Dr Momčilo P. Milinović,
docent, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd
Mr Nenad M. Dodić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

PROBLEM SUSRETA PROJEKTILA I CILJA U SISTEMU AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA VATROM PROTIVAVIONSKOG TOPA

UDC: 623.418.2.02:531.567

Rezime:

U radu je predstavljen automatski sistem za upravljanje vatrom na protivavionskom artiljerijskom sistemu. Sistem je projektovan tako da zadovoljava potrebe mobilnih i stacionarnih protivavionskih sistema za trupnu i stacionarnu protivvazдушnu odbranu. Ukazano je na glavne probleme preciznosti gađanja i date su teorijske i praktične metode za njegovo poboljšanje. Predložen je novi pristup praćenju manevrišućih ciljeva, koji obezbeđuje povećanu tačnost gađanja.

Ključne reči: automatski sistem, balistički problem, gađanje, Kalmanov filter, ocenjivanje, protivvazдушna odbrana, tačka susreta, upravljanje vatrom, vreme leta.

THE PROBLEM OF IMPACT OF THE ROUND ON THE TARGET AND THE AUTOMATIC FIRE CONTROL SYSTEM OF THE AIR DEFENCE GUN

Summary:

An automatic fire control system for an antiaircraft artillery weapon is presented. It is designed to fulfil the demands of mobile and stationary defence systems. A description of the system and a solution to the impact of the round on the target problem are given as well as a general solution to the airborne target tracking problem.

Key words: automatic system, ballistic problem, hitting, Kalman filter, estimation, air defence, point of impact, fire control, time of flight.

Uvod

Sistemi upravljanja vatrom u protivvazdušnoj odbrani predstavljaju naj-složenije sisteme upravljanja vatrom u naoružanju uopšte. Naime, sistemi upravljanja vatrom doživeli su svoj preporod automatizacijom proisteklom iz potrebe rešavanja zadatka susreta projektila i cilja u protivvazdušnoj odbrani. Svi ostali sistemi upravljanja vatrom predstavljaju manje složen zadatak sa aspekta pogađanja cilja, s obzirom na to da je vreme boravka cilja u

zoni dejstva neuporedivo duže nego kod protivavionskih sistema.

Moderan razvoj vazduhoplovnih sredstava, pored usavršavanja ostalih karakteristika, posebnu pažnju posvećuje efikasnosti letelica pri gađanju ciljeva na zemlji pri veoma velikim brzinama i relativno malim visinama leta. Adekvatno praćenje (u tehničkom smislu) novih letelica ovakvih performansi upravo je glavni zadatak automatskog sistema za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani. Iz toga se može jasno zaključiti da je, sa aspekta siste-

ma upravljanja vatrom, nova generacija letelica ovakvih performansi nametnula još oštrije zahteve u pogledu kratkotrajnosti vremena boravka u zoni odbrane. Time stari postupci i metode, matematički i tehnički realizovani u dosadašnjim sistemima za upravljanje vatrom u protivvazdušnoj odbrani, postaju nedovoljno efikasni. Novi, brzo-manevrišući avioni, koji dejstvuju na cilj pri velikim brzinama leta, traže i nova rešenja za pravilnu predikciju tačke susreta.

Sistem za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani

Automatski sistem za upravljanje vatrom, bez neposrednog učešća čoveka, upravlja pomeranjem cevi topa, na osnovu informacija koje dobija od osmatračkog radara i sopstvenih senzora, tako da obezbeđuje otvaranje vatre s velikim verovatnoćama pogađanja i uništenja cilja. Osnovni zadatak sistema upravljanja vatrom (SUV) jeste da obezbedi susret projektila i cilja, tj. da projektil s trenutnim (udarnim) upaljačem udari u cilj, odnosno da se projektil s blizinskim upaljačem i parčadnim dejstvom (prefragmentirani) nađe dovoljno blizu cilja, kako bi se upaljač aktivirao. Dakle, prostor u kome treba da se nađe projektil s trenutnim upaljačem jeste zapremina aviona, a prostor u kome treba da se nađe projektil s blizinskim upaljačem omeđen je obvojnicom oko svera sa centrima u svim tačkama letelice i poluprečnicima jednakim odstojanju na kome se aktivira blizinski upaljač (označeno tačkasto na slici 2). Time se višestruko povećava fiktivna zapremina u kojoj projektil treba da se nađe, odnosno površina siluete kroz koju projektil treba da prođe. Dakle, municija s blizinskim upaljačem fiktivno povećava cilj koji se gađa, što znatno povećava verovatnoću pogađanja cilja, naročito kada je on mali (raketa).

Pri gađanju cilj može da se kreće pravolinijski, konstantnom brzinom ili

da manevriše, tj. da menja ubrzanje, krećući se po pravoj ili krivoj liniji. Gađanje cilja u manevru postavlja konstruktoru sistema za upravljanje vatrom stroge zahteve zbog složene dinamike pokretanja topa i senzora za merenje položaja cilja, kao i zbog složenijeg postupka ocenjivanja kinematskih veličina cilja. Za rešavanje susreta projektila i cilja u manevru, pored ocene vektora položaja i brzine cilja, treba obezbediti i ocene vektora ubrzanja i viših izvoda vektora položaja cilja visoke tačnosti. Glavni problem jeste nepoznavanje načina kretanja cilja, s obzirom na to da letelica može da ima proizvoljnu trajektoriju, ograničenu jedino njenim tehničkim mogućnostima i fizičkom sposobnošću pilota.

Rad sistema oruđe-SUV

Protivavionski sistem opremljen topom postavljen je na obrtnu platformu oklopnog vozila, zajedno sa senzorima za precizno merenje položaja cilja. Senzori su postavljeni na nosaču koji se nalazi na istoj platformi kao i top i koji po visini rotira nezavisno od kretanja topa, a po pravcu rotira relativno u odnosu na platformu topa. Senzori i top pokreću se električnim ili hidrauličnim motorima. Zadatak senzora jeste da preuzmu ulogu nišanske sprave, što znači da prepoznaju cilj i odrede njegove koordinate sa zadatom pouzdanošću. Osa senzora predstavlja nišansku liniju i kreće se nezavisno od kretanja ose cevi topa — linije gađanja. Na osnovu podataka od senzora i matematičkog modela za predikciju kretanja cilja, linija gađanja dovodi se preko sistema za upravljanje vatrom u adekvatni pravac.

Na slici 1 šematski je prikazan rad sistema za upravljanje vatrom protivavionskog sistema. Senzori su upravljani ka cilju i mere sverne koordinate položaja cilja u odnosu na oruđe: uglove azimuta i elevacije i daljinu cilja. Na osnovu ovih merenja ocenjuju se kinematske veličine cilja: vektori položaja,

brzine i ubrzanja, kao i viši izvodi vektora položaja cilja. Senzori treba da budu žiroskopski stabilisani, kako bi se kompenzovale oscilacije vozila prilikom njegovog kretanja ili otvaranja vatre. U intervalima kada se položaj cilja ne meri (privremeni »gubitak« cilja zbog zaklonjenosti, ometanja senzora, itd.), senzor se usmerava na osnovu predikcije položaja cilja. Na osnovu ocena kinematskih veličina, balističkih parametara i meteoroloških podataka rešava se problem preticanja u cilju susreta projektila i cilja. Proračunom u okviru sistema za upravljanje vatrom u realnom vremenu praćenja određuje se položaj linije gađanja. Servosistem pokreće oruđe (top), tako da osa cevi zauzme izračunati položaj linije gađanja.

Proračunski podaci o cilju, dobijeni na osnovu praćenja senzorom, obezbeđuju stalnu korekciju nišanske linije

(linije praćenja) u odnosu na cilj, težeći da minimiziraju grešku praćenja. S druge strane, za svaki položaj senzora, na osnovu dobijenih podataka o cilju, balističkih podataka za top i municiju, kao i meteoroloških podataka, u realnom vremenu se proračunavaju koordinate tačke susreta i tačke usmeravanja oruđa. Koordinate ovih tačaka izračunavaju se na osnovu jednakosti vremena leta projektila i cilja do tačke susreta. Prema statističkim pokazateljima i oceni greške gađanja određuje se trenutak opaljenja i dužina rafala za zadata proračunsku verovatnoću uništenja, kao ulaznu karakteristiku oruđa.

Glavni senzori i njihove funkcije

Osnovni senzori su TV-kamera i laserski daljinomer. TV-kamera služi za otkrivanje cilja i merenje uglova cilja u odnosu na optičku liniju kamere, ko-

Sl. 1 — Funkcionalna šema protivavionskog sistema

ja je zadata prethodnim pozicioniranjem nosača kamere po elevaciji i azimutu. Laserski sistem za akviziciju položaja cilja predstavlja daljinar koji je paralelno spregnut sa osom kamere. Korišćenje termovizijske kamere omogućuje da se uglovi cilja mere i noću, što je vrlo bitno, s obzirom na to da se većina avio-napada može odvijati noću. Upotreba nišanskog radara, kao paralelnog dodatnog sistema za akviziciju cilja, obezbeđuje određivanje koordinata cilja u noćnim i dnevnim uslovima. Ovakav sistem služi kao pomoćni u uslovima kada se sprega kamere i lasera iz bilo kog razloga ne može koristiti (veća daljina, loši vremenski uslovi i slično). Ipak, primarni sistem koji će biti razmatran u ovom radu je optički termovizijskolaserski senzorski sklop.

Uporedne karakteristike različitih senzorskih podsistema teško je analizirati, s obzirom na to da svaki ima prednosti i nedostatke u određenim oblastima upotrebe i uslovima primene. Ipak,

mala prednost može se dati sklopu termovizijska kamera — laser za samohodne trupne PA sisteme.

Određivanje položaja tačke susreta projektila i cilja i linije gađanja

Usvojena je pretpostavka da se cilj kreće u najopštijem slučaju kontinualno pravolinijski, a da se elementi gađanja prate i zauzimaju diskretno u zadatim trenucima. Vremenski interval T između ovih diskretnih trenutaka određen je TV (termovizijskom) kamerom, kao osnovnim senzorom za merenje položaja cilja. S obzirom na to da kamere, po evropskom CCIR standardu, daju 25 slika, odnosno 50 poluslika u sekundi, navedeni vremenski interval mora biti $T=0,04$ s, odnosno $T=0,02$ s. Obe vrednosti obezbeđuju precizno praćenje savremenih borbenih aviona.

Sl. 2 — Susret projektila i cilja

Na slici 2 šematski su prikazani vektorski parametri susreta projektila i cilja. Trajektorija cilja proračunava se u inercijalnom koordinatnom sistemu Oxyz, sa koordinatnim početkom u centru oruđa. Vektor položaja cilja $\vec{r}$ određen je svernim koordinatama: uglovima azimuta β i elevacije ϵ i daljinom d , odnosno pravouglim koordinatama: x , y i z . Indeks »p« odnosi se na tačku susreta projektila i cilja (tačka A_p). Tako su β_p i ϵ_p uglovi azimuta i elevacije, a x_p , y_p i z_p pravougle koordinate tačke susreta.

Senzori, tj. nišanska linija, upravljani su ka cilju (tačka A) i mere vektor položaja cilja. Koristeći izmerene veličine, uz zadate balističke karakteristike topa i municije, kao i integrisane meteorološke podatke, izračunava se vreme leta t_p projektila, vektor položaja $\vec{r}_p$ tačke susreta, kao i uglovi azimuta β_g i elevacije ϵ_g linije gađanja. Postavljanje topa u pravcu linije gađanja obezbeđuje susret projektila i cilja u tački A_p sa zadatom verovatnoćom.

Tačnost rešenja zadatka susreta umnogome zavisi od usvojene hipoteze o načinu kretanja cilja od tačke gde ga je senzor detektovao do tačke susreta s projektilom. U dosadašnjoj praksi usvajane su različite hipoteze o načinu kretanja cilja. U ovom radu, pri rešavanju zadatka susreta, smatra se da se cilj kreće krivolinijski, sa svim mogućim varijantama ubrzanja. Geometrijska slika susreta počiva, dakle, na prostornoj površi koju opisuje vektor položaja cilja pri kretanju cilja do tačke susreta i balističkom trouglu, koji se nalazi približno u vertikalnoj ravni, u kome leži putanja projektila i prolazi kroz tačku susreta.

Matematički uslov susreta jeste da se projektil i centar cilja u trenutku susreta nađu u istoj tački:

$$\vec{r}_z(t+t_p) = \vec{r}(t+t_p)$$

gde je:

- $\vec{r}_z$ — vektor položaja projektila (zrna),
- $\vec{r}$ — vektor položaja centra cilja,
- t — trenutak opaljenja,
- t_p — vreme leta.

Vektor $\vec{r}_z(t+t_p)$ dobija se rešavanjem jednačina kretanja projektila — balistički problem, a $\vec{r}(t+t_p)$ rešavanjem jednačine kretanja cilja. Vektorska diferencijalna jednačina kretanja projektila može se napisati u opštem obliku:

$$\frac{d^2\vec{r}_z(t)}{dt^2} = \vec{F}_a(\vec{r}_z, \frac{d\vec{r}_z}{dt}, \vec{w}, h, \tau) + m\vec{g}$$

gde je:

- $\vec{F}_a$ — vektor aerodinamičke sile projektila,
- $\vec{w}$ — vektor brzine vetra,
- h — pritisak vazduha,
- m — masa projektila,
- $\vec{g}$ — vektor ubrzanja Zemljine teže.

S obzirom na to da je usvojeno da način kretanja cilja u toku leta projektila može biti proizvoljan, vektor položaja cilja u trenutku susreta izračunava se korišćenjem Tejlorovog polinoma reda n , koji nije unapred fiksiran:

$$\vec{r}(t+t_p) = \vec{r}(t) + \sum_{i=1}^n \frac{t_p^i}{i!} \frac{d^i\vec{r}(t)}{dt^i}$$

Pošto stvarni vektori položaja cilja i njegovih izvoda nisu poznati, umesto navedenih veličina, u prethodni izraz se unose njihove ocene.

Dakle, simultano se rešavaju jednačine kretanja cilja i projektila, a tačka susreta određuje iz uslova jednakosti vremena leta projektila i cilja. Aerodinamička sila projektila je nelinearna funkcija svojih argumenata, što celu

jednačinu kretanja projektila čini analitički nerešivom. To znači da se vreme leta, koje zadovoljava navedeni uslov susreta, mora računati iterativno. Za realizaciju iterativnog postupka preporučuje se korišćenje Njutn-Rapsonove formule [1].

Balistički problem može se rešavati sledećim metodama [2]:

— proračunom putanje — rešava se vektorska diferencijalna jednačina kretanja projektila, npr. metodom Runge-Kutta;

— korišćenjem tabela balističkih karakteristika;

— korišćenjem aproksimativnih formula balističkih zavisnosti — ove formule ili aproksimiraju tabele balističkih karakteristika ili su izvedene iz vektorske jednačine kretanja projektila uz uvođenje određenih aproksimacija.

S obzirom na to da se ovde razmatra trupni sistem PVO i da je usvojena senzorska tehnika čija akvizicija pokriva radijus gađanja od najviše četiri kilometra, može se smatrati da je treća metoda primenljiva u ovom slučaju.

Određivanje kinematskih veličina cilja

Hipoteze o kretanju cilja

Da bi se na osnovu merenja položaja cilja ocenile vrednosti njegovih kinematskih veličina potrebno je poznavati varijanse i kovarijanse izmerenih koordinata cilja i formirati matematički model njegovog kretanja. Iz teorije ocenjivanja je poznato da, ukoliko je model koji se koristi jednostavniji, dobijene ocene parametara i stanja modela su tačnije. Do sada su korišćene različite hipoteze o kretanju cilja i svrha svake bila je da odgovarajući model bude što nižeg reda i što jednostavniji. Hipoteza o potpuno proizvoljnom kretanju cilja, sa korišćenjem punog, nelinearnog matematičkog modela dvana-

estog reda [3] nije pogodna za primenu Kalmanovog filtra. Zato se za praćenje ciljeva u sistemima za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani, uglavnom, koriste sledeće hipoteze o kretanju cilja:

a) cilj se kreće približno konstantnom brzinom,

b) cilj se kreće približno konstantnim ubrzanjem,

c) cilj vrši kružni zaokret.

Svaka od ovih hipoteza omogućuje formiranje relativno jednostavnog matematičkog modela kretanja cilja. S obzirom na to da letelica u toku napada na zemaljske ciljeve menja način kretanja, pojedinačna primena bilo koje od navedenih hipoteza je manje ili više nefleksibilna za ocenjivanje kinematskih veličina letelice u dužem vremenskom periodu. Stoga je uputno ne vezivati se unapred za jednu, unapred usvojenu hipotezu, već na osnovu informacija o kretanju cilja, koje se dobijaju u procesu njegovog praćenja, usvojiti hipotezu adekvatnu trenutnom načinu kretanja cilja.

Ocenjivanje kinematskih veličina cilja prema usvojenoj hipotezi

Bez obzira na to koja je hipoteza usvojena, kretanje cilja može se opisati diskretizovanim linearnim matematičkim modelom u sledećem opštem obliku:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{w}(k-1)$$

gde je:

k	— diskretni vremenski trenutak,
$\mathbf{x}$	— vektor (matrica-kolona) stanja — sadrži kinematske veličine cilja,
$\mathbf{u}$	— vektor ulaza,
$\mathbf{w}$	— vektor koji izražava grešku proračuna trajektorije cilja,
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{G}$	— matrice.

Ukoliko je matematički model kretanja cilja dobar, opravdano je da w bude vektor belog šuma malog intenziteta i nultog matematičkog očekivanja. Navedenom modelu pridružuje se model merenja:

$$y(k) = C(k)x(k) + v(k)$$

gde je:

y — vektor (matrica-kolona) merenih veličina (sverne ili pravouglo koordinat cilja),

v — vektor greške merenja,

C — matrica.

Ukoliko su merni senzori precizni, izbaždareni i rektifikovani, što je uslov za kvalitetno praćenje i precizno gađanje, onda se vektor greške merenja može smatrati vektorom belog šuma malog intenziteta i nultog matematičkog očekivanja. Za dobijanje ocene vektora stanja x koristi se Kalmanov filter [4, 5]:

$$\hat{x}(k|k-1) = A\hat{x}(k-1|k-1) + B(k)u(k-1)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[y(k) - C(k)\hat{x}(k|k-1)]$$

$$K(k) = P(k|k-1)C^T(k)[C(k)P(k|k-1)C^T(k) + R(k)]^{-1}$$

$$P(k|k-1) = A(k)P(k-1|k-1)A^T(k) + G(k)Q(k-1)G^T(k)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)C(k)P(k|k-1)$$

gde je:

$\hat{x}(k|k-1)$ — predikcija ocene stanja,

$\hat{x}(k|k)$ — korekcija ocene stanja,

$P(k|k-1)$ — predikcija kovarijanske matrice ocene stanja,

$P(k|k)$ — korekcija kovarijanske matrice ocene stanja,

Q — kovarijanska matrica vektora w (statistički pokazatelj greške proračuna trajektorije cilja),

R — kovarijanska matrica vektora v (statistički pokazatelj greške merenja),

T — oznaka za transpoziciju matrice.

Opisani Kalmanov filter predstavlja rekurentni estimator stanja. U slučaju da su w i v vektori belih šumova, Kalmanov filter daje ocenu stanja x koja je praktično optimalna. S obzirom na to da $\hat{x}(k|k)$ sadrži ocene kinematskih veličina, jasno je da je pravilnim izborom hipoteze o kretanju cilja i primenom Kalmanovog filtra praktično rešen problem optimalnog ocenjivanja kinematskih veličina cilja.

Izbor reda Tejlorovog polinoma za predikciju tačke susreta

Predikcija tačke susreta za vreme leta t_p obavlja se korišćenjem Tejlorovog polinoma:

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

gde je:

$\hat{r}(t)$ — ocena vektora položaja cilja,

$\hat{r}^{(i)}(t), i=1, 2, \dots, n$ — ocene njegovih izvoda.

Ako je usvojena hipoteza da se cilj kreće konstantnom brzinom, potreban red Tejlorovog polinoma je $n=1$, a ako je usvojena hipoteza da se cilj kreće približno konstantnim ubrzanjem, onda je $n=2$. Ako se cilj kreće po kružnoj putanji, preporučuje se [6] da red Tejlorovog polinoma bude peti ili viši. U ovom slučaju, treći i viši izvodi vektora položaja cilja mogu se izračunati na osnovu poznatih vektora brzine i ubrzanja cilja.

Zaključak

U radu je opisano rešenje automatskog sistema za upravljanje vatrom i u okviru njega rešenje problema susreta

projektila i cilja i problema ocenjivanja kinematskih veličina cilja, koja obezbeđuju efikasno praćenje i gađanje novih borbenih letelica poboljšanih performansi. Rešenja su pogodna za primenu u mobilnim i stacionarnim protivavionskim artiljerijskim sistemi-

ma i omogućuju uspešnu blisku odbranu od niskotećih aviona i vođenih projektila. Radi postizanja još veće efikasnosti sistema za upravljanje vatrom, predlaže se dalji rad na poboljšanju tačnosti ocena kinematskih veličina cilja, prema datim smernicama.

L i t e r a t u r a:

- [1] Simonović, V.: Numeričke metode, Mašinski fakultet, Beograd 1979.
- [2] Gajić, M.: Sistem upravljanja vatrom brodskih oruđa (OEUV) — elementi balističkog modula, elaborat, VTI VJ, oznaka VTI-02-01-0276, dec. 1989, Beograd.
- [3] Nenadović, M.: Stabilnost i upravljivost letelica — 1. deo, Mašinski fakultet, Beograd 1971.
- [4] Kalman, R.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transaction on ASME — Journal of Basic Engineering, Series 82D, pp. 35—45, Mar. 1960.
- [5] Sorenson, H.: Kalman Filtering: Vheory and Application, IEEE Press, New York 1985.
- [6] Berg, R.: Estimation and Prediction for Maneuvering Target Trajectories, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 28, p. 294—304, March 1983.