearizacijom funkcije dijagrama zračenja u okolini ekvisignalnog pravca dobija se:

$$u_1 = \beta \left[F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] - F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (27)$$

$$u_2 = \beta \left[F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] - F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (28)$$

$$u_1 - u_2 = -2 \cdot \beta |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) - 2 \cdot |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (29)$$

Odnosno, iz $u_1 - u_2 = 0$, sledi da je:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (30)$$

Treba imati u vidu da su ovi izrazi približni, jer su dobijeni linearizacijom funkcije dijagrama zračenja antene. Poslednji izraz daje pogrešan rezultat za $\beta = 1$. Granice primerljivosti formula mogu se odrediti iz sledećih nejednacija:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Theta_{0.5}} \leq 0,02 - 0,04 \quad (31)$$

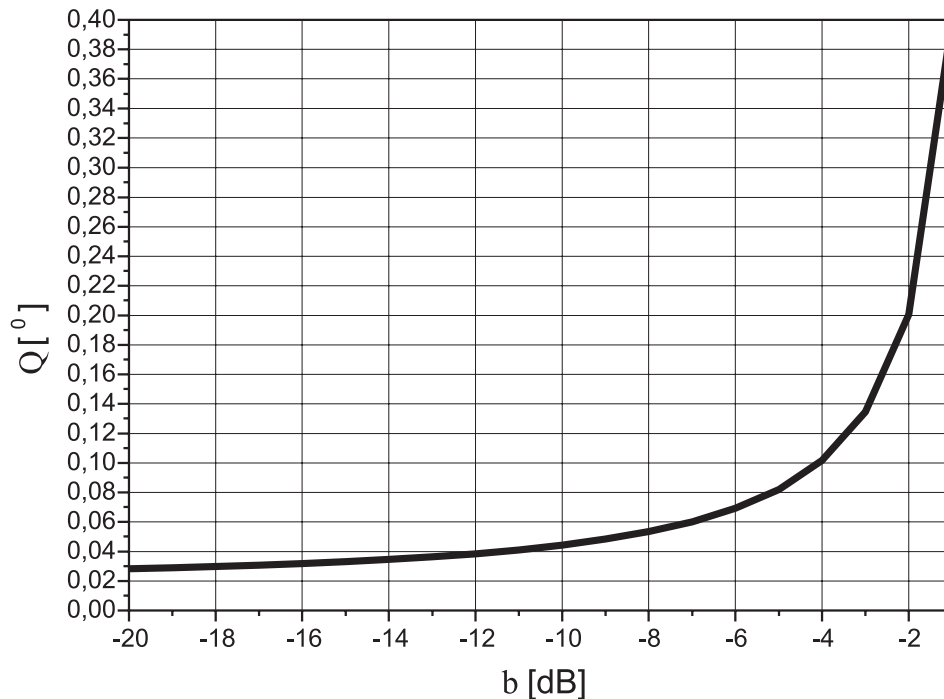
$$\beta \leq 0,9 \quad (32)$$

Iz izraza (30) $\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} > 1 \right)$ vidi se da će u slučaju dejstva koherentnih signala koji su fazno pomereni za 180° ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu koji se nalazi van baze antena ometača $\left(\Theta > \frac{\Delta\Theta}{2} \right)$.

U tabeli 1 date su vrednosti ugla ekvisignalnog pravca dobijenih na osnovu izraza (30). Na osnovu podataka iz tabele 1 nacrtan je grafik na slici 7.

Tabela 1
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca kada nema eho signala ($\Delta\Theta = 0,046^\circ$)

β [dB]	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11
β	0,1	0,1122	0,1259	0,1413	0,1585	0,1778	0,1995	0,2239	0,2512	0,2818
Θ [°]	0,0281	0,0288	0,0296	0,0306	0,0317	0,0329	0,0345	0,0363	0,0384	0,0411
β [dB]	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
β	0,3162	0,3548	0,3981	0,4467	0,5012	0,5623	0,6309	0,7079	0,7943	0,8913
Θ [°]	0,0443	0,0483	0,0534	0,0601	0,0692	0,0821	0,1016	0,1345	0,2007	0,3999



Sl. 7 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snaga ometača

Sa slike 7 i iz tabele 1 može se uočiti da je za bilo koji odnos snaga signala ometanja ekvisignalni pravac usmeren van baze ometača. Osim toga, na slici 7 se može uočiti da sa promenom odnosa snaga ometača (amplitudna modulacija signala zračenja) dolazi do promene vrednosti ugla ekvisignalnog pravca.

Ukoliko je odnos snaga ometača konstantan, metodom ometanja „Cross eye“ se uneće se greška pri određivanju položaja cilja koja je veća od ugla pod kojim se vide antene ometača. Međutim, s obzirom na to da je ova vrednost konstantna ometanje neće imati uticaja na vođenje rakete. Ukoliko se odnos snaga signala ometanja menja, doći će i do promene vrednosti ugla Θ , što znači da izvod neće biti jednak nuli, odnosno metoda će imati uticaja na vođenje, što može dovesti do promašaja cilja.

Ometanje u prisustvu korisnog signala

Uticaj korisnog signala može se uključiti na više načina, ali najbolji način je kada koristan signal i signali ometanja nisu koherentni.

Kao najinteresantniji, sa stanovišta ometanja, biće analiziran slučaj protivfaznih signala. Dva ometača se u takvoj situaciji mogu zameniti jed-

nim ekvivalentnim ometačem koji se, prema izrazu (30), nalazi van baze ometača i čija je ekvivalentna snaga:

$$P_{ek} = P_2 \cdot (1 - \beta)^2 \quad (33)$$

gde je P_2 – snaga zračenja drugog ometača.

Ako se pretpostavi da koristan signal snage P_c nije koherentan sa signalima ometanja i da dolazi iz centra baze ometača, uslov ravnoteže sistema u slučaju kvadratnog detektora sa linearnom pelengacionom karakteristikom u čitavom intervalu dobija se iz:

$$P_c \cdot \Theta_r = P_{ek} \cdot (\Theta - \Theta_r) \quad (34)$$

gde je Θ_r – rezultujući ugao ekvisignalnog pravca, a Θ – ugao ekvivalentnog ometača iz (30).

Odnosno:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{P_{ek}}{P_{ek} + P_c} \quad (35)$$

Ako je $k = \frac{P_{ek}}{P_c}$, tada se (35) može napisati u obliku:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{k}{1+k} \quad (36)$$

Iz izraza (33) može se odrediti optimalan odnos snaga ometača i korisnog signala. Ukoliko se sa k' označi odnos snage ometača 2 i korisnog signala ($k' = \frac{P_2}{P_c}$) iz (30), (33) i (35) dobija se:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{k' \cdot (1 - \beta^2)}{1 + k' \cdot (1 - \beta)^2} \quad (37)$$

odnosno:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{(1 - \beta^2)}{\frac{1}{k'} + (1 - \beta)^2} \quad (38)$$

Optimalna vrednost β određuje najveću vrednost Θ_r pri zadanom k' i može se naći diferenciranjem izraza (38) po β i izjednačavanjem sa nulom:

$$\beta^2 - \left(2 + \frac{1}{k'}\right) \cdot \beta + 1 = 0 \quad (39)$$

Odavde se dobija:

$$\beta_{opt} = 1 + \frac{1}{2 \cdot k'} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2 \cdot k'}\right)^2 - 1} \quad (40)$$

Iz izraza (37) vidi se da pri povećanju snage ometača ($k' \rightarrow \infty$) efikasnost koherentnih smetnji raste, a iz izraza (40) dobija se da u tom slučaju optimalan odnos signala ometača $\beta_{opt} \rightarrow 1$.

U slučaju signala velike amplitude (linearno detektovanih) uslov ravnoteže može se napisati u obliku:

$$\sqrt{P_c} \cdot \Theta_r = \sqrt{P_{ek}} \cdot (\Theta - \Theta_r) \quad (41)$$

Odavde je:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{\sqrt{k}}{1 + \sqrt{k}} \quad (42)$$

odnosno:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{(1 + \beta) \cdot \sqrt{k'}}{(1 - \beta) \cdot \sqrt{k'} + \sqrt{1 - \beta}} \quad (43)$$

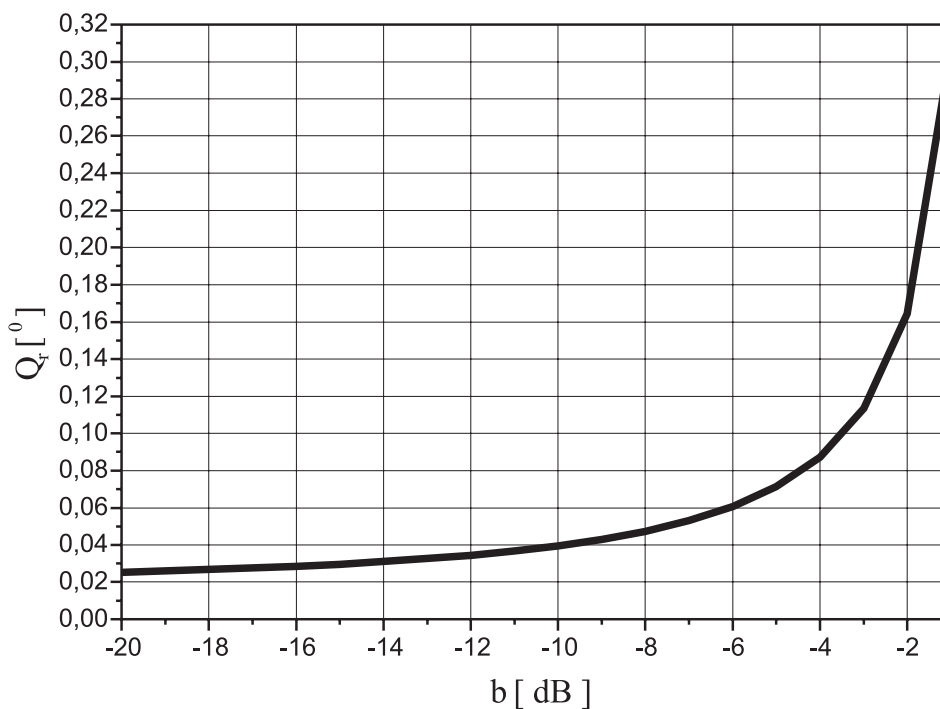
ili

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 + \beta}{1 - \beta + \frac{\sqrt{1 - \beta}}{\sqrt{k'}}} \quad (44)$$

Na osnovu izraza (44) u tabeli 2 su izračunate vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u funkciji od odnosa snaga signala ometanja. Na osnovu tabele 2 nacrtan je grafik na slici 8.

Tabela 2
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala ($k'=20$, $\Delta \Theta=0,046^\circ$)

β [dB]	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11
β	0,1	0,1122	0,1259	0,1413	0,1585	0,1778	0,1995	0,2239	0,2512	0,2818
Θ_r [°]	0,0254	0,0260	0,0268	0,0276	0,0286	0,0297	0,0310	0,0326	0,0344	0,0367
β [dB]	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
β	0,3162	0,3548	0,3981	0,4467	0,5012	0,5623	0,6309	0,7079	0,7943	0,8913
Θ_r [°]	0,0395	0,0429	0,0473	0,0530	0,0606	0,0713	0,0873	0,1135	0,1644	0,3069

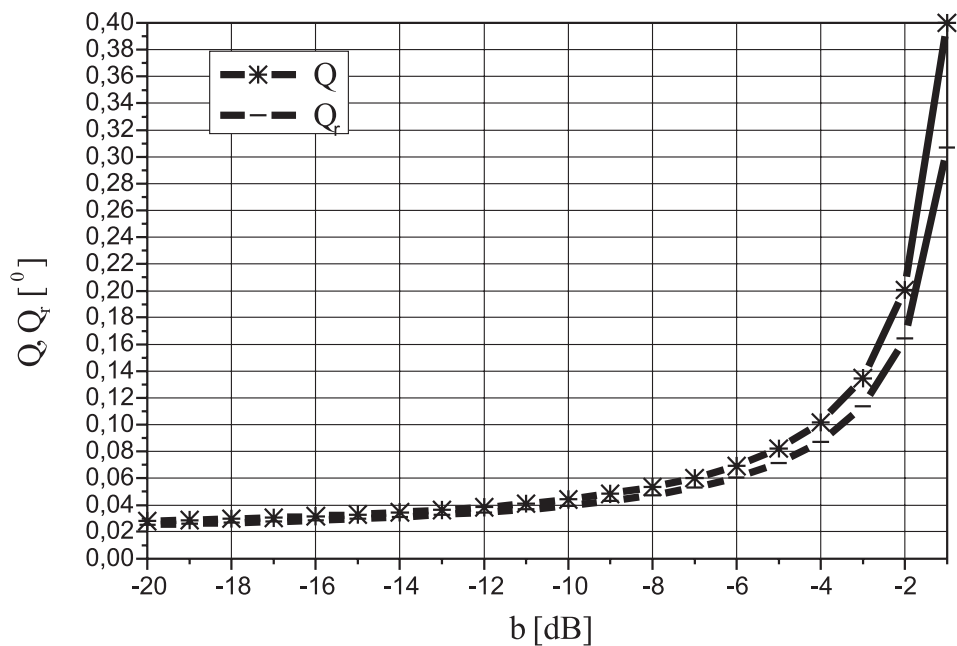


Sl. 8 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snaga ometača u prisustvu eho signala

Iz tabele 2 i sa slike 8 može se videti da je pri bilo kom odnosu snaga signala ometanja ekvisignalni pravac usmeren van baze ometača ($\Theta > \frac{\Delta \Theta}{2}$). Takođe, na slici 8 može se uočiti da se promenom odnosa

snaga signala ometanja menja položaj ekvisignalnog pravca. Ova osobina koristi se kao efikasno sredstvo za borbu protiv sistema sa metodom navođenja proporcionalnim približavanjem.

Na slici 9 date su uporedne vrednosti ugla ekvisignalnog pravca za slučajeve kada je eho signal prisutan i kada ga nema.



Sl. 9 – Ugao ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala i bez njega

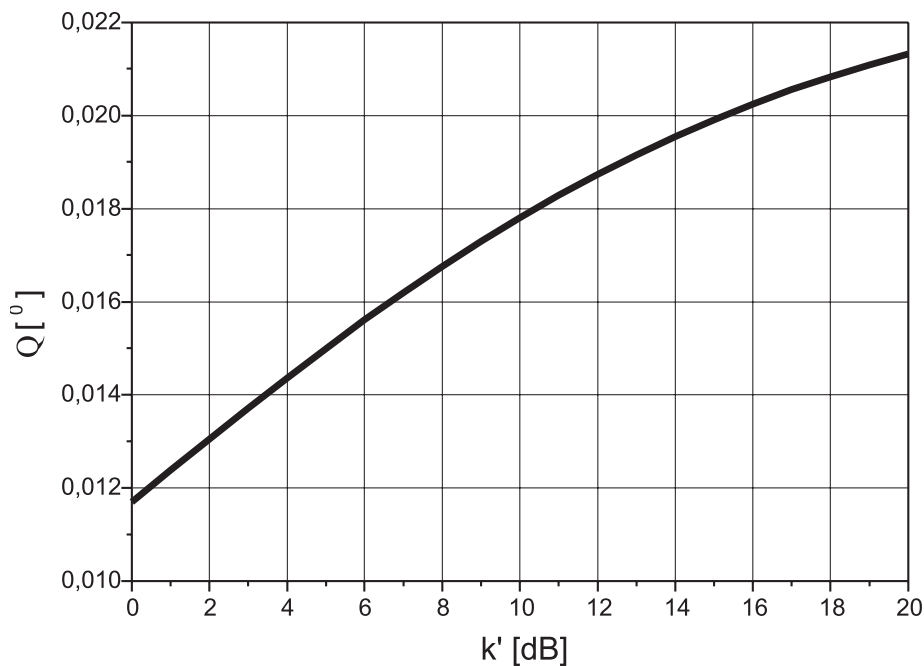
Sa slike 9 može se videti da za velike odnose snaga signala ometanja nije bitno da li je eho signal prisutan ili ne (krive se gotovo poklapaju), dok se za manje odnose snaga signala ($\beta > -5$) može primetiti veći nagib krive kada nema eho signala, što navodi na zaključak da će i efekat ometanja biti veći.

Ako se posmatra uticaj jačine snage signala ometanja u odnosu na koristan signal na osnovu izraza (44) dobijaju se vrednosti date u tabeli 3.

Tabela 3
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala ($\beta = -20$, $\Delta \Theta = 0,046^\circ$)

k' [dB]	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
k'	100	79,43	63,09	50,12	39,81	31,62	25,12	19,95	15,85	12,59
Θ_r [°]	0,0254	0,0251	0,0248	0,0245	0,0241	0,0237	0,0232	0,0227	0,0222	0,0217
k' [dB]	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
k'	10	7,94	6,31	5,01	3,98	3,16	2,51	1,99	1,58	1,26
Θ_r [°]	0,0217	0,0211	0,0205	0,0198	0,0191	0,0184	0,0176	0,0169	0,0161	0,0153

Na osnovu podataka iz tabele 3 nacrtan je grafik na slici 10. Sa slike se vidi da u prisustvu eho signala vrednost ugla ekvisignalnog pravca zavisi od snage signala ometanja. Što je signal ometanja jači u odnosu na eho signal, to je greška u određivanju položaja cilja veća.



Sl. 10 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snage ometača i eho signala

Zaključak

Urađena analiza pokazala je da se maksimalna vrednost ugaone greške ostvaruje kada je fazna razlika između signala 180° . Pošto se ugao $\Delta\theta$ pod kojim se vide antene ometača može aproksimirati sa d/r (u radijanima), dolazi se do zaključka da je greška proporcionalna rastojanju između antena ometača (d), a inverzno proporcionalna rastojanju između radara i letelice koja vrši protivelektronsko dejstvo (r). Kako je greška koja je uneta pri ometanju srazmerna uglu $\Delta\theta$ (izraz 30), to znači da je poželjno da antene koje se koriste za ometanje budu na najvećem mogućem rastojanju dokle god su obe antene unutar glavnog loba dijagrama zračenja antene radara koji se ometa. Zato se najčešće postavljaju na krajevima krila letelice. Zbog toga efikasnost ometanja raste sa smanjenjem rastojanja između ometača, što je suprotno od onoga što bi se očekivalo u sukobu radara i uređaja za ometanje. Za fiksno rastoja-

nje između antena ometača problem je da se ostvari i održi željeno rastojanje nula koje se, takođe, smanjuje sa smanjenjem rastojanja između radara i ometača, jer su i zahtevi faznog praćenja, takođe, redukovani.

Ukoliko je odnos snaga ometača konstantan, metodom ometanja „Cross eye“, bez prisustva eho signala, uneće se greška u određivanju položaja cilja koja je veća od ugla pod kojim se vide antene ometača. Međutim, s obzirom na jednačinu proporcionalnog navođenja, izraz (5), u kojoj navođenje zavisi od brzine obrtanja linije cilja, na kraju vođenja, bez obzira na to što je uneta greška ometanja, raketa će ipak biti u mogućnosti da pogodi cilj. Ukoliko se odnos snaga signala ometanja menja, odnosno ukoliko se vrši amplitudna modulacija signala ometanja, doći će i do promene vrednosti ugla Θ , što znači da izvod neće biti jednak nuli, odnosno ometanje će imati uticaja na vođenje.

Ukoliko se metoda ometanja „Cross eye“ primeni u prisustvu eho signala, pri bilo kom odnosu snaga signala ometanja, ekvisignalni pravac biće usmeren van baze ometača $\left(\Theta > \frac{\Delta\Theta}{2} \right)$. Promenom odnosa snaga signala

ometanja menja se položaj ekvisignalnog pravca, što znači da će amplitudna modulacija signala ometanja imati isti efekat kao i kada nema eho signala,

Ukoliko se uporede efekti metode ometanja „Cross eye“ u prisustvu eho signala i bez njega, može se zaključiti da je za velike odnose snaga signala ometača manje bitno da li je eho signal prisutan ili ne, dok je za manje odnose snaga signala ($\beta > -5$) nagib krive veći kada nema eho signala, što navodi na zaključak da će i efekat ometanja biti veći.

Ukoliko se posmatra uticaj odnosa snage signala ometanja i korisnog signala može se doći do zaključka da u prisustvu eho signala vrednost određenog ugla ekvisignalnog pravca zavisi od snage signala ometanja. Što je signal ometanja jači od korisnog signala, to je greška u određivanju vrednosti ugla ekvisignalnog pravca veća.

Može se zaključiti da će se u slučaju ometanja metodom ometanja „Cross eye“ najbolji rezultati postići ukoliko se primeni amplitudna modulacija eho signala i ako je istovremeno izvršeno ometanje odvođenjem stroba daljine.

Literatura

- [1] Van Brunt, Leroy, B.: „Applied ECM Volume 1“ EW Engineering, Washington, 1980.
- [2] Gacović, Č.: „Raketni sistemi PVO u protivelektronskoj borbi“, Vojnoizdavački novinski centar, Beograd, 1988.
- [3] Tirmanić, S., Bursać, S.: „Raketni sistemi“, VIZ, Beograd, 2001.
- [4] Lothes, R. N.: „Radar Vulnerability to Jamming“, Artech House, New York, 1990.