

Goran Dimitrijević,
potporučnik, dipl. inž.
VP 4795 Beograd

Dr Bojan Zrnić,
major, dipl. inž.
Vojna akademija VJ,
Odsek logistike,
Beograd

RAČUNARSKI MODEL ZA ANALIZU RADA OSMATRAČKOG RADARA

UDC: 621.396.96 : 519.688

Rezime:

U ovom radu predstavljen je računarski model za analizu rada osmatračkog radara. Osnovne karakteristike programa su: interaktivnost, grafički prikaz rezultata i mogućnost uporedjenja rezultata za različite vrednosti verovatnoće lažnog alarma. Rezultati se prikazuju za ceo interval verovatnoće detekcije, za razliku od originalnog programa gde se rezultati prikazuju tabelarno za šest diskretnih vrednosti verovatnoće detekcije i samo jednu vrednost verovatnoće lažnog alarma. Programsko rešenje pruža mogućnost nadgradnje, čime bi se mogao implementirati uticaj klatera i ometača na rad osmatračkog radara.

Ključne reči: računarsko modeliranje, radar, detekcija, domet.

COMPUTER MODEL FOR THE SEARCH RADAR ANALYSIS

Summary:

In this paper a computer model for the search radar analysis is presented. The basic properties of the presented software are interactivity, graphical representation of results and possibility to compare results for different probabilities of false alarm. The results are displayed for the whole range of detection probability. The computer model is open for upgrade, for example with clutter and jammer moduli.

Key words: computer model, search radar, detection, range.

Uvod

Radari su ehlokacioni uređaji koji su našli najveću primenu u vojnim sistemima, gde se najčešće koriste za osmatranje radi detekcije i praćenja ciljeva u vazдушnom prostoru. Ukupne performanse radarskog sistema zavise od različitih faktora. Uticaje pojedinih faktora, kao i međusobne veze tih faktora, teško je analitički iskazati i modelovati. Da bi se taj proces olakšao, razvijena je, i u ovom radu prikazana, programska podrška za analizu rada klasičnog osmatračkog radara impulsnog tipa.

Programsko rešenje sadrži proračun faktora detekcije radarskog signala i dometa radara prema metodi koju je predložio Barton u radu [1]. Implementacija je izvršena u programskom jeziku MATLAB. Verifikacija programskog rešenja je izvršena upoređenjem dobijenih rezultata sa rezultatima datim u [1, 2].

Radarska transmisiona formula

Najznačajnija veličina za analizu karakteristika radara je snaga eho signala

u prijemnom kanalu radara. Za objašnjenje ovog parametra treba započeti analizu od transmisiona formule koja daje vezu predajne i prijemne snage jednog radio-komunikacionog sistema [3]:

$$\Gamma = \frac{P_1}{4\pi R^2} G_1 \quad (1)$$

gde je:

Γ – gustina snage koju stvara predajnik na mestu prijema,

P_1 – snaga predajnika,

R – rastojanje između prijemnika i predajnika,

G_1 (G_2) – dobitak antene predajnika (prijemnika).

Gustina snage Γ dolazi na antenu prijemnika, a snaga koju prima prijemnik određena je iznosom:

$$P_2 = \Gamma A_{ef} = \frac{P_1 G_1 A_{ef}}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

gde je A_{ef} – efektivna površina antene.

Ako se iskoristi poznata veza između dobitka antene i njene efektivne površine ($A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$) prethodnu jednačinu

može se napisati u obliku koji daje odnos predajne i prijemne snage u sistemu:

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (3)$$

U slučaju radarskog prijemnika analiza je veoma slična. Na mestu prijemnika sada je cilj od kojeg će se reflektovati određeni deo energije radarskog signala. Ako se pretpostavi da radar emituje sig-

nal snage P i da je dobitak antene G , tada će gustina snage koju stvara radar na mestu cilja (primarno polje) koji se nalazi na rastojanju R biti:

$$\Gamma' = \frac{P}{4\pi R^2} G \quad (4)$$

Radarski cilj može se smatrati antenom čija je efektivna površina A_{efs} . Snaga P_s koju, usled dejstva indukovanih struja i opterećenja, zrači cilj određena je sa A_{efs} i Γ' . Uz pretpostavku da na njemu nema gubitaka, cilj će na mestu radara stvoriti gustinu snage Γ'' (sekundarno polje) koja iznosi:

$$\Gamma'' = \frac{P_s G_s}{4\pi R^2} = \frac{\Gamma' A_{efs} G_s}{4\pi R^2} = \frac{\Gamma' \sigma}{4\pi R^2} \quad (5)$$

Proizvod A_{efs} i G_s ima dimenziju površine i naziva se efektivna refleksna površina cilja, a označava se sa σ . Na osnovu izvedenih relacija moguće je odrediti snagu echo signala u prijemnom kanalu radara:

$$S = \Gamma'' A_{ef} = \Gamma' \frac{\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P G A_{ef} \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (6)$$

Gornji izraz poznat je kao radarska transmisiona formula ili radarska jednačina [3]. Minimalna snaga korisnog signala S_{min} koja se na osnovu određenih kriterijuma može detektovati u smeši signal/šum, određuje maksimalni domet radara:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}}} \quad (7)$$

Detekcija radarskih signala

Pri osmatranju prostora radarom mogu nastati dve nepoznate, ali međusobno isključive situacije. Prva situacija karakteriše se postojanjem cilja u posmatranoj rezolucionalnoj ćeliji radara, dok se druga definiše odsustvom cilja u rezolucionalnoj ćeliji radara. Algoritam odlučivanja u najprostijem obliku sastojao bi se od komparacije izlaznog napona prijemnika u sa unapred definisanim fiksnim naponom U_θ koji predstavlja prag odlučivanja. U slučaju da je izlazni napon prijemnika veći od postavljenog praga, donosi se odluka o postojanju cilja u posmatranoj rezolucionalnoj ćeliji radara, u suprotnom, donosi se odluka o odsutnosti cilja u rezolucionalnoj ćeliji radara [3]. Upoređivanje napona prijemnika sa pragom odlučivanja predstavlja eksperiment sa dva moguća slučajna ishoda.

Ako se pretpostavi da se cilj nalazi u rezolucionalnoj ćeliji, u procesu odlučivanja mogu nastati već pomenuta dva ishoda. Verovatnoća prvog događaja, kada je $u > U_\theta$, naziva se verovatnoća pravilne detekcije i označava se sa P_d . Verovatnoća drugog događaja, kada je $u < U_\theta$, naziva se verovatnoća propusta cilja i označava se sa P_{pc} . Ako se u rezolucionalnoj ćeliji ne nalazi cilj, takođe nastaju dva ishoda odlučivanja: prvi, kada je $u > U_\theta$, što implicira pogrešnu odluku i, drugi, kada je $u < U_\theta$, što dovodi do pravilne odluke. Verovatnoća prvog događaja naziva se verovatnoća lažnog alarma i obeležava se sa P_{la} , a verovatnoća drugog naziva se verovatnoća pravilnog otkrivanja cilja i obeležava se sa P_{pn} . Za navedene verovatnoće važe sledeće matematičke relacije:

$$\begin{aligned} P_d + P_{pc} &= 1 \\ P_{la} + P_{pn} &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Na osnovu ovih relacija može se zaključiti da je dovoljno posmatrati po jednu verovatnoću iz obe grupe, a to su obično verovatnoća detekcije i verovatnoća lažnog alarma.

Šum u prijemnom kanalu radara, kao i smeša signal/šum mogu se predstaviti gausovskim slučajnim procesom. Predstavljanje ovih signala vrši se funkcijom gustine verovatnoće, koja za slučaj čistog šuma glasi:

$$W_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}U_{efn}} e^{-\frac{u^2}{2U_{efn}^2}} \quad (9)$$

a u slučaju smeše signal/šum:

$$W_{n+s} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}U_{efn}} e^{-\frac{(u-A)^2}{2U_{efn}^2}} \quad (10)$$

gde je A amplituda korisnog signala. Nakon ovih definicija moguće je definisati verovatnoće detekcije i lažnog alarma kao:

$$\begin{aligned} P_d &= \int_0^\infty W_{n+s}(u) du \\ P_{la} &= \int_0^\infty W_n(u) du \end{aligned} \quad (11)$$

Modeli radarskih ciljeva

Detekcija radarskih signala zavisi od odnosa koristan signal/šum. Na taj odnos utiču šumovi cilja koji se mogu na-

zvati fluktuacioni šumovi. Nivo šuma koji potiče od cilja zavisi od njegovog oblika, parametara kretanja i aspektnog ugla. Da bi se opisali šumovi fluktuacije moraju se modelirati radarski ciljevi, što se odnosi na opisivanje njihove efektivne refleksne površine. Dakle, treba pronaći odgovarajuću funkciju gustine verovatnoće koja opisuje zavisnost σ od aspektnog ugla, koji je u opštem slučaju stohastička veličina, jer se pravac nailaska cilja ne zna unapred. Na osnovu eksperimentalnih rezultata došlo se do funkcija gustine verovatnoće realnih radarskih ciljeva. Utvrđeno je da se σ realnih ciljeva može opisati χ^2 raspedelom sa $2k$ stepeni slobode [3]:

$$W(\sigma) = \frac{1}{(k-1)! \bar{\sigma}} \left(\frac{k\sigma}{\bar{\sigma}} \right)^{k-1} e^{-\frac{k\sigma}{\bar{\sigma}}} \quad (12)$$

Za analizu radarskih sistema koriste se dve funkcije iz ove familije, koje se dobijaju za $k=1$ i $k=2$. U prvom slučaju dobija se eksponencijalna raspodela:

$$W(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}} \quad (13)$$

a u drugom:

$$W(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}^2} e^{-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}} \quad (14)$$

Ovakve modele prvi je predložio Sverling (Swerling). Prva funkcija koristi se za opis cilja sa većim brojem subreflektora i bez dominantnog reflektora, a druga za opis cilja sa jasno izraženim dominantnim reflektorom i nizom manjih subreflektora. U pogledu korelisanosti

eho impulsa u paketu, Sverling je uveo dva granična slučaja: model sa sporim ili korelisanim fluktuacijama i model sa brzim ili nekorelisanim fluktuacijama. Na osnovu funkcija kojima se opisuje σ cilja i vrste korelacije, Sverling je izradio četiri statistička modela, koji se u literaturi označavaju sa: SW1, SW2, SW3 i SW4. Da bi se obuhvatili svi slučajevi, ovim modelima dodaje se i idealizovani nefluktuirajući model nepokretnog cilja pravilne konfiguracije, koji je opisao Markum (Marcum), i koji se označava sa M.

Detekcija pojedinačnog radarskog impulsa

Od svakog radarskog cilja, u procesu osmatranja, dolazi do refleksije paketa impulsa koji će se detektovati u radarskom prijemniku. Broj reflektovanih impulsa određuje se na osnovu izraza:

$$n = PRF \frac{\varphi_0}{\Omega_a} \quad (15)$$

gde je:

n – broj reflektovanih impulsa,

PRF – frekvencija ponavljanja impulsa,

φ_0 – širina snopa zračenja,

Ω_a – brzina rotiranja antene (skeniranja).

Za proračun faktora detekcije paketa radarskih impulsa neophodno je poznavati faktor detekcije pojedinačnog radarskog impulsa, jer se prema aproksimativnoj metodi, koju je predložio Barton, problem detekcije paketa sa proizvoljnim brojem impulsa može svesti na problem detekcije pojedinačnog impulsa od nefluktuirajućeg cilja [1].

U opštem slučaju može se napisati da je:

$$P_d = F(q, P_{la}) \quad (16)$$

gde je q – potrebiti odnos signal/šum u prijemniku radara.

U praksi je obično potrebno odrediti potreban odnos signal/šum za unapred date verovatnoće detekcije i lažnog alarma, što se može postići rešavanjem prethodne jednačine po q , i tada se dobija $q = q(P_d, P_{la})$.

Minimalna snaga korisnog signala u prijemniku radara prikazana je sledećim izrazom:

$$S_{min} = kT_s B q(P_d, P_{la}) \quad (17)$$

gde je:

k – Bolcmanova konstanta,
 T_s – temperatura šuma sistema,
 B – frekvencijski opseg.

Ako se izraz (17) uvrsti u radarsku jednačinu dobija se:

$$R = \sqrt[4]{\frac{PG^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kT_s B q(P_d, P_{la})}} = R(\sigma, P_d, P_{la}) \quad (18)$$

Na osnovu jednačine (18) može se zaključiti da domet radara zavisi od efektivne refleksne površine cilja i verovatnoća detekcije i lažnog alarma koje definišu potrebiti odnos signal/šum koji se naziva faktor detekcije (detectability factor) i označava sa D . Da bi se naglasio model cilja i ustanovilo da li se radi o detekciji pojedinačnog impulsa ili paketa impulsa, uvode se dopunske oznake. Na primer, za nefluktuirajući cilj i pojedinačni impuls oznaka bi bila: $D_0(I)$; dok

bi za SW1 i paket impulsa bilo: $D_1(n)$. Analogno, uvode se oznake i za ostale ciljeve, indeks označava model cilja, a oznaka u zagradi vrstu detekcije.

Detekcija radarskog signala može se obaviti na jedan od sledeća tri načina [3]:

- sinhronim detektorom,
- 1 – Q kvazisinhronim detektorom,
- diodnim detektorom.

Sinhrona detekcija zahteva tačno poznavanje početne faze eho signala i ima samo teorijski značaj, jer radarski eho signali najčešće imaju slučajnu fazu. Međutim, ovaj postupak detekcije zahteva najmanji odnos signal/šum za date verovatnoće P_d i P_{la} , pa se koristi kao referentni okvir za upoređenje ostalih metoda detekcije. Ako se uporede rezultati proračuna faktora detekcije kada se koristi sinhroni detektor sa rezultatima kada se koristi detektor obvojnice (bilo kvazisinhroni, bilo diodni detektor) može se doći do podataka o gubitku detektora (detector loss) koji se izražava empirijskom formulom [1]:

$$C_x(I) \equiv \frac{D(I)}{D_c(I)} = \frac{D_0(I) + 2,3}{D_0(I)} \quad (19)$$

gde je:

$C_x(I)$ – gubitak detektora pri detekciji jednog impulsa,
 $D_0(I)$ – faktor detekcije za jedan impuls od cilja tipa M pri korišćenju detektora obvojnice,
 $D_c(I)$ – faktor detekcije za jedan impuls od cilja tipa M kada se koristi sinhroni detektor.

Vrednosti C_x realno su jako male, tako da se može izvršiti aproksimacija i umesto korišćenja komplikovane Rajsove i Rejljeve raspodele funkcije gustine

verovatnoće pri proračunu faktora detekcije detektora obvojnice može se koristiti Gausova raspodela. Opravdanje za ovu aproksimaciju nalazi se, kao što je već rečeno, u vrednostima C_x koje iznose npr. za $P_d = 0,9$; $P_{la} = 10^{-6}$ vrednost je $C_x(l) = 0,4$ dB ili za $P_d = 0,5$; $P_{la} = 10^{-4}$ vrednost je $C_x(l) = 0,8$ dB.

Ako se usvoji navedena aproksimacija, dobija se da su verovatnoće detekcije i lažnog alarma određene sledećim izrazima:

$$P_d = \int_{U_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{efn}^2}} e^{-\frac{(u-A)^2}{2U_{efn}^2}} du \quad (20)$$

$$P_{la} = \int_{U_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{efn}^2}} e^{-\frac{u^2}{2U_{efn}^2}} du \quad (21)$$

Ovi integrali nemaju analitičko rešenje, ali se njihove vrednosti mogu odrediti na osnovu tablične funkcije $\Phi(x)$ koja glasi:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (22)$$

tako da su sada P_d i P_{la} :

$$P_{la} = \Phi\left(\frac{U_0}{U_{efn}}\right) \quad (23)$$

$$P_d = \Phi\left(\frac{U_0 - A}{U_{efn}}\right) = \Phi\left(\frac{U_0}{U_{efn}} - \sqrt{2q}\right)$$

Ako se iz prethodnih jednačina izračuna odnos signal/šum dobiće se:

$$q = \frac{1}{2} \left(\Phi^{-1}(P_d) - \Phi^{-1}(P_{la}) \right)^2 = q(P_d, P_{la}) \quad (24)$$

gde je $\Phi^{-1}(x)$ inverzna funkcija od $\Phi(x)$. Funkcija $\Phi(x)$ u direktnoj je vezi sa funkcijom koja je u matematici poznata pod nazivom funkcija greške i koja se označava sa *erf*. Ta veza određena je sledećim relacijama, čijim se prostim kombinovanjem dolazi do potrebnog izraza za odnos signal/šum koji će biti korišćen u programskom rešenju:

$$\begin{aligned} erf(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = Y \\ erfc(x) &= 1 - erf(x) = 1 - Y \\ \Phi(x) &= \frac{1}{2} erfc\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \\ \Phi^{-1}(x) &= \sqrt{2} erfc^{-1}(2x) \\ erf^{-1}(Y) &= erfc^{-1}(1 - Y) \end{aligned} \quad (25)$$

Izraz za odnos signal/šum je:

$$\begin{aligned} q &= D_c(l) = \\ &= \left[\sqrt{2} erfc^{-1}(2P_{la}) - \sqrt{2} erfc^{-1}(P_d) \right]^2 = \\ &= \left[\sqrt{2} erf^{-1}(1 - 2P_{la}) - \sqrt{2} erf^{-1}(1 - 2P_d) \right]^2 \end{aligned} \quad (26)$$

gde je:

$erfc^{-1}$ – inverzna funkcija komplementarne funkcije greške,

erf^{-1} – inverzna funkcija funkcije greške.

Izračunati odnos signal/šum predstavlja faktor detekcije za jedan koherentni impuls (impuls poznate faze), odnosno kada se koristi sinhroni detektor. Ako se želi odrediti faktor detekcije kada se koristi detektor obvojnice, mora se koristiti Nortova (North) aproksimacija:

$$D_0(1) = \left[\sqrt{\frac{1}{P_{la}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi^{-1}(P_d)} \right]^2 - \frac{1}{2} = \left[\sqrt{\frac{1}{P_{la}} - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_d)} \right]^2 - \frac{1}{2} \quad (27)$$

Proračunavanjem faktora detekcije za nekoherentni impuls (impuls nepoznate faze) završava se proračun u slučaju detekcije pojedinačnog radarskog impulsa za nefluktuirajući cilj.

Kada se proračun vrši za fluktuirajući cilj (model SW1), faktor detekcije egzaktno je prikazan izrazom:

$$D_1(1) = \frac{\ln P_{la}}{\ln P_d} - 1 \quad (28)$$

Upoređujući $D_0(1)$ i $D_1(1)$ dolazi se do pojma gubitaka fluktuacije koji su definisani izrazom:

$$L_f(1) = \frac{D_1(1)}{D_0(1)} \quad (29)$$

Detekcija paketa radarskih impulsa

Pri obasjavanju cilja radarskim snopom dolazi do refleksije paketa radarskih impulsa čiji je broj određen jednačinom (15). Pogodnom obradom paketa primljenih impulsa može se postići povećanje faktora detekcije, tj. može se ostvariti ista verovatnoća detekcije sa manjim odnosom signal/šum. Obrada primljenih impulsa naziva se integracija i može biti: koherentna, nekoherentna (video) i binarna (digitalna).

Pri idealnoj koherentnoj integraciji odnos signal/šum za paket impulsa prikazan je izrazom:

$$D_c(n) = \frac{D_c(1)}{n} \quad (30)$$

Može se primetiti da je u ovom slučaju potreban odnos signal/šum n puta manji, što praktično znači da postoji procesno pojačanje, koje je jednako broju impulsa. Takođe, nema gubitaka integracije.

Nekoherentna integracija češće se primenjuje u konvencionalnim radarskim sistemima. U tom slučaju, proračun faktora detekcije odvija se kroz određeni postupak. Proces započinje proračunom gubitaka detektora prema izlazu:

$$C_x = \frac{D_0(n) + 2,3}{D_0(n)} \quad (31)$$

Zatim se računa gubitak integracije

$$L_i = \frac{nD_0(n)}{D_0(1)} = \frac{C_x(n)}{C_x(1)} \quad (32)$$

na osnovu sledećeg izraza:

$$L_i = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{9,2n}{D_c(1)}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{9,2}{D_c(1)}}} \quad (33)$$

Ako je u pitanju Markumov model cilja, faktor detekcije prikazan je izrazom:

$$D_0(n) = \frac{D_0(1)L_f(n)}{n} \quad (34)$$

U slučaju Sverlingovih modela ciljeva potrebno je odrediti gubitke fluktuacije koji su za model SW1 dati izrazom:

$$10 \log L_f(n) = (1 + 0,031 \log n) 10 \log L_f(1) \quad (35)$$

Gubici fluktuacije u opštem slučaju zavise od izbora modela cilja i od broja nezavisnih impulsa n_e u paketu od n impulsa. Određuju se na osnovu sledeće relacije:

$$L_f(n, Kn_e) = [L_f(n)]^{\frac{1}{Kn_e}} \quad (36)$$

gde je $2K$ – broj stepeni slobode određenog cilja.

Vrednosti za n_e i K prikazane su u tabeli 1.

Parametri ciljeva

Tabela 1

Model cilja	n_e	K
M	∞	∞
SW1	1	1
SW2	n	1
SW3	2	2
SW4	2n	2

Nakon izračunatog gubitka flutuacije izračunava se osnovni faktor detekcije za paket od n impulsa u kojem postoji n_e nezavisnih impulsa:

$$D_e(n, n_e) = \frac{D_0(1)L_f(n)L_f(n, Kn_e)}{n} \quad (37)$$

Time je osnovni proračun faktora detekcije završen.

Faktor detekcije najčešće se izražava u dB, tako da je:

$$D_e(n, n_e)_{dB} = D_0(1)_{dB} + L_f(n)_{dB} + \frac{1}{n_e} L_f(1)_{dB} - 10 \log n \quad (38)$$

Nakon završenog proračuna osnovnog faktora detekcije potrebno je pronaći efektivni faktor detekcije D_x . Ovaj parametar obuhvata i dodatne gubitke usled obrade signala i nesavršenosti oblika dijagrama zračenja antene. Vrednost efektivnog faktora detekcije koristi se u radarskoj jednačini za proračun dometa radara:

$$R_0 = \sqrt{\frac{P_{sr} I_{pr} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s D_x L_f}} \quad (39)$$

Efektivni faktor detekcije izračunava se na osnovu sledećeg izraza:

$$D_x = D_e(n, n_e) M L_p L_x \quad (40)$$

gde je:

M – faktor podešenosti filtra koji označava za koliko se mora povećati energija signala da bi se kompenzovalo to što se u prijemniku koristi razdešeni, a ne prilagođeni filter,

L_p – gubici zbog oblika dijagrama zračenja (zbog toga što dijagram zračenja ima oblik laticice, a ne idealni pravougaoni završetak),

L_x – ostali gubici usled obrade signala. Preko ovog parametra zbirno se zadaju ostali gubici koji nastaju u toku obrade radarskog signala.

Programsko rešenje „RADAR_SIM“

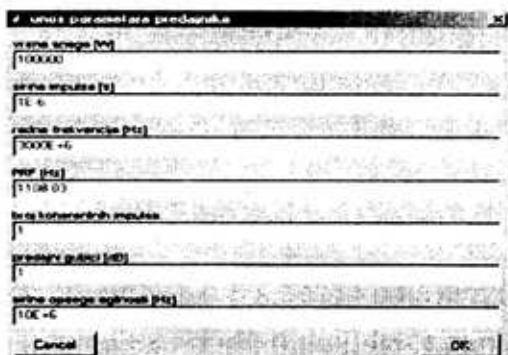
Programsko rešenje je implementirano u programskom jeziku MATLAB, i sastoji se od devet celina (modula). Glavni modul programa nazvan je „RADAR_SIM“. Svaki modul komunicira sa korisnikom preko grafičkog interfejsa. Svi podaci koji su inicijalno postavljeni na određene vrednosti odgovaraju hipotetičkom radaru razmatranom u literaturi [1]. Pokretanjem programa na ekranu se dobija glavni meni programa koji je prikazan na slici 1.

Rad programa i pojedinih modula detaljno je prikazan u literaturi [4], a u ovom radu detaljnije su opisani samo neki moduli.

Izborom opcije „PREDAJNIK“ korisnik može zadati nove parametre predajnika ili zadržati ponuđene vrednosti, a promenu vrednosti parametara obavlja putem dijaloga sa slike 2.

Kada je korisnik postavio željene parametre aktivira komandu „OK“, čime se nastavlja izvršenje programa. Na ekranu komandnog prostora ispisuju se vrednosti koje se proračunavaju na osnovu zadatih parametara predajnika. Parametri koje može uneti korisnik su:

- vršna snaga P_t [W],
- širina impulsa τ [s],



Sl. 2 – Promena vrednosti parametara

- radna frekvencija radara [Hz],
- frekvencija ponavljanja impulsa f_{PRF} [Hz],
- broj koherentnih impulsa n_c (programski se postavlja na 1 što odgovara nekoherentnoj predaji),
- predajni gubici L_r [dB], (unos se gubitak između tačke na kojoj je mereno P_t i antenskog terminala na kojem je meren dobitak antene),

- širina opsega agilnosti B_a [Hz].

Parametri koji se programski računaju i ispisuju na ekran su:

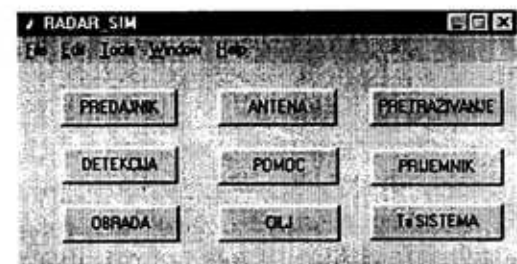
- srednja snaga P_a [W] koja se dobija iz izraza $P_a = P_t \tau f_{PRF}$
- slepa brzina V_b [m/s] računa se kao

$$V_b = f_{PRF} \frac{\lambda}{2}$$

- jednoznačni domet R_u [m] pomoću

$$\text{izraza } Ru = \frac{c}{2f_{PRF}}, \text{ gde je } c \text{ brzina svetlosti.}$$

U sledećem modulu opisana je radarska antena. Opis je izveden na uobičajen način, odnosno preko zadavanja dobitka (eng. gain), širine snopa (eng. beamwidth) i nivoa bočnih snopova (eng. sidelobe levels). Zadavanje parametara se obavlja odvojeno za azimut i za elevaciju (slika 3).



Sl. 1 – Glavni meni programa

Sl. 3 – Zadavanje parametara

Parametri prijemno-predajne antene radara koje unosi korisnik su:

- dobitak antene G [dB],
- širina snopa po azimutu θ_{Ta} [stepen] (vrednost ovog parametra biće kasnije korišćena za proračun vremena observacije t_o (observation time) i broja reflektovanih impulsa raspoloživih za integraciju),

- nivo prvog bočnog snopa po azimutu G_{sa} [dB],

- nivo dalekog bočnog snopa po azimutu G_{sf} [dB],

- nivo snopova unazad po azimutu G_b [dB],

- omski gubici antene L_{om} [dB], (ovaj parametar biće kasnije upotrebljen za proračun temperature antene).

Programski se računaju i na ekranu ispisuju sledeći parametri:

- efektivna širina snopa po azimutu θ_{Aef} [stepen] (pošto se radi o istoj anteni za prijem i predaju ova vrednost je jednaka širini snopa po azimutu, inače se računa prema izrazu:

$$\theta_{Aef} = \frac{1,4\theta_{Ta}\theta_{Ra}}{\sqrt{\theta_{Ta}^2\theta_{Ra}^2}} \quad (41)$$

gde je θ_{Ra} širina snopa po azimutu predajne antene);

– konstanta širine snopa po azimutu K_a koja se računa za dijagram zračenja zasnovan na Tejlorovoj funkciji prema izrazu:

$$K_a = 0,9 - 0,0135(G_{sa} + 15) \quad (42)$$

– širina antenskog otvora w [m] koja se računa iz izraza:

$$w = \frac{K_a\lambda}{\theta_{Ta}} \quad (43)$$

Nakon toga prelazi se na izvršenje dela programa u kojem se zadaju parametri mehanički upravljane reflektorske antene, potrebni za proračun efikasnosti zračenja antene i njene ukupne efikasnosti. Izvršavanjem ovog dela programa, parametri potrebni za dalje proračune smeštaju se u datoteku.

Sledeći modul programa je „PRE-TRAŽIVANJE“. U njemu je modelirano sektorsko skeniranje prostora po azimutu, koje se najčešće primenjuje kod osmatračkih radara. Programski se zadaju parametri potrebni za proračun vremena obasjavanja t_o , broja reflektovanih impulsa od cilja n i faktora propagacije F .

Nakon izvršenog modula „PRE-TRAŽIVANJE“ sledi modul „PRIJEMNIK“. Korisnik zadaje parametre prijemnika, od kojih zavisi faktor detekcije, odnosno kvalitet prijemnog signala. Parametri koje zadaje korisnik su:

- faktor šuma prijemnika F_n [dB],
- gubici u prijemniku L_r [dB],
- fizička temperatura prijemnika T_p [K].

Rezultat izvršenja programa jeste određivanje efektivne temperature prijemnika T_e [K], prema izrazu:

$$T_e = (F_n - 1)T_0 \quad T_0 = 290K \quad (44)$$

Nastavljanje rada sa programom izvodi se pokretanjem modula „DETEKCIJA“ u kojem je implementirana Bartonova aproksimativna metoda detekcije, objašnjena u prethodnom delu ovog teksta. U ovom modulu korisnik može zadati četiri vrednosti verovatnoće lažnog alarma, dok je verovatnoća detekcije programski određena kao vektor čije se vrednosti nalaze u opsegu od 0 do 1, tako da će krajnji rezultat biti grafički prikaz dometa radara u funkciji verovatnoće detekcije. U ovom delu programa proračunavaju se faktor detekcije za jedan koherentni impuls $D_c(l)$, faktor detekcije za jedan nekoherentni impuls od nepokretnog cilja $D_o(l)$, i gubici integracije $L_r(n)$ za slučaj detekcije paketa radarskih impulsa. Time je završen program za proračun faktora detekcije i njegovi rezultati se smeštaju u posebnu datoteku uz prethodni ispis vremena lažnog alarma t_{la} koje se računa prema izrazu:

$$t_{la} = \frac{n\tau}{P_{la}} \quad (45)$$

Parametri obrade signala unose se u modulu „OBRADA“. Podaci koje može uneti korisnik su:

- faktor podešenosti filtra M [dB],
- gubici zbog oblika dijagrama zračenja L_p [dB],
- „collapsing“ gubici L_c [dB],
- „angle straddling“ gubici L_{as} [dB],
- gubici usled zamračenja L_e [dB],
- gubici praga ili CFAR (Constant False Alarm Rate) gubici L_f [dB],
- gubici operatora L_o [dB],
- ostali gubici obrade L_{xo} [dB].

Programski se računaju ukupni gubici obrade, a podaci potrebni za prora-

čun efektivnog faktora detekcije smeštaju se u datoteku.

Nakon izvršenja potprograma „OBRADA“ sledi modul „TEMPERATURA SISTEMA“. Proračun temperature sistema neophodno je izvršiti, jer snaga šuma, a samim tim i odnos signal/šum, zavise od temperature sistema. Posle pokretanja modula na ekranu se dobija dijalog za unos parametara putanje radarskog cilja, koji je prikazan na slici 4. Unos ovih parametara potreban je zbog kasnijeg proračuna referentnog dometa radara i gubitaka u atmosferi.

Nakon unosa parametara na ekranu se dobijaju sledeći rezultati:

- referentni domet R_x [km], koji se računa prema sledećem izrazu:

$$R_x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_a t_a G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n L_i L_r}} \quad (46)$$

Pri proračunu referentnog dometa uzima se da je odnos signal/šum 12 dB i da su uslovi propagacije idealni, tj. da nema slabljenja u atmosferi;

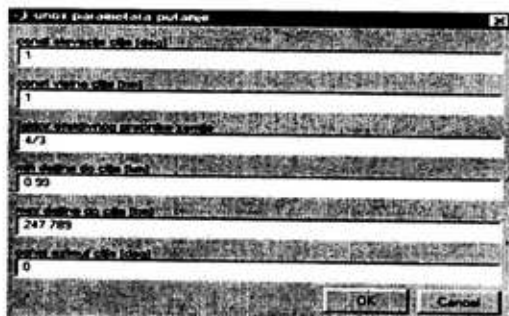
- efektivna elevacija θ_{ef} koja se određuje iz izraza:

$$\theta_{ef} = \theta_{te} + \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{\theta_{te} + 0,028} \quad (47)$$

gde je potrebno zadati uglove u radijanima,

- efektivna dužina putanje na nivou mora (sea level pathlength) koja se izračunava pomoću izraza:

$$R_a = \frac{3,0}{\sin \theta_{ef}} [km] \quad (48)$$

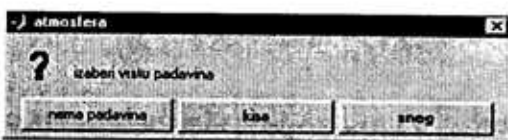


Sl. 4 – Unos parametara putanje radarskog cilja

– koeficijent slabljenja u čistoj atmosferi k_a [dB/km], čija vrednost zavisi od radarskog opsega. Karakteristične vrednosti ovog parametra prikazane su u tabeli 2. Ukoliko korisnik unese vrednost frekvencije između frekvencija naznačenih u tabeli, vrednost koeficijenta slabljenja računa se logaritamskom interpolacijom.

Nakon prikaza ovih rezultata na ekranu korisnik dobija pitanje da specificira padavine u atmosferi (slika 5).

Ukoliko korisnik izabere opciju „nema padavina“ slabljenje u atmosferi biće jednako prethodno izračunatom slabljenju u čistoj atmosferi, a ako izabere opciju „kiša“ ili „sneg“ na ekranu dobija dijalog za unos parametara padavina. Parametri koje korisnik može uneti su:



Sl. 5 – Specifikacija atmosferskih padavina

- brzina padavina r [mm/h],
- maksimalna visina padavina [km],
- minimalna daljina padavina [km],
- maksimalna daljina padavina [km].

Koeficijent slabljenja u slučaju padavina računa se prema izrazu:

$$k'_a = \frac{k_{ap}}{r} + k_a \quad (49)$$

gde je:

- k'_a – ukupno slabljenje u atmosferi,
- k_{ap} – koeficijent slabljenja za određenu vrstu padavina,
- k_a – slabljenje u čistoj atmosferi.

Sledeći korak je proračun gubitaka u atmosferi prema sledećem izrazu:

$$L_\alpha = k_a R_a \left(1 - e^{-\frac{R}{R_a}}\right) \quad (50)$$

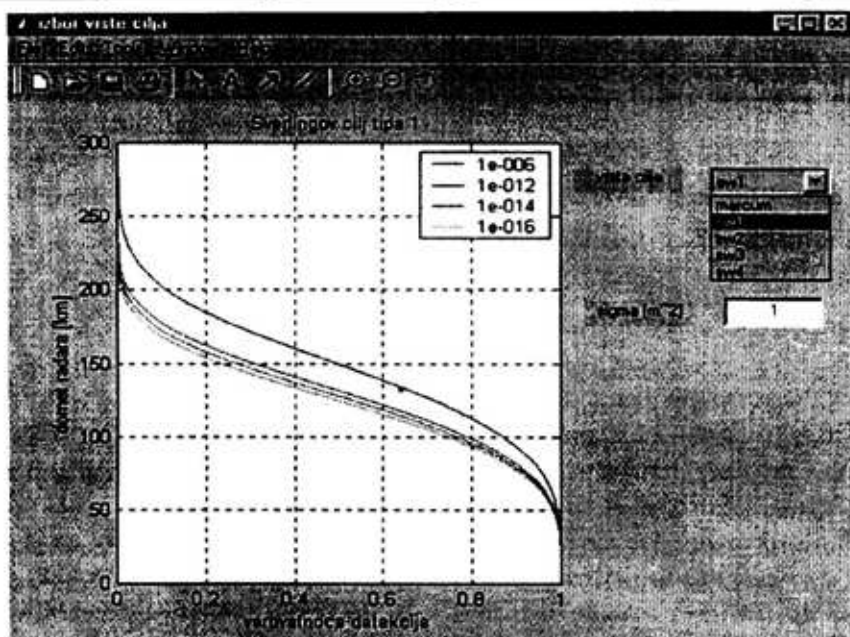
Vrednost slabljenja u atmosferi, koja će biti korišćena pri proračunu temperature neba, računa se za domet radara do 500 km i smatra se konstantnom na celom intervalu $0 \text{ km} < R < 500 \text{ km}$.

U nastavku izvršenja programa korisnik zadaje vrednost faktora galaktičkog i solarnog šuma, koji predstavlja komponentu temperature neba. Vrednost tog parametra postavljena je na $K_g = 3 \cdot 10^8$, što znači da ovi šumovi imaju normalnu vrednost. Temperatura ovih šumova računa se prema izrazu:

Koeficijenti slabljenja u atmosferi

Tabela 2

opseg	UHF	L	S	C	X	K_a	K	K_s	V	W		
f [GHz]	0,4	1,3	3	5,5	10	15	22	35	60	95	140	240
K_a [dB/km]	0,01	0,0012	0,015	0,017	0,024	0,055	0,3	0,14	35	0,8	1	15
k_{ap}/r (kiša)	0	0,0003	0,0013	0,008	0,037	0,083	0,23	0,57	1,3	2	2,3	2,2
k_{ap}/r (sneg)	0	0,0003	0,0013	0,008	0,002	0,0004	0,008	0,015	0,03	0,06	0,006	0,08



Sl. 6 - Zavisnost dometa radara od verovatnoće detekcije

$$T_g = \frac{K_g}{f^{2.5}} + T_1$$

$$(51) \quad T_a = \frac{(0,88T_a' - 254)}{L_{om}} + 290 \quad (54)$$

gde je f - frekvencija nosioca u MHz a $T_1 = 5$ K.

gde L_{om} predstavlja omske gubitke antene.

Zatim se proračunava temperatura neba koja, pored galaktičke komponente, ima i komponentu usled atmosfere T_{pa} :

Nakon toga proračunava se temperatura šuma RF komponenti T_r :

$$T_{pa} = 290 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{L_\alpha}} \right) \quad (52)$$

$$T_r = T_{rr} (L_r - 1) \quad (55)$$

Temperatura neba je:

gde je T_{rr} fizička temperatura prijemnog voda, a L_r su gubici u prijemnom vodu. Treća komponenta temperature šuma sistema već je određena u delu programa koji se odnosio na prijemnik, što je ekvivalentna temperatura prijemnika T_e . Sada se može izračunati temperatura šuma sistema prema izrazu:

$$T_a' = T_g + T_{pa} \quad (53)$$

Nastavak programa proračunava temperaturu šuma sistema, a prvi korak je proračun temperature šuma antene T_a :

$$T_s = T_a + T_r + L_r T_e \quad (56)$$

Krajnji rezultat izvršenja programa jeste grafički prikaz zavisnosti dometa radara od verovatnoće detekcije za različite vrednosti verovatnoće lažnog alarma. Do ovog rezultata dolazi se pokretanjem modula „CILJ“ sa glavnog menija, posle čega se na ekranu pojavljuje slika 6.

Izborom tipa cilja obavlja se učitavanje datoteka sa potrebnim podacima (koje su formirane u toku izvršenja prethodnog dela programa) i proračunava se osnovni faktor detekcije $D_e(n, n_e)$, efektivni faktor detekcije D_x i, konačno, domet radara. Takođe, moguće je interaktivno uneti novu vrednost efektivne refleksne površine cilja.

Zaključak

Računarski model za analizu rada osmatračkog radara sačinjen je na osnovu matematičkog modela koji je prikazan u literaturi [1]. Osnovne karakteristike programa su: interaktivnost, grafički prikaz rezultata i mogućnost upoređenja re-

zultata za različite vrednosti verovatnoće lažnog alarma. Rezultati se prikazuju za ceo interval verovatnoće detekcije, za razliku od originalnog programa gde se prikazuju tabelarno za šest diskretnih vrednosti verovatnoće detekcije i samo jednu vrednost verovatnoće lažnog alarma. Programsko rešenje pruža mogućnost nadgradnje, čime bi se mogao implementirati uticaj klatera i ometača na rad osmatračkog radara. U svakom trenutku rada sa programom moguće je izmeniti vrednost bilo kog parametra i sagledati njegov uticaj na domet radara, što nije dato kao mogućnost u originalnom programu.

Literatura:

- [1] Barton, D. K.: Modern Radar System Analysis, Artech House, Norwood, 1988.
- [2] Barton, D. K.: Modern Radar System Software, User manual, Artech House, Norwood, 1992.
- [3] Zatkalik, J.: Radiolokacija I deo, IP Nauka Beograd, 1995.
- [4] Dimitrijević, G.: Programska podrška analizi rada osmatračkog radara, Diplomski rad, Vojna akademija, Odssek logistike, Beograd, 2001.