

UDK: 621.396.96(047)=861  
COSATI: 17-09, 17-04, 16-04

# Oblak smetnji kao reprezent ometanja monoimpulsnih radara iz više tačaka u prostoru

Dr Čedomir Gacović, dipl.inž.<sup>1)</sup>

U radu se razmatra uticaj oblaka smetnji na sve vrste nišanskih linija, koje svoju funkciju zasnivaju na principima monoimpulsne radiolokacije. Data je matematičko-fizička interpretacija oblaka smetnji sa statističkim svojstvima uglovne greške pri različitim karakteristikama ometačkih tačaka oblaka smetnji. Određen je uticaj distribucije intenziteta signala ometačkih tačaka na uglovnu grešku.

Ključne riječi: nišanski radar, monoimpulсни radar, uglovna greška, oblak smetnji, ometanje, raketni sistemi, protivavionska raketa.

Korištene oznake i simboli			
RS PVO	– raketni sistem PVO,	$u, v$	– kvadraturne komponente signala ometačke tačke,
NR	– nišanski radar,	$t_1$ i $t_2$	– kašnjenje signala ometačkih tačaka 1 i 2,
RGS	– radarska glava za samonavođenje,	$\varphi$ $\varphi$	– početne faze signala ometačkih tačaka 1 i 2,
PC	– pseudocentar,	$<$	– razlika faza signala 1 i 2,
TC	– težišni centar,	$E_s$	– amplituda sumarnog signala,
EPS	– ekvisignalni pravac,	$I_s$	– faza sumarnog signala,
SPC	– sistem za selekciju pokretnih ciljeva,	$K$	– relativna greška praćenja cilja u oblaku smetnji (uglovna greška),
BSO	– brisač stalnih odraza,	$Z_0$	– odnos amplituda signala ometačkih tačaka,
ARP	– sistem za automatsku regulaciju pojačanja,	$f$ $K$	– gustina verovatnoće uglovne greške,
$K_{om}$	– koeficijent ometanja radara,	$E$ $\mathcal{K}$	– matematičko očekivanje ili srednja vrednost greške,
$y_0$ $\varphi$	– koordinatna ravan azimuta,	$f(E_s)$	– distribucije amplitude sumarnog signala,
$x_0$ $\varphi$	– koordinatna ravan mesnog ugla,	$f(E_{1,2})$	– distribucije amplitude signala ometačkih tačaka 1 i 2,
$D, H$	– uglovne dimenzije oblaka smetnji,	$f$ $<$	– fazni pomak polja,
$\varphi_{i,j,k}$ $t$	– jačina polja ometačkog signala,	$I_0 \frac{H}{2}, I_1 \frac{H}{2}$	– Beselove funkcije kompleksne varijable nultog i prvog reda,
$Z$	– frekvencija proizvoljne harmonične komponente signala,	$r$	– koeficijent korelacije,
$V_{i,j,k}$	– intenzitet ometačkog signala,	$r_{VH}$	– koeficijent uzajamne korelacije jednoimenih komponenata sa različitim indeksima,
$r_{i,j,k}$ $W$	– koeficijent korelacije,	$P_e, P$	– parametri Studentovog zakona distribucije pri ravnomernoj distribuciji intenziteta signala ometačkih tačaka,
$r_1, r_2$	– udaljenost ometačkih tačaka 1 i 2 od nišanskog radara,	$f_r( )$	– gustina verovatnoće intenziteta signala ometačkih tačaka,
$l$	– udaljenost između ometačkih tačaka 1 i 2,		
$q$	– ugao nagiba parnog cilja u odnosu na radar,		
$E$ $\times$	– matematičko očekivanje, odnosno statističko usrednjavanje po skupu ometačkih tačaka unutar oblaka smetnji,		

<sup>1)</sup> Vojna akademija VJ, 11000 Beograd, Veljka Lukića Kurjaka 33

$f(0)$	– delta funkcija,
Ne	– efektivna dimenzija oblaka smetnji,
m	– rastojanje između izraženih ometačkih tačaka.

### Korišćeni indeksi:

i, j, k	– indeksi ometačkih tačaka u pravcu ose x, y, z,
1, 2	– indeksi koji se odnose na ometačke tačke 1 i 2,
s	– indeks koji se odnosi na sumarni signal.

### Pojam i fizička interpretacija oblaka smetnji

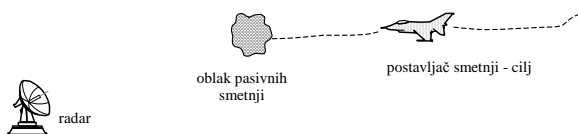
OŠTI matematičko-fizički model kojim se može opisati ponašanje monoimpulsnog nišanja u uslovima ometanja mora omogućavati analizu situacije kada se ometanje vrši iz jedne, dve ili više tačaka u prostoru. Model oblaka staniol listića može da odgovara postavljenom zahtevu. Tvrdnja je zasnovana prvenstveno na osnovnim definicijama radarskog cilja: jediničnog, grupnog i raspodeljenog.

Monoimpulsni nišanski radar je veoma teško ometati iz jedne tačke u prostoru. Potrebne su dve ili više tačaka sinhronizovanih tako da pomeraju nišansku liniju radara od stvarnog cilja. Time se izazivaju greške u praćenju cilja, odnosno u vođenju rakete na cilj.

Prema definiciji [1, 2] pasivne smetnje stvaraju se refleksijom elektromagnetne energije od različitih objekata ili promenom uslova njenog prostiranja. Pri tome nas posebno zanimaju namerno stvorene pasivne smetnje, i to lažni ciljevi u obliku mamaca, pošto su oni i namenjeni za povećanje greške u praćenju cilja nišanskim radarom, sve do prekida automatskog praćenja.

Pasivne smetnje u obliku staniol listića (chaff) reprezentativno su sredstvo za stvaranje pasivnih smetnji – uglovni reflektori, sočiva, retranslacione antenske rešetke, naravno, svaki sa svojim specifičnostima. Mogu se veoma uspešno koristiti u kombinaciji s aktivnim elektronskim ometanjem, kada nastaje tzv. kombinovano ometanje (npr. jamming chaff[3]).

Poznato je nekoliko vrsta kombinovanog ometanja. Na sl.1 prikazan je slučaj kada se pasivni reflektori lansiraju ispred postavljača smetnji-cilja prema radaru čiju zonu treba da savlada. Pri tome je važno da se na radarskom pokazivaču pasivni reflektori prikazuju na većoj visini od visine postavljača smetnji-cilja, budući da se naredna pozicija postavljača smetnji-cilja u radaru može lako predvideti. Ako se reflektori lansiraju u pravo vreme, postavljač smetnji-cilj će se naći u pasivnim reflektorima pre nego što se ovi rasprše. Ukupni signal reflektovan prema radaru biće desetak puta širi od onog koji se dobija od postavljača smetnji-cilja kroz pasivne reflektore. Ako radar koristi Doplerovo praćenje, može precizno da razdvoji postavljač smetnji-cilj od reflektora s nultom brzinom ili s brzinom vetra.

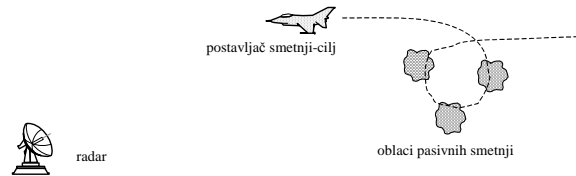


Slika 1. Ometanje odvođenjem stroba brzine u područje pasivnih smetnji

Ometačka strana zbog toga koristi drugi način ometanja

u pokušaju da spreči razdvajanje postavljača smetnji-cilja od oblaka reflektora, prvenstveno tehnikama odvođenja kapije (strobe) brzine (velocity-gate walkoff repeater) opremom instaliranom na postavljaču smetnji-cilju. Suština je u tome da se povratni signal na radaru promeni u oblast pasivnih smetnji. Tada radar otkriva i obrađuje dva cilja čije su brzine bliske nuli, s tendencijom usmerenja prema cilju s jačim signalom. Postavljač smetnji će leteti kroz oblak reflektora, ostavljajući Doplerov radar da se nosi s refleksijama od pasivnih reflektora. Ako radar uspe da se izbori s ometačkim signalima – ponovo će otkriti postavljač smetnji-cilj. Ometačka strana ponovo odvlači strobu brzine i tako naizmenično dok radar ili postavljač smetnji-cilj ne izvrši svoj zadatak, a tu je važno, ko je prvi izvršilac.

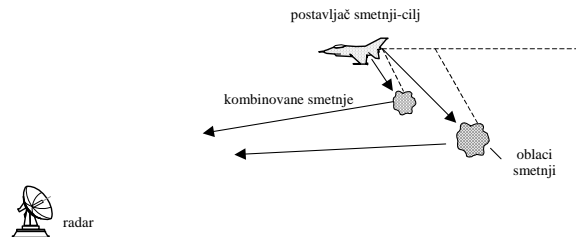
Na sl.2 prikazan je manevar postavljača smetnji-cilja u kombinaciji s primenom pasivnih reflektora, gde postavljač smetnji-cilj vrši jedan od manevara koji treba da rezultira nultom Doplerovom brzinom reflektovanih signala prema Doplerovom nišanskom radaru.



Slika 2. Ometanje prezahvatom oblaka pasivnih smetnji

Postavljač smetnji-cilj postavlja oblačice reflektora na delu putanje koja odgovara nultim Doplerovim frekvencijama. Pošto su signali tako stvorenih pasivnih smetnji znatno jači od korisnih signala postavljača smetnji-cilja, radar prelazi na praćenje pasivnih smetnji, što omogućava bezbedan ulazak postavljača smetnji u zonu raketnog sistema protivvazdušne odbrane (RS PVO). Tehnika je takođe pogodna i protiv nedoplerovih radara jer sama po sebi usložnjava proceduru automatskog praćenja nišanskim radarom.

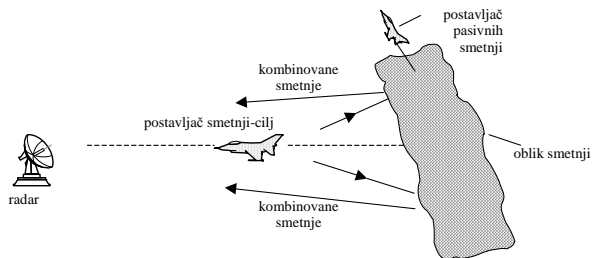
Na sl.3 prikazan je postavljač smetnji-cilj kako savladuje zonu nišanskog radara lansiranjem paketića s pasivnim reflektorima unazad, osvetljavajući ih dodatno ometačkim signalima, najčešće šumom sa centralnom frekvencijom, koja odgovara radnoj frekvenciji radara. To je već pomenuto kombinovano ometanje oblakom smetnji.



Slika 3. Ometanje oblakom smetnji

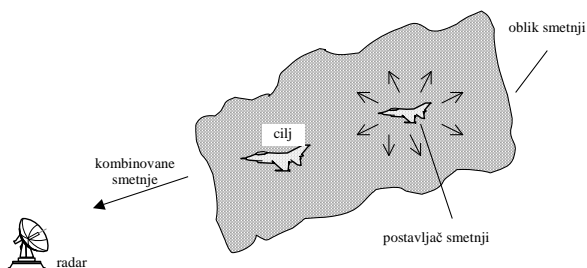
Ometački signal i oblak smetnji mogu da se pojave na radaru pod uglovima različitim od ugla prijema signala postavljača smetnji-cilja. Varijanta ove tehnike ometanja je upotreba koherentnog repetitora montiranog na postavljaču smetnji-cilju. Refleksije od oblaka smetnji imaju tada znatno veću brzinu od brzine postavljača smetnji-cilja. Ovakvo ponavljanje signala utiče i na ometanje radara po daljini, i to znatno efikasnije od drugih načina (coincident jamming and signal returns)

Sledeći način kombinovanog ometanja prikazan je na sl.4.



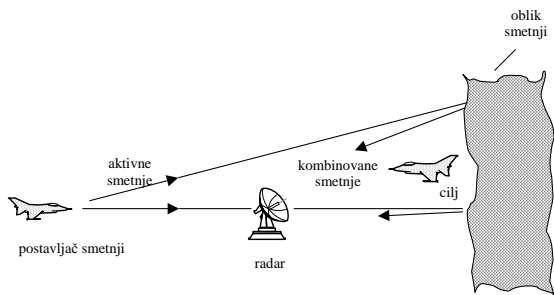
Slika 4. Kombinovano ometanje osmatračko-akvizicijskih radara i nišanskih radara u režimu detekcije cilja

Čim postavljač smetnji-cilj izađe iz koridora, operater ometačke stanice usmerava aktivne smetnje unazad, prema oblaku pasivnih smetnji. Na radarskom pokazivaču stvara se široka lepeza smetnji u smeru oblaka smetnji, čime se otežava otkrivanje cilja. Varijante ovakvog ometanja prikazane su na slikama 5 i 6. Kombinovano ometanje iz oblaka smetnji (sl.5) prikazuje cilj koji koristi oblak pasivnih smetnji i postavljač aktivnih smetnji – ometač za neopaženo približavanje RS PVO. Za razliku od standardnog stvaranja oblaka smetnji, ovde se osvetljavanje vrši iznutra. Ometač stvara aktivne modulisane odgovaračke smetnje uskog spektra koji pokriva frekventno područje CW ili impulsnog Doplerovog nišanskog radara. Ova tehnika ometanja proizvodi višestruke refleksije s različitim Doplerovim frekvencijama, čime se dosta uspešno prikriva cilj.



Slika 5. Kombinovano ometanje iz oblaka smetnji

U varijanti kombinovanog ometanja prikazanog na sl.6, ometač osvetljava oblak pasivnih smetnji iz pravca 180° u odnosu na pravac leta cilja.



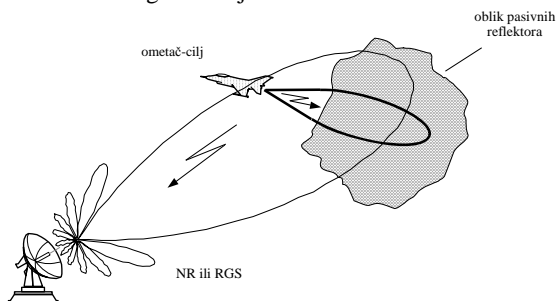
Slika 6. Kombinovano ometanje oblakom smetnji aktivnim ometanjem iza radara

Ako se pravac aktivnog ometanja kako-tako održava, kombinovane smetnje stižu u radar iz pravca cilja. Ovaj način ometanja ima prednost u tome što se radarski operateri primoravaju na pažnju i iz smera ometača kako se

ne bi desilo da propuste cilj iz tog pravca.

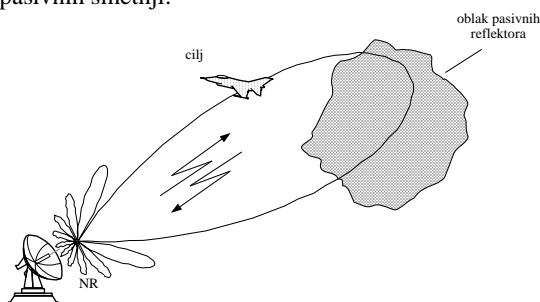
Prema tome, oblaci smetnji nastaju osvetljavanjem oblaka pasivnih reflektora aktivnim ometačkim signalima, čime ovi postaju izvori i pasivnih i aktivnih smetnji. Da ne bi došlo do zabune, na slikama 7 do 9 ilustrovani su oblaci aktivnih smetnji (sl.7), pasivnih smetnji (sl.8), i oblak smetnji (sl.9).

Slika 7 ilustruje nišanski radar (NR) ili radarsku glavu za samonavođenje (RGS) rakete koje rade u pasivnom režimu rada – samo na prijemu. Ometač osvetljava oblak pasivnih reflektora koji za NR i RGS postaje oblak aktivnih smetnji. Više od jednog aktivnog potrošnog ometača na padobranu na mestu oblaka pasivnih reflektora, može se takođe razmatrati pod ovom varijantom, kao i niz različitih načina aktivnog ometanja.



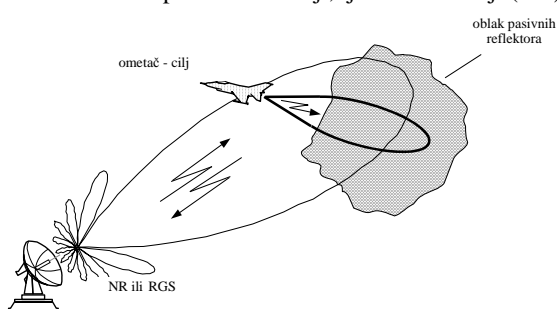
Slika 7. Nastanak oblaka aktivnih smetnji

Slika 8 ilustruje cilj koji ne osvetljava oblak pasivnih reflektora. Za nišanski radar (NR) je to klasičan oblak pasivnih smetnji.



Slika 8. Nastanak oblaka pasivnih smetnji

Istovremenom primenom dve prethodne varijante nastaje oblak aktivnih i pasivnih smetnji, tj. oblak smetnji (sl.9).



Slika 9. Nastanak oblaka smetnji

Na temelju navedenih osnovnih načina ometanja oblakom smetnji mogu se, primenom većeg broja postavljača aktivnih i pasivnih smetnji, projektovati različiti načini kombinovanog ometanja. Važnost ovog načina ometanja se vidi i iz toga što se izuzetno efikasno može upotrebiti i protiv RGS u protivavionskim raketama

ili protivradarskim raketama.

U daljem tekstu su prikazane mogućnosti primene ovako definisanog modela oblaka smetnji za analizu klasičnih metoda ometanja monoimpulsnih nišanskih radara iz dve ili više tačaka u prostoru, tj nekoherentno i koherentno ometanje, trepteće smetnje, selektivne smetnje s prebrisavanjem i obmanjivanjem mamcima. Pri tome su mogućnosti i specifičnosti ometanja iz jedne tačke u prostoru prikazane kao poseban slučaj ometanja iz više tačaka. Analiza se vrši tako što se odgovara na pitanje čime je i na koji način definisana odgovarajuća ometačka tačka oblaka smetnji, čija je jedna tačka postavljač smetnji-cilj. Odgovor se traži zavisno od izabranog modela, svojstava ometačkih tačaka i distribucije intenziteta signala ometačkih tačaka.

#### Matematičko - geometrijska definicija višetačkastog i parnog modela oblaka smetnji

Pre osvetljenja ometačkim signalima oblak smetnji za radar predstavlja običan oblak pasivnih smetnji. Zbog toga što elementi oblaka imaju slučajan prostorni položaj, odnos amplitude signala u tački radarskog prijemnika menja se po slučajnom zakonu pošto dolazi do specifičnih fluktuacija sumarnog signala, šuma oblaka smetnji, i to po uglu, daljini

smeru koordinata daljine predstavlja projekciju na osu z, tj.  $R = l \sin \tilde{q}$ , a poprečne dimenzije predstavljaju projekciju na normalu na osu z, tj.  $L = l \cos \tilde{q}$ .

Struktura oblaka smetnji se teže izražava pomoću parnog modela. U nekim granicama se to može postići pomoću različitih amplituda i faza signala ometačkih tačaka 1 i 2. Višetačkasti model pruža više mogućnosti. Može se koristiti funkcija  $F_r(x, y, z)$  u svojstvu distribucije intenziteta ometačkih tačaka unutar oblaka (tačka x, y, z na sl.10):

$$F_r(x, y, z) = \sum_k E_{i,j,k}^2 \cos^2 \theta_{i,j,k} + \sum_k E_{i,j,k}^2 \sin^2 \theta_{i,j,k} \quad (2)^a$$

gde su:

$E_{i,j,k}$  – matematičko očekivanje, odnosno statističko usrednjavanje po skupu ometačkih tačaka unutar oblaka smetnji,

u, v – kvadraturene komponente signala ometačke tačke (1), tj.:

$$\begin{aligned} u_{i,j,k} &= E_{i,j,k} \cos \theta_{i,j,k} \\ v_{i,j,k} &= E_{i,j,k} \sin \theta_{i,j,k} \end{aligned} \quad (3)$$

Parni model oblaka smetnji omogućava jedostavnije sagledavanje fizike ometanja u odnosu na višetačkasti model.

Kada bi se oblak prikazivao samo jednom ometačkom tačkom, npr. 1 ili 2 (sl.11) fazni front njegovog talasa bi bio sfernog oblika. Pošto antena radara prati smer normale na fazni front, ne bi bilo greške u praćenju. Kada su obe ometačke tačke prisutne, u tačku prijema iz različitih pravaca dolaze dva sferna talasa. Praktično gledano, ometačkoj tački 1 može odgovarati položaj cilja – postavljajuća smetnji, a tački 2 – tek odbačeni paketi pasivnih smetnji, koji se još nije razvio u oblak smetnji.

Zbog interferencije ova dva talasa, fazni front sumarnog talasa više nije sfernog oblika. Normala na njega ne pokazuje smer pravog težišnog centra parnog cilja 1-2, već neki PC, čiji položaj zavisi od odnosa amplituda i faza talasa 1 i 2. Ukoliko se ove veličine menjaju po slučajnom zakonu i, na primer zbog kretanja cilja (tačka 1) i brzine vetra (tačka 2), položaj PC će fluktuirati izazivajući fluktuacije nišanskog radara, odnosno uglovni šum. Pošto je proces kontrolisan, pomeranje ESP se može vršiti po volji – što i jeste cilj ometanja.

Pri tome dolazi i do fluktuacije amplitude sumarnog signala, tj. nastaje amplitudni šum. Merenje vremena kašnjenja sumarnog signala daje rezultat koji se u opštem slučaju razlikuje od daljina  $r_1$  i  $r_2$ . Meri se položaj PC. Fluktuacije PC po osi z tj. po daljini nazivaju se šumom daljine, koji utiče na tačnost merenja daljine i brzine cilja.

Monoimpulsni nišanski radar se od drugih nišanskih radara razlikuje samo u načinu formiranja signala greške po uglu. Sistem za automatsko praćenje cilja po daljini se ne razlikuje od drugih sistema za automatsko praćenje. Ako se doda da se u režimu otkrivanja cilja nišanski radar ne razlikuje od osmatračkog, ovaj rad dobrim delom može biti oslobođen analize šuma po daljini i amplitudnog šuma. Analiziraće se samo situacija međusobnog uticaja šumova zato što je fizička priroda njihovog nastanka zajednička.

Pretpostavimo da je veličina l (sl.11) mala u odnosu na  $r_1$  i  $r_2$ , a da su polarizacije signala 1 i 2 iste. Signal u tački 0 može se napisati kao:

$$e_s(t) = e_1(t) + e_2(t) = E_s \cos(\omega t + \phi_s) \quad (4)$$

gde su:

$$e_1(t) = E_1 \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$e_2(t) = E_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

$t_1$  i  $t_2$  – kašnjenje signala ometačkih tačaka 1 i 2

$\phi_1$  i  $\phi_2$  – početne faze signala 1 i 2.

Ako se u ometačkim tačkama 1 i 2 nalaze srodni izvori, npr. avion u tački 1 i oblak pasivnih smetnji u tački 2, tada je razlika faza signala 1 i 2:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \alpha \frac{Z}{c} \sin \alpha \quad (5)$$

Ukoliko su izvori signala različiti, npr. avion u tački 1 i oblak aktivnih smetnji u tački 2, onda se izrazu (5) dodaje fazni ugao  $\phi_1 - \phi_2$ . Kada u opštem slučaju to važi i za prvi slučaj.

Amplituda  $E_s$  i faza  $\phi_s$  sumarnog signala (4) određuje se pravilom slaganja vektora pomaknutih za ugao  $\alpha$ , tj.:

$$E_s = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha} \quad (6)$$

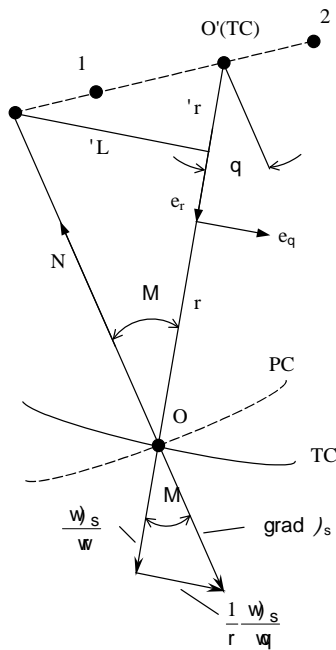
$$\phi_s = \frac{Z}{c} \frac{t_1 - t_2}{2} + \alpha \quad (7)$$

gde je:

$$\alpha = \arctg \frac{E_1 \sin \alpha_1 - \frac{Z}{c} l \sin \tilde{q} - E_2 \sin \alpha_2 - \frac{Z}{c} l \sin \tilde{q}}{E_1 \cos \alpha_1 - \frac{Z}{c} l \sin \tilde{q} - E_2 \cos \alpha_2 - \frac{Z}{c} l \sin \tilde{q}} \quad (8)$$

### Definicija relativne greške praćenja u oblaku smetnji

Izvođenje relacija pomoću kojih se određuje uglovna greška vrši se kao na sl.12. Interesantno je šta radar prima u tački 0, tako da su fazni frontovi težišnog centra (TC) i pseudocentra (PC) nacrtani kroz tačku 0. Iz tih razloga je i položaj PC znatno pomaknut iz baze dvotačkastog modela. Kasnije će biti dokazano da to može biti i praktičan slučaj. Naime, kontrolisanom distribucijom faza signala 1 i 2 može se ESP radara pomaći od očekivanog pravca 0-TC na pravac 0-PC (sl.12), kada je PC pomaknut za  $\phi$  po daljini i  $\alpha$  po pravcu u odnosu na težišni centar.



Slika 12. Geometrijska interpretacija ometanja iz dve tačke u prostoru

Informacije o greškama  $r$  i  $q$  sadržane su u izrazu (7), koji se može napisati kao funkcija polarnih koordinata  $(r, q)$  sa centrom u tački posmatranja  $O$ :

$$r, q = \frac{4S}{O} r / q \quad (9)$$

gde je  $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$ ;  $q$  – sumarni fazni ugao.

U određenom vremenskom trenutku jednačina faznog fronta sumarnog signala u tački  $O$  može se napisati kao  $J_s(r, q) = \text{const}$ . Gradijent faze se poklapa sa smerom normale na fazni front  $\nabla J_s$

$$\text{grad } J_s(r, q) = \frac{1}{r} e_r + \frac{1}{r q} e_q \quad \frac{w}{w}$$

a smer na PC pokazuje vektor obrnutog smera  $N = -\text{grad } J_s(r, q)$ . Veličine  $e_r$  i  $e_q$  su ortovi polarnih koordinata  $(r, q)$ .

Pomoću sl.12 i izraza (8 i 9) moguće je naći izraz za uglovne i linearne greške, i to na sledeći način:

$$\text{tg } M = \frac{1}{r} \frac{L}{q} \frac{w_s}{w} \frac{1}{r} \frac{1/w}{q/w} \frac{4}{w} \sim \frac{S}{r} \frac{w_s}{w} \frac{1}{q} \quad (10)$$

Ako se izvrše derivacije drugog dela izraza (7) po  $q$  i rezultat uvrsti u (10), dobija se:

$$\text{tg } M = \frac{1}{r} \frac{L}{2} \frac{\cos q}{E_2^2 - 2E_1 E_2 \cos | + E_1^2} \quad (11)$$

Sa slika 11 i 12 proizlazi da  $\text{tg } M$  predstavlja polovinu uglovnih dimenzija dvotačkastog oblaka, tj.  $D/2$  a  $L$  polovinu njegove poprečne dimenzije, tj.  $L/2$  (sl.10). Ako se uvede pojam relativne bezdimenzionalne greške u

praćenju cilja  $K$ , dobija se opšti izraz greške  $\Delta$  i dr. @

$$K = \frac{\text{tg } M}{D/2} \frac{L}{L/2} \frac{1}{1 - 2Z_0 \cos |} \frac{Z_0^2}{Z_0^2} \quad (12)$$

gde je  $Z_0 = \frac{E_1}{E_2}$ .

Sledi da relativna greška zavisi od odnosa amplitude signala ometačkih tačaka 1 i 2 i od faznog odnosa između njih. Tako npr.  $Z_0 = 0$  označava da je  $E_1 = 0$ , oblak smetnji je predstavljen samo jednom ometačkom tačkom, tačkom 2. U praksi to može biti slučaj kada cilj – postavljač smetnji osvetljava oblak smetnji 2 jakim signalima smetnji, tako da je  $E_2 \gg E_1$ . Tada je  $K = 1$ , tj. centar zračenja se poklapa sa tačkom 2. Pri  $Z_0 = 1$ ,  $E_1 = E_2$ , oblak smetnji je predstavljen ometačkom tačkom 1. Tada je  $K = 1$ , tj. centar zračenja se poklapa sa tačkom 1. Pri  $Z_0 = 1$  i  $| = 0$  proizlazi da je  $K = 0$ . U tom slučaju se PC poklapa sa geometrijskim, odnosno težišnim centrom TC. U opštem slučaju veličina  $K$  može poprimiti vrednost od

dof, tj. PC može izaći iz baze parnog cilja. Iz izraza (12) i sl.12 sledi da se, promenom  $K$  u granicama beskonačnosti, ugao  $M$  menja od  $90^\circ$  do  $0^\circ$ . Po analognoj metodologiji mogu se dobiti greške u određivanju daljine, radijalne i uglovne brzine. Fizička osnova nastanka tih grešaka je ista – fazno izobličavanje signala višetačkastog modela oblaka smetnji koji je ovde uzet kao složeni cilj u odnosu na slučaj jednotačkastog cilja. Do tih problema naročito dolazi pri praćenju cilja radarskom glavom za samonavođene rakete po brzini.

### Statistička svojstva uglovne greške pri različitim svojstvima ometačkih tačaka oblaka smetnji

Da bi se sagledali svi fizički procesi ometanja monoimpulsnog nišanskog radara pomoću parnog modela oblaka smetnji, potrebno je izvršiti analizu statističkih svojstava uglovne greške pri različitim statističkim svojstvima ometačkih tačaka 1 i 2 (sl.11). Neka su ometačke tačke 1 i 2 složeni nezavisni objekti. Složenost objekata određena je Rajljevom zakonom distribucije amplitude polja u izrazu (4) a njihov fazni pomak zakonom uniformne distribucije s funkcijom gustine verovatnoće:

$$f = \frac{E_1}{w} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{E_1^2}{2w^2}}, \quad E_1 = 0$$

$$f = \frac{E_2}{w} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{E_2^2}{2w^2}}, \quad E_2 = 0 \quad (13)$$

$$J = \frac{w}{\sqrt{2}}$$

Praktično, to je oblak smetnji sastavljen od nezavisnih, stabilnih izvora signala, oblak smetnji koji sadrži jedan stabilan i jedan složen izvor signala, kao i slučaj oblaka smetnji sastavljenog od dva statistički zavisna izvora signala.

### Oblak smetnji iz dva stabilna izvora ometačkih signala

U slučaju dva stabilna izvora signala, veličina  $Z_0$  (12) je gotovo konstantna, tako da uglovna greška nastaje samo zbog promene faze signala.

Funkcija gustine verovatnoće uglovne greške  $f(K)$  koja je određena izrazom (12) se računa uz pretpostavke da je  $Z_0 = \text{const} < 1$ , a  $f \sim \frac{1}{K^2}$ ,  $0 < K < 2$ .

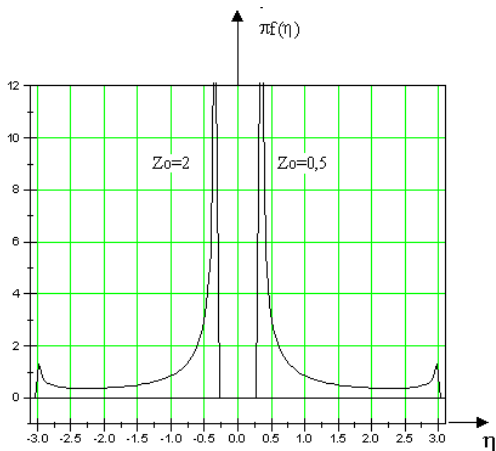
Dobija se tražena funkcija gustine verovatnoće uglovne greške [8]:

$$f(K) = \frac{1}{S K \sqrt{\frac{1-Z_0}{1+Z_0}} K \sqrt{\frac{1+Z_0}{1-Z_0}}} \quad (14)$$

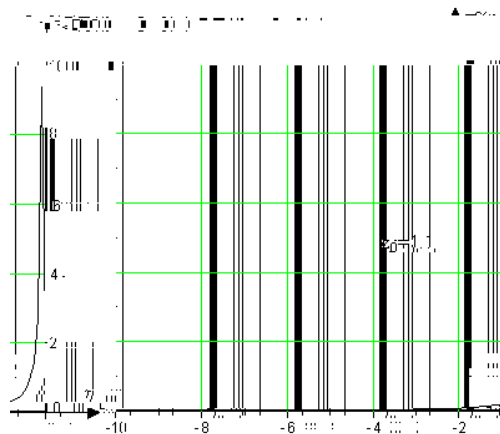
Pri tome je  $\frac{1}{1-Z_0} K \frac{1}{1+Z_0}$

Analiza granica promene veličine  $K$  pokazuje da u svim slučajevima, osim pri  $Z_0 = 1$ , ta veličina ima konačne vrednosti. Područje promene  $K$  je utoliko šire ukoliko je manja razlika između ometačkih tačaka 1 i 2. Na sl.13 dati su grafici funkcije (14) za vrednosti  $Z_0 = \frac{1}{2}$  i  $Z_0 = 2$ , kao predstavnici slučaja  $Z_0 < 1$  i  $Z_0 > 1$ .

Proizlazi da distribucija uglovne greške nije simetrična funkcija. Gustina verovatnoće u oblasti male vrednosti uglovne greške je veća, što se poklapa s fizičkom predstavom procesa. Oblast definisanja funkcije (14) za  $Z_0 = 2$  je od  $-3$  do  $-\frac{1}{3}$ . U tom slučaju funkcija (14), ovako kako je napisana, bila bi negativna. Zbog toga je nacrtan grafik za  $|K|$ .



Slika 13. Funkcija gustine verovatnoće uglovne greške  $K$  u slučaju dva stabilna izvora signala



Slika 14. Funkcija gustine verovatnoće uglovne greške u slučaju dva stabilna izvora signala pri  $Z_0 = 1,1$

Takođe se uočava približavanje funkcije y-osi sa približavanjem  $Z_0$  jedinici. Na sl.14 nacrtan je grafik funkcije pri  $Z_0 = 1,1$ .

Matematičko očekivanje, odnosno srednja vrednost greške  $E(K) = 1$ , što znači da će se srednji položaj PC oblaka smetnji poklopiti s položajem ometačke tačke koja šalje jači signal, nezavisno od  $Z_0$  ( $Z_0 < 1$ ). Ekvisignalni pravac antene monoimpulsnog nišanskog radara će se poklopiti s „jačim” ciljem.

Srednji položaj PC pri  $Z_0 > 1$  takođe se poklapa s položajem ometačke tačke koja šalje jači signal. Do toga dolazi pri  $E(K) = 1$ .

Od posebnog interesa je slučaj  $Z_0 = 1$ , kada ometačke tačke 1 i 2 šalju iste signale. Iz (12) sledi da je u tom slučaju  $K = 0$  za sve vrednosti  $\eta$  osim za  $\eta = S$ . Međutim, amplituda sumarnog signala (6) u tom slučaju je nula ( $E_s = 0$ ). Proizlazi da će se pri  $Z_0 = 1$  položaj PC poklopiti s geometrijskim, odnosno težišnim centrom oblaka smetnji TC (tačka 0, sl.12). Svejedno, takav položaj je malo verovatan zbog toga što je malo verovatan slučaj da ometačke tačke šalju potpuno iste signale, čak i kada bi se preduzele posebne mere programiranog upravljanja signalima ometačkih tačaka.

Interesantno je uporediti distribucije uglovne greške za slučaj dve složene ometačke tačke i slučaj dve stabilne ometačke tačke (sl.13). Proizlazi da se PC u prvom slučaju poklapa s najverovatnijim TC, jer se ESP zaustavlja negde oko sredine razmaka između tačaka 1 i 2, a u drugom s najmanje verovatnim TC. Osim toga, zavisnost srednje vrednosti  $K$  u prvom slučaju se lagano menja s odnosom amplituda polja 1 i 2, a u drugom dolazi do nagle promene pri izjednačavanju amplituda.

Sve je ovde slučajnog karaktera pa i pomenute amplitude polja. Zakon distribucije amplitude sumarnog signala manje je interesantan za uglovni kanal monoimpulsnog nišanskog radara, pa se ovde neće razmatrati.

### Oblak smetnji s jednim složenim i jednim stabilnim izvorom ometačkih signala

Pretpostavimo da se u tački 1 (sl.11) nalazi složeni izvor signala koji u tački 0 stvara polje sa Rejljevom distribucijom amplituda  $f(E_1)$  (13). U tački 2 se nalazi stabilan izvor signala koji u tački 0 stvara polje konstantne amplitude  $E_2 = \text{const}$ . Fazni pomak polja  $f(\lambda)$  je određen

funkcijom ravnomerne gustine verovatnoće (13). Transformacijom varijabli dobija se:

$$f(Z_0) = 2n^2 Z_0 e^{-n^2 Z_0^2}, \quad Z_0 \geq 0 \quad (15)$$

gde je:

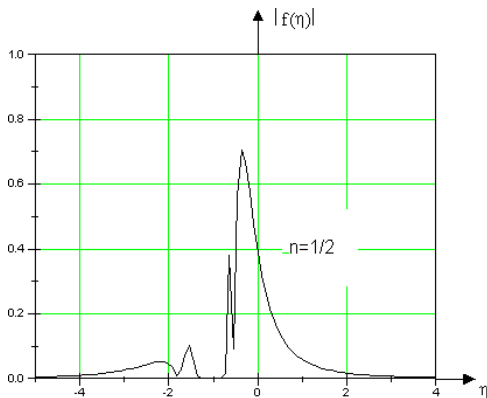
$$n = \frac{E_2}{\sqrt{2} \sigma} \quad (16)$$

Funkcija gustine verovatnoće uglovne greške u ovom slučaju je [8]:

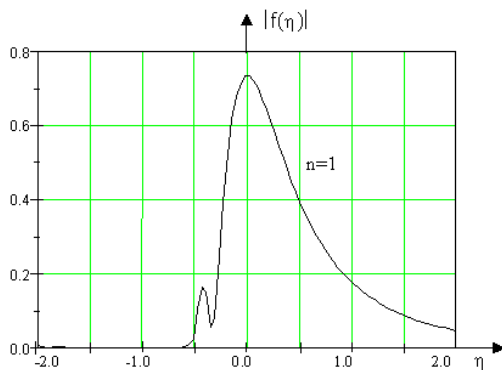
$$f(\eta) = K \frac{2}{1} \frac{n^2}{K^2} e^{-n^2 \frac{H}{2}} I_0 \left( \frac{H}{2} \right) I_1 \left( \frac{H}{2} \right) \quad (17)$$

gde su:  $I_0$  i  $I_1$  – Beselove funkcije kompleksne varijable nultog i prvog reda.

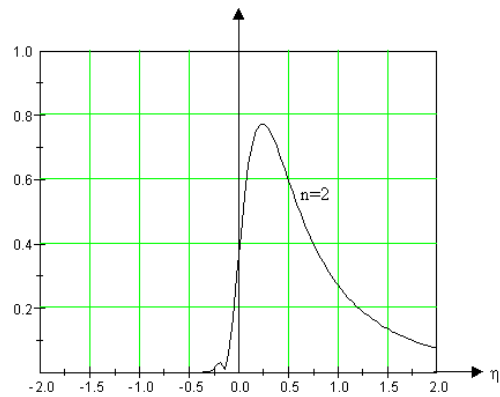
Nacrtani su grafici apsolutnih vrednosti funkcije gustine verovatnoće  $f(\eta)$  izračunati po formuli (17) za tipične vrednosti  $n = 1$  i  $n = 1/2$  sl.15,  $n = 1$  i  $n = 2$  sl.16 i  $n = 1$  i  $n = 2$  sl.17. Karakteristično je da se najverovatniji položaj PC parnog cilja poklapa s njegovim težišnim (geometrijskim) centrom, tj.  $\eta = 0$  samo pri  $n=1$  što se dobija pri jednakim signalima iz ometačkih tačaka 1 i 2. U ostalim slučajevima, zbog izražene asimetrije distribucije (17), srednji položaj PC se ne poklapa s najverovatnijim TC.



Slika 15. Funkcija gustine verovatnoće u slučaju jednog složenog i jednog stabilnog izvora signala pri  $n = 1/2$ , dobijena prema izrazu (17)



Slika 16. Funkcija gustine verovatnoće u slučaju jednog složenog i jednog stabilnog izvora signala pri  $n = 1$



Slika 17. Funkcija gustine verovatnoće u slučaju jednog složenog i jednog stabilnog izvora signala pri  $n = 2$

Matematičko očekivanje uglovne greške u datom slučaju jednostavnije je naći neposrednim usrednjavanjem (12), tj.:

$$E > \int_0^{\pi} \int_{s_1}^s \frac{1}{2Z_0 \cos \theta} f(Z_0) K d\theta dZ_0 \quad (18)$$

što dovodi do:

$$E = K \int_0^{\pi} \frac{1}{2 \cos \theta} e^{-n^2 \frac{H}{2}} d\theta \quad (19)$$

jer su  $Z_0$  i  $\theta$  nezavisne veličine, tako da je  $\int_0^{\pi} f(Z_0) dZ_0 = 1$

U slučaju da su signal ometačkih tačaka 1 i 2 jednaki, tj.  $n = 1$ , iz (19) sledi da je  $E = 0,26$ . Matematičko očekivanje postaje nula, tj.  $E = 0$  pri  $n = 0,84$ , i to govori o asimetriji distribucije  $f(\eta)$ .

Razmatrani slučaj parnog cilja ima veliku praktičnu vrednost. Ovde je složenom ometačkom tačkom prikazan oblak smetnji a stabilnom ometačkom tačkom cilj-postavljač smetnji. Svejedno je koji od objekata predstavlja tačku 1 a koji tačku 2. Pitanje je samo znaka signala greške po uglu, tj. smer pomaka ekvisignalnog pravca antene radara od stvarnog cilja. U ovom slučaju je prikazana varijanta ispaljivanja paketa dipola ispred cilja koji se prati nišanskim radarom (sl.1). Naravno, metoda je kombinovana s manevrom koji cilj-postavljač smetnji preuzima kratko nakon ispaljivanja paketa i iskorišćavanja efekata (sl.2).

Daleko češće se javlja situacija kada cilj-postavljač smetnji baca pakete iza sebe (sl.3).

Oblak smetnji s dva stabilna međusobno zavisna izvora ometačkih tačaka (sl.3)



kompletnom dijazonu promena od - f do f. Pri r = 0 distribucija prelazi u običnu Gausovu, što odgovara fizičkim predstavama procesa.

Matematičko očekivanje uglovne greške je:

$$E > \int_0^{\pi} f d \frac{1}{1 - 2r} \frac{J}{J} K \quad K \quad (21)$$

Ako su ometačke tačke 1 i 2 stohastički nezavisne (r = 0), u slučaju kontrolisane promene signala 1 i 2 koeficijent korelacije je r = 1, tako da je

$$? K \frac{J}{J} \quad (22)$$

Neka je npr. ometačka tačka 2 oblak smetnji a tačka 1 cilj-postavljač smetnji (sl.3). Bez obzira na stohastički karakter signala oblaka smetnji, ipak je sačuvana izvrsna korelacija s primarnim izvorom 1, tako da tvrdnja da je 0 < r < 1 odgovara praktičnoj predstavi.

### Oblak smetnji s jednim stabilnim izvorom ometačkog signala

Analiza procesa uticaja oblaka smetnji na nišanski radar pomoću parnog modela pokazala je da se dobijeni rezultati dobro uklapaju u fizičku predstavu procesa. Može se pretpostaviti da višetačkasti model neće dati znatno drugačije rezultate. Ipak, čini se da višetačkasti model potpunije odražava prirodu oblaka smetnji.

Neka je oblak smetnji sastavljen od skupa velikog broja slučajnih stohastički nezavisnih ometačkih tačaka koje popunjavaju određeni prostor (sl.10). Pri tome se, prepoznavanja radi uzima, da su u slučaju oblaka aktivnih smetnji ometačke tačke primarni radijatori, a u slučaju oblaka pasivnih smetnji – pasivni radijatori. Fizički gledano ovo nema smisla jer su u oba slučaja to aktivni radijatori. Prijemniku nišanskog radara je svejedno na koji način su stvoreni signali koji ga ometaju jer, da bi oni mogli proći kroz prijemnik, moraju imati tačno definisane karakteristike. Ipak, podela omogućava proširivanje analize na oblak smetnji sastavljen od većeg ili manjeg broja aktivnih ometača, pa i potrošnih, koji su po strukturi primarni radijatori (izvori).

Sprovođenje analize direktnom primenom višetačkastog modela veoma je složeno. Stoga se to vrši u dve etape. Najpre se dobijaju potrebne relacije za linearni model, koji je poseban slučaj modifikacije višetačkastog modela oblaka smetnji u jednoj ravni, a potom se rezultati proširuju na kompletnu zapreminu oblaka. Osim izbegavanja glomaznog matematičkog aparata, ovakav pristup nalazi opravdanje i u tome što linearni model omogućava jasnije sagledavanje fizičkih procesa.

Geometrija linearnog modela oblaka smetnji može da se prikaže slikom 11, na kojoj su između tačka 1 i 2 interpolisane slučajne, stohastički nezavisne ometačke tačke. Naime, ovde vredi pretpostavka da je udaljenost l između tačaka 1 i 2 mala u odnosu na udaljenost od nišanskog radara (r). Tako se dolazi do funkcije gustine verovatnoće uglovne greške:

f K

$$\frac{P 1 r_{VH}^2}{2 1 2r_{VH} P K^2 P^{\frac{3}{2}} K} e^{n^2 \frac{S}{2} 1 s b \frac{S}{2} s l \frac{S}{2} \frac{n r_{VH}^2}{1 r_{VH}^2} 4 b \frac{S}{2} l_1 \frac{S}{2} \dots} \quad (23)$$

gde su  $I_0 \frac{S}{2}; I_1 \frac{S}{2}$  – Beselove funkcije kompleksnog argumenta nultog i prvog reda.

$$s \frac{1}{1 - 2r_{VH}} \frac{P K}{P K^2 P^{\frac{3}{2}} K} n^2; n \frac{E_s}{\sqrt{2} V_H}; P \frac{V_H}{V}$$

$r_{VH}$  - je koeficijent uzajamne korelacije jednoimenih komponenta s različitim indeksima.

Izraz (23) određuje distribuciju uglovne greške oblaka smetnji proizvoljne konfiguracije s bilo kojom distribucijom jačine signala slučajnih ometačkih tačaka u razmatranom pravcu i omogućava dobijanje niza specijalnih, posebnih slučajeva.

Tako, npr. ako se u izraz (23) postavi  $r_{VH} = 0$ , tj. pri dijagonalnoj korelacionoj matrici, dobija se distribucija uglovne greške simetričnog oblaka smetnji:

$$f K \frac{P}{2 1 P^2 K} e^{S \frac{S}{2} 1 s b \frac{S}{2} s l \frac{S}{2} \dots} \quad (24)$$

gde je  $S = n^2 / 1 P K$

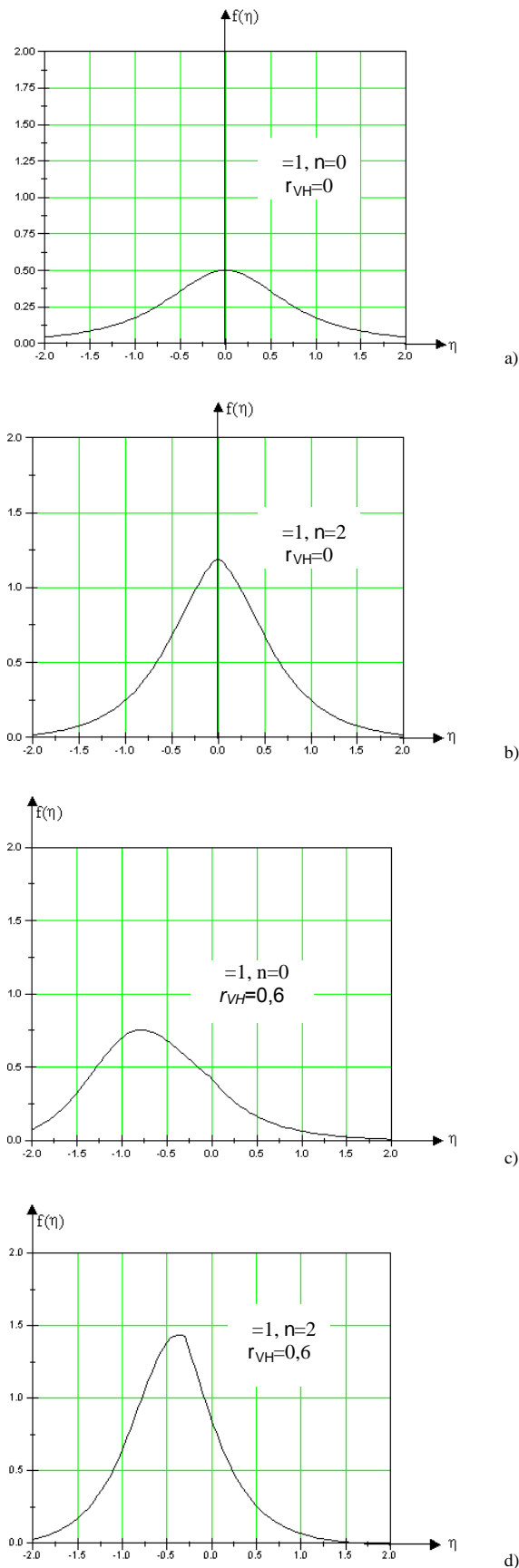
Isto tako, ako se u izraz (23) postavi  $E_s = 0$ , dobija se distribucija uglovne greške u odnosu na proizvoljni centar koordinatnog sistema za nesimetrični oblak smetnji koji u svom sastavu nema stabilnu ometačku tačku.

$$f K \frac{P 1 r_{VH}^2}{2 1 2r_{VH} P K^2 P^{\frac{3}{2}} K} \quad (25)$$

Ili, ako se u izraz (25) postavi  $r_{HV} = 0$ , dolazi se do izraza koji određuje distribuciju uglovne greške u odnosu na statistički centar oblaka smetnji.

Grafici funkcija gustine verovatnoće (23) dati su na slici 18 za različite parametre  $\mu, n$  i  $r_{VH}$ .

Uočava se da se, sa rastom jačine signala stabilne ometačke tačke, distribucija uglovne greške sužava. U graničnom slučaju, pri  $n \rightarrow \infty$ , distribucija uglovne greške teži ka  $\delta$ -funkciji. Asimetrija distribucije jačine signala slučajnih ometačkih tačaka ( $r_{HV} > 0$ ) dovodi do pomaka matematičkog očekivanja i modalne vrednosti procesa od izabranog centra oblaka smetnji. Pomak je u stranu koja zavisi od znaka koeficijenta korelacije  $r_{VH}$  i povećava se sa smanjenjem jačine signala stabilne ometačke tačke – signala predajnika aktivnih smetnji s postavljača smetnji.



Slika 18. Funkcija gustine verovatnoće uglovne greške u oblaku smetnji s jednom stabilnom ometačkom tačkom

### Uticaj distribucije intenziteta signala ometačkih tačaka na uglovnu grešku

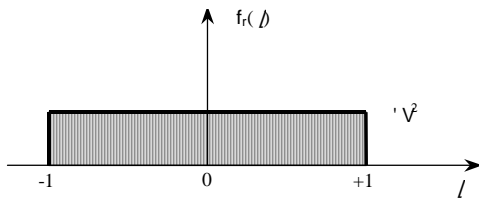
Fizički model ometanja oblakom smetnji relativno se lako može postaviti upoređenjem s klasičnim ometanjem monoimpulsnog nišanskog radara. Daleko je komplikovanije pronaći odgovarajući matematički model za svaki konkretan slučaj ometanja oblakom. Postavljač pasivnih smetnji je postavio oblak pasivnih smetnji. On je u početku relativno kompaktan i relativno malih dimenzija. Nakon nekog vremena, zbog slučajnog karaktera smera i jačine vetra, u zavisnosti od slojeva vazdušnog prostora, u bilo kojoj koordinati gledano prostorni razmeštaj elementarnih dipola u svakom trenutku je slučajna veličina. Ako se takav oblak osvetljava aktivnim smetnjama sa postavljača aktivnih smetnji – slučajnost procesa u celini je očigledna. Koliko i kakvih će ometačkih tačaka biti u oblaku zavisi i od karakteristika postavljača aktivnih smetnji, kao što su intenzitet signala, karakteristike dijagrama zračenja antene postavljača smetnji u pravcu oblaka i u pravcu radara, brzina slojeva oblaka koji utiču prvenstveno na detektibilnost signala oblaka, preko koeficijenta ometanja radara  $K_{om}$  i  $\sigma_{d}$ . Zbog toga je potrebno definisati nekoliko karakterističnih distribucija intenziteta signala ometačkih tačaka koje bi bile reprezentivne nekih konkretnih situacija, ma koliko kratko ili dugo one postojale. Može se postaviti pitanje kakve su statističke karakteristike uglovne greške u zavisnosti od oblika i složenosti oblaka smetnji.

Iz dosadašnjeg izlaganja vidi se da se oblik i složenost oblaka smetnji može definisati gustinom verovatnoće intenziteta signala ometačkih tačaka, tj. funkcijom  $f_r(x, y, z)$ , koja se može svesti na funkciju  $f_r(\rho)$ . Karakteristične funkcije  $f_r(\rho)$  date su na slikama 19,21,23,25 i 27, bez pretenzije da je to sve.

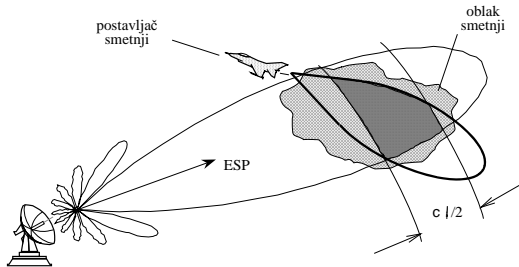
Dimenzije oblaka su uzete kao  $2N$  u razmatranom pravcu. Ostali uslovi će biti navedeni za svaki konkretan slučaj.

### Oblak smetnji s uniformnom distribucijom intenziteta signala ometačkih tačaka

Kompaktan oblak smetnji, bez izraženih ometačkih tačaka, nastaje odmah nakon razvoja paketa dipola. Postavljač smetnji usmerava glavnu lepezu dijagrama zračenja prema oblaku pasivnih smetnji, koji je još dovoljno mali pa kompletan ulazi u snop. Istovremeno se pretpostavlja da su bočne lepeze antene ometača u pravcu radara dovoljno male, tako da se njihov signal može zanemariti. Doprinos na signal koji postavljač smetnji stvara svojom radarskom površinom je zanemarljiv. Postavljač smetnji je "utopljen" u oblak smetnji, tj. predstavlja jednu od ometačkih tačaka oblaka. Ovaj model može da se koristi i u vremenskom intervalu kada je postavljač aktivnih smetnji isključen, kada je oblak smetnji – oblak pasivnih smetnji. Ovde se takva situacija neće razmatrati zbog toga što današnji sistemi selekcije pokretnih ciljeva (SPC) i brisači stalnih odraza (BSO) uspešno rešavaju problem pasivnih smetnji. Na sl.19 dat je grafički primer ovog modela distribucije.



Slika 19. Uniformna distribucija jačine signala ometačkih tačaka



Slika 20. Scenario ometanja: nišanski radar s idealnom ili 'odličnom' antenom

Funkcija gustine verovatnoće intenziteta signala je:

$$f_r(l) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{V} \cdot \delta(l) \quad (26)$$

Za funkciju (26) [8] dobija se  $K_e = 2N \cdot V^2$ ;  $E = K_e \cdot 0$ ;  $P = \sqrt{3}$ . Verovatnoća izlaska PC oblaka van njegovih dimenzija u zadatom pravcu, što znači da je  $\theta = 1$ , iznosi  $P = |K_e| \cdot 1 \cdot 0,15$  (sl.18a).

Da bi se moglo izvršiti poređenje različitih distribucija  $f_r(l)$ , uvodi se pojam efektivne dimenzije oblaka smetnji u razmatranom pravcu. To se može učiniti zahvaljujući činjenici da se distribucije uglovne greške pri različitim strukturama oblaka smetnji određuje jednim istim zakonom distribucije – Studentovim zakonom, ali s različitim vrednostima parametra  $N_e$ .

Pod efektivnom dimenzijom oblaka  $N_e$  podrazumevaće se takva dimenzija hipotetičkog oblaka, koji u razmatranom pravcu ima ravnomernu distribuciju intenziteta ometačkih tačaka pri kojoj se distribucija  $f_r(\Delta)$  poklapa sa odgovarajućom distribucijom za analizirani oblak dimenzije  $N$ . Prema tome, odnos efektivne i stvarne dimenzije oblaka može se izraziti odnosom parametara Studentovog zakona, tj.:

$$K_e = \frac{N_e}{N} \cdot \frac{P_e}{P} \quad (27)$$

gde su  $e_i$  – vrednosti parametara Studentovog zakon distribucije pri ravnomernoj distribuciji intenziteta signala ometačkih tačaka  $f_r(l)$  i konkretne analizirane distribucije.

U ovom primeru je  $K_e = \frac{e_i}{P_e} \cdot 1P$

### Oblak smetnji s uniformnom distribucijom intenziteta signala ometačkih tačaka i jednom izrazito snažnom slučajnom ometačkom tačkom

Oblak smetnji se polako širi i izlazi iz rezolucione ćelije postavljača aktivnih smetnji. Deo oblaka koji postavljač smetnji osvetljava glavnom lepezom šalje izrazito jači signal u pravcu nišanskog radara od ostalog dela u kome se smatra da su intenziteti signala ometačkih tačaka uniformno distribuirani (sl.21).

Slika 21. Ravnomerna distribucija jačine signala s jednom izraženom ometačkom tačkom

Uniformnost zakona distribucije van izražene ometačke tačke proizilazi iz karakteristika antene nišanskog radara. Radar, naime, ima tako loše bočne lepeze da oblak ne izlazi iz vidnog polja, a zbog uticaja ARP može se smatrati da su signali ravnomerni, nezavisno od toga da li su primljeni glavnom lepezom ili bočnim lepezama. Naravno, samo ukoliko nisu preduzete posebne konstrukcione mere zaštite tipa uglovnog strobiranja ili slično. U ovom slučaju je:

$$f_r(l) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{V} \cdot \delta(l) \quad (28)$$

gde je  $\delta(l)$  – delta funkcija  $\delta(l)$  pri  $l = 0$ . Na isti način kao u prethodnom slučaju dobija se:

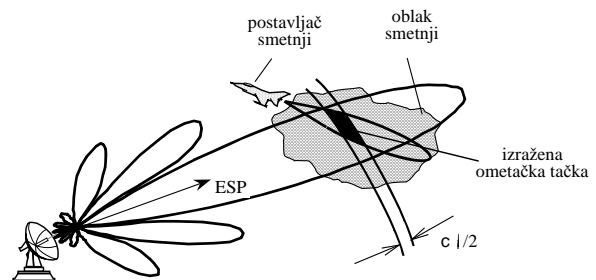
$$K_e = 2N \cdot V^2 \cdot \frac{1}{P_e}; E = K_e \cdot 0; P = \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot J$$

gde je

$$J = \frac{J_0^2 / 2N \cdot V^2}{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot K^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 3 \cdot 1 \cdot 0,15^2}}$$

Ako se uzme da je  $J = \sqrt{3}$ , dobija se:

$$P = 2\sqrt{3}, \quad P = |K_e| \cdot 1 \cdot 0,04, \quad K_e = \frac{P_e}{P} \cdot 0,5$$



Slika 22 Način ometanja – nišanski radar sa realnom ili «lošom» antenom

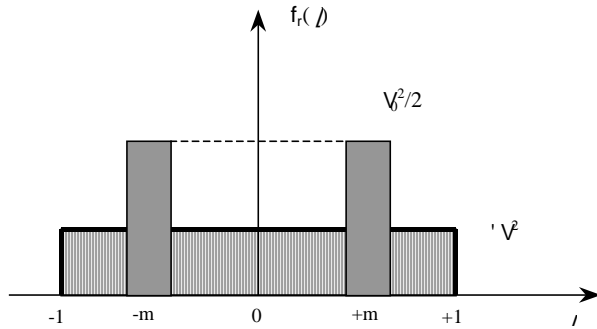
### Oblak smetnji s uniformnom distribucijom intenziteta signala ometačkih tačaka i dve izrazito snažne slučajne ometačke tačke

Neka postavljač aktivnih smetnji istovremeno osvetljava najmanje dva paketa dipola i neka su mu bočne lepeze zanemarljive. Radar će „videti” dve izrazito snažne tačke pored ostalih, koje mogu da se aproksimiraju uniformnom distribucijom. Par ometačkih tačaka može biti sastavljen od svaka dva uzastopna paketa ili od letelice – postavljača smetnji i najbližeg paketa dipola. Naravno, karakteristike signala primljenog direktno od postavljača smetnji moraju biti odgovarajuće. To znači, da je signal paketa nedovoljno jak zbog nepreciznog „gađanja” ometačem prilikom osvetljavanja, pa je uporediv sa signalom koji radar direktno dobija od ometača, ili je antena ometača dovoljno „loša” u pravcu radara, tako da osim osvetljavanja paketa osvetljava i radar.

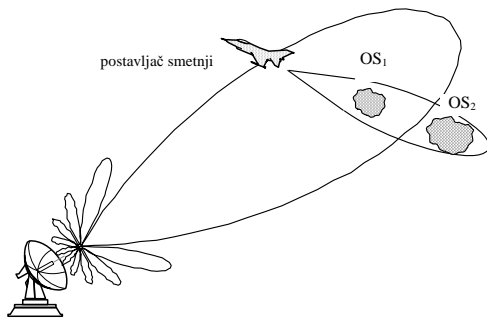
Tada se može napisati:

$$f_r = \begin{cases} \frac{V^2}{2} & |l| \leq m \\ \frac{V^2}{4} & m < |l| \leq 1 \end{cases} \quad (29)$$

gde je  $m = N_a / N$ ;  $2 N_a$  - rastojanje između izraženih ometačkih tačaka.



Slika 23. Ravnomerna distribucija intenziteta signala s dve izražene ometačke tačke



Slika 24. Način ometanja u ovoj varijanti

Za funkciju (29) dobija se:

$$E = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P} = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P \sqrt{3} \int_{-1}^1 l^2 dl} = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P \sqrt{3} \frac{2}{3}}$$

gde je:

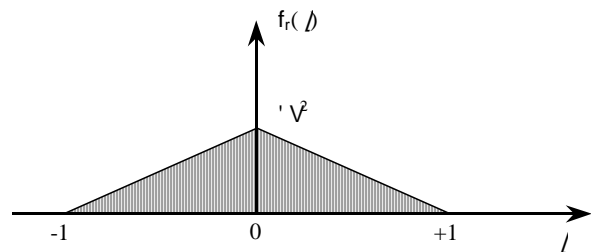
$$P = \frac{J_0^2 / 2N V^2}{\sqrt{3} \int_{-1}^1 l^2 dl} = \frac{J_0^2 / 2N V^2}{\sqrt{3} \frac{2}{3}}$$

Ako je npr.  $m = 0,5$ ;  $J = \sqrt{3}$ , onda je  $E = 1,9$ ;  $P = 0,11$ ;  $K_e = 0,9$ . U graničnom slučaju, kada se oblak smetnji svodi na dve izražene ometačke tačke na njegovim krajevima, a to je pri  $m = 0$  i  $J = 0$  dobija se  $E = 1$ ;  $P = 0,29$ ;  $K_e = \sqrt{3}$ . Efektivna dimenzija za ovakav model oblaka je za  $\sqrt{3}$  veća od stvarne dimenzije oblaka. Prema tome, pri aproksimaciji oblaka smetnji pomoću parnog modela rastojanje između tačaka 1 i 2 (sl.11) mora biti za  $\sqrt{3}$  manje od dimenzija oblaka smetnji u razmatranom pravcu.

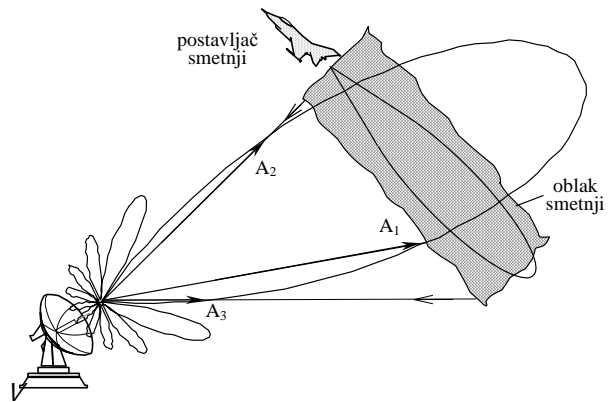
### Oblak smetnji s trouglastom distribucijom intenziteta signala ometačkih tačaka

Oblak smetnji se polako raspršava, izlazeći iz rezolucione ćelije radara. Postavljač smetnji je već dovoljno daleko, tako da njegova antena osvetljava kompletan oblak smetnji. Tada ometačke tačke oblaka, koje izlaze iz granica dijagrama zračenja antene radara, šalju sve manje i manje signala prema radaru po meri udaljevanja od centra oblaka (sl.26). Takav oblak smetnji može se aproksimirati trouglastom distribucijom intenziteta signala ometačkih tačaka (sl.25), koja se može napisati kao:

$$f_r(l) = \begin{cases} V^2(1-l) & 0 \leq l < 1 \\ V^2 l & -1 \leq l < 0 \end{cases} \quad (30)$$



Slika 25. Trouglaste distribucije jačina signala ometačkih tačaka



Slika 26. Način ometanja ( $A_3 < A_2 < A_1$  itd.)

Iz (30) se dobija:

$$E = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P} = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P \sqrt{3} \int_{-1}^1 l^2 dl} = \frac{2N \int_{-1}^1 f_r(l) dl}{P \sqrt{3} \frac{2}{3}}$$

### Oblak smetnji sa snažnijim ometačkim tačkama u centralnom delu

Uzajamni položaj oblaka smetnji, postavljača smetnji i nišanskog radara, karakteristike osvetljavanja i karakteristike prijema su činioci koji mogu dovesti do toga da kompletan centralni deo šalje veću energiju ka radaru. Situacija je slična onoj sa sl.21, ali je ovde veći broj izraženih ometačkih tačaka u centralnom delu oblaka. Distribucija intenziteta signala ometačkih tačaka prikazana je na sl. 27, a matematički se može napisati kao:



# Nuages de brouillage représentant le brouillage des radars monopulses provenant de plusieurs points dans l'espace

L'article traite l'influence des nuages de brouillage sur toutes les sortes des lignes de visée basées sur le principe de la radiolocalisation monopulse. L'interprétation mathématique et physique des nuages est donnée avec les caractéristiques statistiques de l'erreur angulaire pour les caractéristiques différentes des points de brouillage dans les nuages de brouillage. L'effet de la distribution de l'intensité des signaux de points de brouillage est déterminé par rapport à l'erreur angulaire.

Mots-clés radar de visée, radar monopulse, erreur angulaire, nuage de brouillage, brouillage, systèmes de missiles, missile antiaérien.