Dr Nenad Dodić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

Prof. dr Momčilo Milinović,
dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Beograd

NOVA KONCEPCIJA UPRAVLJANJA VATROM PROTIVAVIONSKOG TOPA

UDC: 623.418.22:623.55.02

Rezime:

Nova koncepcija upravljanja vatrom protivavionskog topa zasnivala bi se na korišćenju senzora koji omogućuju automatsko merenje položaja cilja i servosistema koji omogućuju automatsko pozicioniranje oruđa. Za predviđanje položaja cilja u trenutku susreta s projektilom koristi se Tejlorov polinom u kojem figurišu parametri kretanja cilja. Njegov red zavisi od načina kretanja cilja. Parametri kretanja cilja ocenjuju se na osnovu sekvence izmerenih položaja cilja, korišćenjem različitih hipoteza o kretanju cilja i spregnutih paralelnih Kalmanovih filtera. Predloženi postupak ocenjivanja omogućuje određivanje verovatnoća postavljenih hipoteza i reda primenjenog Tejlorovog polinoma. Predložena koncepcija omogućuje autonomnu i žilavu blisku protivvazдушnu odbranu.

Ključne reči: upravljanje vatrom, protivavionski top, praćenje cilja, ocenjivanje, protivvazдушna odbrana.

NEW CONCEPT OF ANTIAIRCRAFT GUN FIRE CONTROL

Summary:

A new concept of antiaircraft gun fire control, using sensors that provide automatic target position measurement and servosystems that provide automatic positioning of weapon, is proposed. The Taylor polynomial is used to predict target position at the time of impact. Its coefficients are the parameters of target motion. Its order depends on the type of target motion. Parameters of target motion are estimated using the sequence of measured target positions, various hypotheses of target motion and interacted parallel Kalman filters. The proposed estimation procedure provides the determination of hypotheses, probabilities as well as the determination of the applied Taylor polynomial power. The proposed concept enables autonomous and resistant air defense.

Key words: fire control, antiaircraft gun, target tracking, estimation, air defense.

Uvod

Novija istorija ratova pokazuje da su vazduhoplovne snage i sredstva za napad iz vazdušnog prostora ključni činioci stratejskih i taktičkih borbenih dejstava, čijem razvoju velike sile poklanjaju najveću pažnju. Ova činjenica nameće potrebu da se sredstva i tehnika protivva-

zdušne odbrane neprestano razvijaju i usavršavaju. Zemlje koje nisu pod čvrstim okriljem moćnog vojnog saveza najčešća su meta napada agresora.

Agresija vojnih sila započinje, po pravilu, napadima iz vazdušnog prostora, a često se tim napadima i završava. Za zemlje koje mogu biti izložene ovakvoj agresiji, a koje nisu u stanju da protivniku

adekvatno uzvrate na taktičkom i strate-
gijskom nivou, vrlo je bitno da poseduju
savremena sredstva srednje i bliske pro-
tivvazdušne odbrane (PVO), sposobna
da protivničkom vazduhoplovstvu nanose
gubitke po celoj dubini branjene teritorije
i da prežive u uslovima intenzivnog elek-
tronskog izviđanja i ometanja. Jedno od
takvih sredstava je autonoman i pokretan
artiljerijski sistem PVO, sposoban da ot-
krije cilj i dejstvuje po njemu i danju i
noću, čak i kada mu je odsečena veza sa
pretpostavljenom komandom. S obzirom
na to da savremeni vazduhoplovni napad
odlikuju brzina i iznenađenje, vreme
reakcije sistema PVO mora biti kratko,
a preciznost velika. Zbog toga je automa-

tizacija upravljanja vatrom protivavion-
skog (PA) topa ključni preduslov za nje-
govu efikasnost.

Savremeni automatski sistemi za
upravljanje vatrom (SUV) po pravilu su
modularni. Modularnost pojednostav-
ljuje dodavanje i zamenu komponenti
SUV, radi osavremenjavanja i povećanja
borbene efikasnosti, kao odgovor na
stalni razvoj vazduhoplovne tehnike. Ti-
pični moduli SUV savremenog PA topa
prikazani su na slici 1. To su: elektronski
nišanski uređaj, koji se sastoji od senzora
položaja cilja (laserski daljinomer, televi-
zijska i termovizijska kamera i davači
uglova nišanske linije), nosača sa servo-
pogonima, računarskog bloka, monitora

Sl. 1 – Automatski sistem upravljanja vatrom protivavionskog topa

i komandne table, zatim, osmatrački radar, komunikacioni modul, balistički računar i opcioni senzori početne brzine projektila i meteoroloških veličina.

Modularnost sistema omogućuje njegove različite varijante i varijacije. Tako se umesto navedenih elektrooptičkih senzora može koristiti nišanski radar. Umesto osmatračkog radara, u uslovima dobre vidljivosti, može se koristiti optički indikator cilja ili se uređaj za navođenje može potpuno izostaviti, kada se za navođenje koristi radar nekog drugog sistema. Senzor početne brzine projektila može se izostaviti i početna brzina računati na osnovu temperature baruta i istrošenosti cevi topa. Sopstveni meteorološki senzori nisu neophodni ako se koristi meteorološki bilten. Na komunikacioni modul može se priključiti više topova (koji ne moraju biti istog tipa) sa zasebnim balističkim računarima, pa čak i dodatni raketni lanseri.

Nišanski uređaj i top mogu se postaviti na istu ili zasebnu vučnu šasiju sa mogućnošću krutog oslanjanja na vozilo sa sopstvenim pogonom, čamac ili brod. U slučaju kada se nišanski uređaj i top ne oslanjaju kruto, za pravilan rad sistema neophodni su senzori kretanja (oscilacija) sistema, kako bi se anulirao uticaj kretanja nosača na praćenje i gađanje cilja.

U ovom radu predlaže se novi postupak automatskog upravljanja vatrom PA topa, koji se može primeniti na bilo koju navedenu varijantu SUV, s namerom da se poveća efikasnost vatrenog dejstva.

Problem automatskog upravljanja vatrom

Zadatak automatskog upravljanja vatrom PA topa je da, bez neposrednog

učešća čoveka, kontinuirano vodi top u položaj koji obezbeđuje zadovoljavajuću verovatnoću susreta projektila i cilja, odnosno zadovoljavajuću verovatnoću po gađanja cilja. Da bi se ovaj zadatak ostvario, potrebno je odrediti kretanje cilja i projektila, odnosno veličine koje definišu njihovo kretanje. Predviđanje položaja ispaljenog projektila ne predstavlja teorijski problem. Kretanje nevođenog projektila potpuno je određeno početnim uslovima leta (položaj linije gađanja, odnosno cevi topa i početna brzina projektila), masom i aerodinamičkim svojstvima projektila, kao i meteorološkim podacima. Matematičke relacije koje opisuju kretanje projektila potpuno su poznate, kako one tačne, tako i one približne. Najveći problem u upravljanju vatrom je precizno predviđanje položaja cilja za očekivano vreme leta projektila.

Određivanje kretanja cilja je zadatak praćenja cilja, kao aktivnosti u sklopu upravljanja vatrom. Automatsko upravljanje vatrom podrazumeva da se i praćenje cilja obavlja automatski, odnosno bez neposrednog učešća čoveka. Da bi se kretanje cilja odredilo na način koji omogućuje precizno predviđanje tačke susreta, potrebno je da se:

- položaj cilja meri u toku određenog vremena,
- kretanje cilja opiše matematičkim relacijama,
- razradi postupak ocenjivanja parametara kretanja cilja korišćenjem izmerenih podataka.

Kada su poznate relacije i parametri koji određuju kretanja projektila i cilja, onda se vreme leta i tačka susreta projektila i cilja određuju iz uslova jednakosti vektora položaja projektila $\underline{r}_z$ i cilja $\underline{r}$ u trenutku susreta $t_g + t_p$. Veličina t_g označava trenutak opaljenja, a t_p vreme leta.

Najpogodnija matematička relacija za opis kretanja cilja od trenutka opaljenja do trenutka susreta je Tejlorov polinom. To znači da se položaj cilja u trenutku susreta ocenjuje korišćenjem izraza:

$$\hat{\underline{r}}(t_g + t_p) = \hat{\underline{r}}(t_g) + \sum_{i=1}^n \frac{t_p^i}{i!} \hat{\underline{r}}^{(i)}(t_g)$$

Parametri koji figurišu u Tejlorovom polinomu su: red polinoma (n), vreme leta (t_p) i kinematske veličine cilja, a to su vektor položaja cilja $\underline{r} = (x \ y \ z)^T$ i njegovi izvodi po vremenu:

$$\underline{r}^{(i)} = d^i \underline{r} / dt^i = (x^{(i)} \ y^{(i)} \ z^{(i)})^T, \\ i = 1, 2, \dots, n.$$

” $\wedge$ ” označava ocenu određene veličine, a ” T ” transpoziciju vektora ili matrice. Red Tejlorovog polinoma, a time i broj potrebnih kinematskih veličina, zavisi od načina kretanja cilja.

Izračunavanje tačke susreta i vremena leta iz uslova:

$$\underline{r}_z(t_g + t_p) = \hat{\underline{r}}(t_g + t_p)$$

predstavlja rekurentan postupak. On je detaljnije razmatran u [1]. Kada se vreme leta i tačka susreta izračunaju, lako se, na osnovu poznatih relacija i parametara leta projektila, određuju osnovni elementi gađanja. To su uglovi preticanja topa po azimutu (pravcu) i elevaciji (visini), odnosno uglovi između ose cevi topa i linije oruđe–cilj u trenutku gađanja.

Precizno i pravovremeno postavljanje cevi topa pod zadatim uglovima preticanja zadatak je koji ostvaruju servosistemi topa. Savremena teorija i praksa servosistema nudi niz efikasnih rešenja upravljanja kretanjem topa, pa se ovaj problem neće razmatrati. Pažnju treba

usredsrediti na praćenje cilja, kao proces koji obezbeđuje parametre kretanja cilja, neophodne za izračunavanje elemenata gađanja. Ti parametri su red Tejlorovog polinoma i kinematske veličine cilja. Novinu u upravljanju vatrom predstavlja uvođenje postupka praćenja cilja, koji uzima u obzir različite načine njegovog kretanja i omogućuje precizno predviđanje tačke susreta u različitim režimima leta cilja.

Merenje položaja cilja

Merenje položaja cilja je polazište za ocenjivanje kinematskih veličina cilja. U automatskom SUV i merenje položaja cilja obavlja se automatski. Slika 2 predstavlja šemu automatskog merenja položaja cilja, korišćenjem elektrooptičkih senzora. Veličine koje se mere su: uglovi cilja u odnosu na nišansku liniju – po azimutu $\Delta\beta$, po elevaciji $\Delta\alpha$; uglovi nišanske linije – po azimutu β_s , po elevaciji α_s i daljina cilja d .

Veličine $\Delta\beta$, $\Delta\alpha$ dobijaju se obradom televizijske (termovizijske) slike, a veličine β_s , α_s mere senzori uglova ugrađeni u nosač senzora. Daljinu cilja meri laserski daljinomer. Ukoliko se u mernom lancu nalazi nišanski radar, on meri veličine $\Delta\beta$, $\Delta\alpha$, d . Izmerene vrednosti navedenih veličina označavaju se sa: $y_{\Delta\beta}$, $y_{\Delta\alpha}$, y_{β_s} , y_{α_s} , y_d , a izmereni uglovi cilja u odnosu na nišanski uređaj $\beta = \beta_s + \Delta\beta$, $\alpha = \alpha_s + \Delta\alpha$ sa y_β , y_α . Izmerene sferne koordinate y_β , y_α , y_d transformišu se u pravougli koordinatni sistem vezan za nepokretnu podlogu, i dobijaju izmerene pravouglo koordinate: y_x , y_y , y_z . One formiraju vektor merenja:

$$\underline{y} = (y_x \ y_y \ y_z)^T$$

Sl. 2 – Automatsko merenje položaja cilja

Ukoliko se nišanski uređaj nalazi na pokretnom objektu koji nije kruto oslo-njen, on može rotirati. Izmerene pravou-gle koordinate y_x , y_y , y_z se, u tom slučaju, iz pokretnog koordinatnog sistema mo-raju transformisati u inercijalni. Za ovu transformaciju potrebno je meriti uglove prostorne orijentacije nosača senzora. Ukoliko postoji i translatorska kompo-nenta kretanja nosača koja nije unifor-mna, potrebno je meriti i pomeranje centra uređaja za praćenje u odnosu na tlo, za šta se koriste navigacioni sistemi. S obzirom na to da precizno merenje translacije nosača i žiroskopska stabiliza-cija pri kretanju po neravnom terenu predstavljaju velike probleme, samo-hodni PA topovi po pravilu gađaju sa zastanka.

Da bi se položaj cilja mogao meriti, senzore treba kontinuirano usmeravati ka cilju, posredstvom servosistema ugra-đenih u nosač senzora. Jedno rešenje

automatskog upravljanja kretanjem sen-zora predloženo je u [2].

Matematički opis kretanja cilja

Matematički opis kretanja cilja osnov je za optimalno ocenjivanje njego-vih kinematskih veličina. Da bi mogao da se koristi u SUV, mora da omogući oce-njivanje veličina koje određuju kretanje cilja samo na osnovu merenja njegovog položaja. Precizno opisivanje kretanja ci-lja koje zadovoljava dati uslov, na današnjem nivou razvoja nauke i tehnike, moguće je samo ako se cilj kreće ustalje-no. Ustaljeni režimi kretanja cilja su uni-formni let (pravolinijsko kretanje kon-stantnom brzinom), jednako ubrzano kretanje i koordinisani zaokret.

Koordinisani zaokret cilja je takav manevar u ravni da je razlika sila potiska (T) i čeonog otpora vazduha (R_{xk}) kon-stantna, sila uzgona (L) konstantna, ugao

valjanja (φ) konstantan i ugao klizanja (β_k) konstantan – slika 3. Sve ustaljene režime odlikuje to da je buduće kretanje cilja potpuno definisano trenutnim stanjem cilja. Matematički modeli koji opisuju uniformno i jednako ubrzano kretanje krajnje su jednostavni. Radi veće fleksibilnosti, za opis koordinisanog zaokreta koristi se model približno koordinisanog zaokreta. Približno koordinisani zaokret je takav oblik kretanja pri kojem su matematička očekivanja (srednje vrednosti) veličina R_{xk} , L , φ , β_k približno konstantna. Ovaj model kretanja dopušta slučajna odstupanja od ustaljenog zaokreta.

Ustaljenim režimima leta treba dodati i neustaljeni režim. Model koji precizno opisuje neustaljeno kretanje cilja i omogućuje određivanje parametara njegovog kretanja na osnovu merenja položaja nije poznat. Zato se neustaljeno kretanje cilja opisuje približnim modelom, koji podrazumeva da je ubrzanje cilja slučajni proces, sa eksponencijalnom autokorelacionom funkcijom [3]. Diskretni modeli koji opisuju tri ustaljena režima leta, kao i neustaljeni let, imaju jedinstveni opšti oblik:

$$\underline{x}(k) = A_j \underline{x}(k-1) + B_j \underline{J}(k-1) + \underline{w}_j(k-1), j = 1, 2, 3, 4$$

Celobrojna veličina k predstavlja diskretno vreme: $t_k = kT$. Veličina T pred-

stavlja period odabiranja. Indeks j označava broj modela: $j = 1$ – model uniformnog kretanja, $j = 2$ – model konstantnog ubrzanja, $j = 3$ – model približno koordinisanog zaokreta, $j = 4$ – model eksponencijalno korelisanog ubrzanja (neustaljeno kretanje).

$\underline{w}_j$ su vektori belih šumova s Gausovom raspodelom [4]. Jedino modeli 3 i 4 sadrže ulazne šumove, što znači da je $\underline{w}_1 = \underline{w}_2 \equiv \underline{0}$. Kovarijansne matrice ovih šumova su:

$$Q_j = E \{ \underline{w}_j \underline{w}_j^T \}, j = 1, 2, 3, 4$$

pri čemu je $Q_1 = Q_2 \equiv 0$. Kovarijansne matrice Q_3 i Q_4 definisane su u [5] i [7]. $\underline{x}$ je vektor stanja cilja. On sadrži kinematske veličine cilja:

$$\underline{x} = (x \dot{x} \ddot{x} y \dot{y} \ddot{y} z \dot{z} \ddot{z})^T$$

$\underline{J}$ je vektor koji definiše trzaj (izvod ubrzanja) pri koordinisanom zaokretu. On je, u slučaju koordinisanog zaokreta, u potpunosti određen brzinom i ubrzanjem cilja [5]:

$$\underline{J} = \underline{J} (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^T$$

Matrice koje se pojavljuju u modelima kretanja su:

$$A_1 = \begin{pmatrix} A^I & 0 & 0 \\ 0 & A^I & 0 \\ 0 & 0 & A^I \end{pmatrix}$$

Sl. 3 – Parametri koji definišu koordinisani zaokret

$$A_2 = A_3 = A_4 = \begin{pmatrix} A^{II} & 0 & 0 \\ 0 & A^{II} & 0 \\ 0 & 0 & A^{II} \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} \underline{b} & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{b} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{b} \end{pmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = B_4 = 0$$

gde su:

$$A^I = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A^{II} = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\underline{b} = (T^3/6 \ T^2/2 \ T)^T$$

Cilj se u opštem slučaju kreće proizvoljno, menjajući režime leta, pri čemu se u bilo kom trenutku mora nalaziti u jednom od tri ustaljena režima leta ili u neustaljenom režimu. Zato se usvaja pretpostavka da se u proizvoljnom trenutku cilj može kretati u skladu sa jednim (bilo kojim) od četiri data modela, i da u narednom trenutku može da nastavi kretanje po istom modelu ili da pređe na kretanje po bilo kom drugom modelu.

Kretanje cilja se, dakle, opisuje Markovljevim lancem promena modela. Da bi ovaj lanac bio definisan u statističkom smislu, treba usvojiti početne verovatnoće modela μ_j , $j = 1, 2, 3, 4$, (j – broj modela) i verovatnoće prelaza sa i -tog na j -ti model: θ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3, 4$, koje, s obzirom na usvojenu pretpostavku o kretanju cilja, ne zavise od vremena.

Model kretanja cilja treba povezati sa procesom merenja položaja cilja, odnosno uspostaviti vezu vektora stanja $\underline{x}$ i vektora merenja $\underline{y}$:

$$\underline{y} = C\underline{x} + \underline{v}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Vektor grešaka merenja $\underline{v}$ može se smatrati vektorom belih Gausovih šumova [6], čija se kovarijansna matrica $R = E \{ \underline{v} \underline{v}^T \}$ određuje na osnovu tehničkih podataka o korišćenim senzorima ili se utvrđuje eksperimentalno.

Ocenjivanje parametara kretanja cilja

Koordinate cilja i komponente brzine i ubrzanja cilja, sadržane u vektoru stanja cilja $\underline{x}$, potpuno određuju kretanje cilja u svim ustaljenim režimima leta, s obzirom na to da su, u slučaju koordinisanog zaokreta, treći i viši izvodi koordinata cilja potpuno određeni vektorom $\underline{x}$ [5]. Stoga je potrebno definisati postupak ocenjivanja ovog vektora u realnom vremenu, na osnovu sekvence izmerenih vektora položaja cilja: $\underline{y}(k_0)$, $\underline{y}(k_0 + 1), \dots, \underline{y}(k)$, korišćenjem datih diskretnih modela kretanja cilja. Taj postupak treba da obezbedi precizne ocene u svim ustaljenim režimima leta, u uslovima promenljivog kretanja cilja, tj. za slučaj kada cilj manevriše.

Ukoliko cilj stalno koristi isti režim leta, s obzirom na to da su svi režimi leta opisani modelima koji imaju linearnu formu, optimalna ocena vektora stanja cilja može se dobiti primenom dobro poznatog Kalmanovog filtra. To je rekurentni estimator, koji stanje cilja ocenjuje na osnovu prethodno dobijene ocene stanja i tekućeg vektora merenja, koristeći model kretanja cilja kao referencu. Za praćenje cilja koji menja način kretanja, kada nije

Sl. 4 – Ocenjivanje kinematskih veličina cilja spregnutim Kalmanovim filtrima

poznato koji način kretanja cilj trenutno koristi, predlaže se paralelna upotreba četiri Kalmanova filtra, od kojih svaki koristi jedan od četiri data modela kretanja cilja, kao referentni model.

Neka je k_0 inicijalni diskretni trenutak, tj. trenutak u kojem ocenjivanje stanja počinje. U narednom trenutku ($k_0 + 1$) cilj se može naći u četiri različita stanja, u skladu sa četiri moguća modela kretanja cilja. Paralelni Kalmanovi filtri daju ocene ovih stanja: $\hat{\underline{x}}_j(k_0 + 1)$, $j = 1, 2, 3, 4$ – slika 4. S obzirom na proizvolj-

nost kretanja cilja, u sledećem trenutku ($k_0 + 2$), cilj se može naći u jednom od šesnaest različitih stanja, tj. broj mogućih stanja cilja eksponencijalno raste s vremenom. Optimalni postupak praćenja zahtevao bi primenu po četiri Kalmanova filtra na svako moguće stanje cilja, tj. broj filtera bi eksponencijalno rastao, što je praktično neizvodivo.

Rešenje je u takvom sprezanju filtera, da se ne povećava broj korišćenih Kalmanovih filtera. Osnovni princip sprežanja jeste da se ne koriste neposredno

prethodno dobijene ocene $\hat{x}_j$, već ocene $\hat{x}_j^0$, dobijene mešanjem ocena $\hat{x}_j$ u skladu sa verovatnoćama μ_j pojedinih modela:

$$\hat{x}_j^0 = \sum_{i=1}^4 \hat{x}_i \mu_{ij}, j = 1, 2, 3, 4$$

$$\mu_{ij} = \frac{\theta_{ij} \mu_i}{\sum_{m=1}^4 \theta_{mj} \mu_m}, i, j = 1, 2, 3, 4$$

μ_{ij} je verovatnoća da se u prethodnom trenutku cilj kretao u skladu sa i-tim modelom, ako je tačno da se u posmatranom trenutku kreće u skladu sa j-tim modelom. Verovatnoće modela dobijaju se korišćenjem međurezultata Kalmanovih filtera, statističkih podataka R, Q_j ,

$j = 3, 4$ i pretpostavke da slučajne promenljive $\underline{v}$ i $\underline{w}_j, j = 3, 4$ imaju Gausovu raspodelu. Kao izlazna ocena stanja cilja $\hat{x}$ usvaja se ocena $\hat{x}_j$ koja odgovara najverovatnijem modelu, tj. $\hat{x} = \hat{x}_j$, gde je $\mu_j \geq \mu_i, i = 1, 2, 3, 4$. Ovaj postupak sprežanja Kalmanovih filtera za više referentnih modela naziva se interakcija više modela i detaljno je opisan u [8]. Njegov izlaz su ocena najverovatnijeg stanja cilja i verovatnoće svih korišćenih modela. Grafički je prikazan na slici 4. Slika 5 prikazuje blok-dijagram Kalmanovog filtera sa i-tim referentnim modelom, koji važi za sve date modele kretanja cilja, tj. za $i = 1, 2, 3, 4$. $\hat{x}_i(k | k - 1)$ označava predviđanje stanja cilja na osnovu ocene stanja dobijene u prethodnom trenutku, a $\hat{x}_i(k | k)$ korekciju ocene.

Na osnovu izložene teorije definiše se sledeći algoritam za automatsko upravljanje vatrom protivavionskog topa:

1. Koristeći izmerene vrednosti $\Delta\beta$, $\Delta\alpha$ kao signale greške, senzori se automatski usmeravaju ka cilju i mere njegov položaj.

2. Na osnovu izmerenog položaja ocenjuju se stanje cilja x i najverovatniji model kretanja cilja.

3. Iz uslova jednakosti vektora položaja projektila i cilja u trenutku susreta određuju se vreme leta i tačka njihovog susreta. Pri tome se položaj cilja predviđa korišćenjem datog Tejlorovog polinoma, čiji je red $n = 1$, ako je najverovatniji model broj 1 ($j = 1$, model uniformnog kretanja cilja), $n = 2$, ako je najverovatniji model 2 (model konstantnog ubrzanja) ili model 4 (definiše neustaljeno kretanje cilja) ili $n = 5$, ako je najverovatniji model 3 (približno koordinisani zaokret).

4. Izračunavaju se uglovi preticanja topa i top postavlja pod izračunatim uglovima.

5. Otvara se vatra ukoliko su zadovoljeni sledeći uslovi: daljina cilja je manja od efikasnog dometa topa, najverovatniji model kretanja cilja je model broj 1, 2 ili 3, a prosečna greška ocenjivanja stanja cilja je dovoljno mala. Pri ispitivanju poslednjeg uslova može se koristiti rezidijum Kalmanovog filtra koji odgovara najverovatnijem modelu kretanja cilja (videti npr. [7] ili [8]). Ako je najverovatnije da se cilj nalazi u neustaljenom režimu leta, cilj ne treba gađati, osim ako je on veoma blizu oruđa, s obzirom na to da odgovarajući model kretanja ne opisuje dovoljno precizno kretanje cilja.

Opisani postupak upravljanja vatrom omogućuje precizno gađanje letećeg manevrišućeg cilja u svim ustaljenim režimima njegovog kretanja, što je novost u teoriji i praksi upravljanja vatrom, koja znatno povećava efikasnost gađanja, povećavajući vremenski raspon u kojem se cilj može precizno gađati. Efikasnost opisanog postupka iscrpno je ispitivana kroz eksperimente računarske simulacije [7]. Dobijeni rezultati su dobri i afirmišu opisani postupak. Implementacija postupka na autonomni artiljerijski sistem, zasnovan na termovizijskom i laserskom senzoru, omogućuje efikasnu protivvazдушnu odbranu u dubini branjene teritorije, žilavu i otpornu na intenzivno protivelektronsko dejstvo agresora, uz znatnu uštedu municije, tim pre što se kroz postupak obrade termovizijske slike može uspešno segmentirati cilj u odnosu na okolinu, uključujući i različite vrste mamaca, koje izbacuje cilj po kojem se dejstvuje.

Literatura:

- [1] Milinović, M., Dodić, N.: Automatsko upravljanje vatrom protivavionskog topa, Naučnotehnički pregled, vol. 47, br. 1, str. 10–13, 1997.
- [2] Dodić, N.: Upravljanje nišanskom spravom u funkciji praćenja cilja u vazduhu, Naučnotehnički pregled, vol. 48, br. 6, str. 33–38, 1998.
- [3] Singer, R.: Estimate Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 6, p. 473–483, No. 4, 1970, July.
- [4] Debeljković D.: Stohastički linearni sistemi automatskog upravljanja, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [5] Dodić, N.: Praćenje manevrišućeg cilja u vazduhu na osnovu hipoteze o koordinisanom zaokretu, Naučnotehnički pregled, vol. 47, br. 4, str. 9–15, 1997.
- [6] Dodić, N.: Merenje položaja cilja u toku automatskog praćenja, Naučnotehnički pregled, vol. 49, br. 1, str. 3–9, 1999.
- [7] Dodić, N.: Istraživanje novih metoda praćenja manevrišućih ciljeva sa primenom na sisteme upravljanja vatrom – doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
- [8] Dodić, N.: Praćenje sistema interakcijom više modela, Naučnotehnički pregled, vol. 47, br. 2, str. 3–9, 1997.