

Mr Dragoslav Ugarak,
pukovnik, dipl. inž.
Tehnički opitni centar KoV,
Beograd
Profesor dr
Momčilo Milinović,
dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Beograd

ANALIZA UTICAJA GREŠAKA I ŠUMA MERENJA NA TAČNOST ODREĐIVANJA KOORDINATA CILJA*

UDC: 623.4.023.2 : 519.724

Rezime:

U radu je opisan matematički model postupka analize uticaja grešaka merenja pozicije cilja i uticaja šuma na tačnost određivanja koordinata cilja u toku praćenja. Prikazan je postupak izračunavanja grešaka merenja položaja cilja u prostoru obuhvaćenom merenjima ili za unapred određene pravce kretanja ciljeva u vazдушnom prostoru. Opisani pristup ima široku primenu u povećanju verovatnoće pogodaka u sistemima za upravljanje vatrom (SUV), u poboljšavanju kvaliteta ispitivanja sistema za praćenje ciljeva i u optimizaciji pozicioniranja sistema za protivvazдушnu odbranu.

Cljučne reči: merenje koordinata, greške merenja, ocena grešaka.

NOISE AND ERRORS ANALYSIS AND INFLUENCES ON TARGET COORDINATES EVALUATION

Summary:

This paper presents a mathematical model of analysing the effects which noise and tracking errors have made during measurements of a target position while determining its coordinates. Here is also presented a procedure for computing errors in measuring a target position in the space comprised by measurements as well as for computing errors in predetermined directions of aerial targets movement. This approach has an extensive application in increasing hit probability of fire control systems, in improving the quality of target tracking system testing, and in the optimization of allocating antiaircraft defence systems.

Key words: coordinates measuring, measuring errors, errors estimate.

Uvod

Uspešnost sistema protivvazdušne odbrane zavisi od pravovremenog određivanja položaja potencijalnih ciljeva i od tačnosti procene njihovih parametara kretanja. Za određivanje položaja cilja u prostoru koriste se radarski ili optoelektronski nišanski uređaji koji omogućavaju automatsko praćenje kretanja cilja i

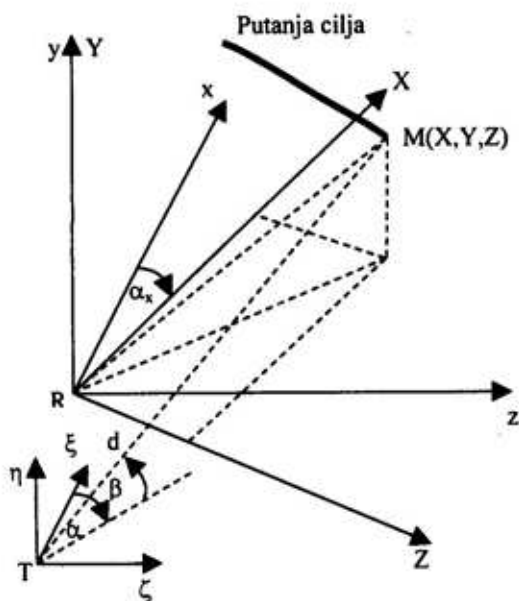
merenje daljine cilja i uglovnih vrednosti optičke ose nišanskog uređaja (nišanske linije). Praćenje cilja u vazдушnom prostoru je proces koji se sastoji od merenja položaja cilja u prostoru i određivanja kinematskih parametara kretanja cilja sa zahtevanom tačnosti. Kinematski parametri kretanja cilja su vektor položaja i vektor brzine cilja i viši izvodi vektora položaja. Određivanje kinematskih parametara vrši se obradom merenih veličina pogodnim matematičkim modelima za

* Rad je saopšten na stručnom skupu TOC KoV „Ispitivanje kvaliteta sredstava NVO“, 18. novembra 2003. u Beogradu.

ocenjivanje veličina stanja dinamičkih sistema. Da bi se kinematski parametri kretanja cilja mogli dovoljno dobro oceniti potrebno je položaj cilja meriti sa odgovarajućom tačnošću i poznavati statističke karakteristike grešaka merenja.

Merenje i određivanje koordinata cilja

Za određivanje koordinata cilja u prostoru koriste se zemaljski geodetski koordinatni sistemi [1, 2], vezani za merne uređaje $T\xi\eta\zeta$, koji se nazivaju lokalni, i geodetski koordinatni sistemi, vezani za oruđa $Rxyz$, koji se nazivaju referentni. Rotacijom referentnog koordinatnog sistema oko vertikalne ose, za vrednost azimuta pravca gađanja tako da je X -osa usmerena u pravcu gađanja, Y -osa usmerena naviše, a Z -osa u desno, dobija se startni koordinatni sistem $RXYZ$, slika 1.



Sl. 1 – Merenje polarnih koordinata cilja

Određivanje putanje leta cilja [1] sastoji se u merenju njegovih sfernih koordinata (daljine, azimuta i elevacije) u toku praćenja nišanskim radarom ili optoelektronskim nišanskim uređajem sa laserskim daljinomerom i njihovom transformacijom u koordinatni sistem vezan za oruđe. Drugi način određivanja putanje cilja sastoji se u merenju uglova azimuta i elevacije sa dva ili više nišanskih uređaja, zatim izračunavanju koordinata putanje metodom presecanja pravaca viziranja. Koordinate pozicije cilja mogu se odrediti i na osnovu istovremenog merenja daljina sa tri ili više instrumenata.

Ovde će se razmatrati slučaj merenja sfernih koordinata. Na osnovu izmerenih sfernih koordinata tražene tačke $M(d,\alpha,\beta)$, lako se određuju njene pravougle koordinate u geodetskom koordinatnom sistemu $T\xi\eta\zeta$:

$$\begin{aligned}\xi &= d \cos \beta \cos \alpha \\ \eta &= d \sin \beta \\ \zeta &= d \cos \beta \sin \alpha\end{aligned}\quad (1)$$

Koordinate merene tačke u referentnom geodetskom koordinatnom sistemu određene su relacijom:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + Brt \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix}\quad (2)$$

gde su x_t, y_t, z_t koordinate mernog instrumenta u referentnom koordinatnom sistemu $Rxyz$, a Brt je matrica rotacije lokalnog u referentni geodetski koordinatni sistem [2].

Položaj stajnih tačaka nišanskih uređaja i oruđa definiše se geografskim ko-

ordinatama T (Ht, ϕ_t , λ_t) i R (Hr, ϕ_r , λ_r), tako da članovi matrice Brt glase:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \cos(\lambda_r - \lambda_t) \sin\phi_r \sin\phi_t + \cos\phi_r \cos\phi_t \\ b_{12} &= -\cos(\lambda_r - \lambda_t) \sin\phi_r \cos\phi_t + \cos\phi_r \sin\phi_t \\ b_{13} &= -\sin(\lambda_r - \lambda_t) \sin\phi_r \\ b_{21} &= -\cos(\lambda_r - \lambda_t) \cos\phi_r \sin\phi_t + \sin\phi_r \cos\phi_t \\ b_{22} &= \cos(\lambda_r - \lambda_t) \cos\phi_r \cos\phi_t + \sin\phi_r \sin\phi_t \\ b_{23} &= \sin(\lambda_r - \lambda_t) \cos\phi_r \\ b_{31} &= \sin(\lambda_r - \lambda_t) \sin\phi_r \\ b_{32} &= -\sin(\lambda_r - \lambda_t) \cos\phi_r \\ b_{33} &= \cos(\lambda_r - \lambda_t) \end{aligned} \quad (3)$$

Položaj startnog koordinatnog sistema RXYZ u odnosu na referentni koordinatni sistem Rxyz, koji pripadaju tački R, određen je azimutom X-ose: α_x . Veza između koordinata tačke M (X, Y, Z) u startnom koordinatnom sistemu i koordinata iste tačke M (x, y, z) u geodetskom referentnom koordinatnom sistemu Rxyz, data je relacijom:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

gde je C matrica rotacije geodetskog koordinatnog sistema Rxyz u startni sistem RXYZ:

$$C = \begin{bmatrix} \cos\alpha_x & 0 & \sin\alpha_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_x & 0 & \cos\alpha_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nišanski uređaji za praćenje letućih ciljeva izrađeni su u vidu nosača senzora obrtnih oko vertikalne i horizontalne ose. Davači ugrađeni na obrtne ose mere

uglove azimuta (α_s) i elevacije (β_s) optičke ose senzora (televizijske ili termovizijske kamere), a daljina cilja (d) meri se pomoću ugrađenog laserskog daljinomera ili antene radara. Signali koje šalje nišanski radar proporcionalni su uglovima cilja i daljini cilja, tako da njih treba pravilno obraditi da bi se dobili mereni uglovi i daljina. Isto važi i za signal za daljinu koji daje laserski daljinomer. Video signali sa TV ili IC kamere digitalizuju se u matricu video tačaka (piksela), čijom obradom se određuju koordinate centra siluete cilja (h, v) u odnosu na osu kamere C, (slika 2).

Uglovi azimuta i elevacije optičke ose OC i linije viziranja cilja OH u vidnom polju kadra prikazani su na slici 3. Optička osa OC normalna je na ravan kadra Chv, koja je za OC = d udaljena od kamere za merenje odstupanja h i v, pri čemu se koristi faktor razmere $k = 1/d$. Za određivanje uglova linije viziranja cilja koriste se trouglovi ΔOAF , ΔOCD , ΔOHF i ΔOAF sa slike 3, iz kojih se dobija:

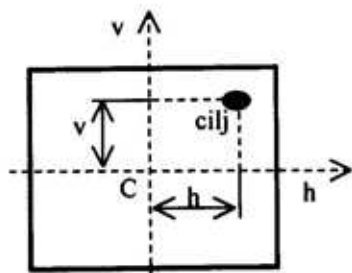
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta \alpha &= \frac{h}{OA} = \frac{kh}{\cos \beta_s - kv \sin \beta_s} \\ \alpha &= \alpha_s + \Delta \alpha \\ \operatorname{tg} \Delta \beta &= \frac{v}{d} = kv \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{HF}{OF} = \frac{AD}{OA} \cos \Delta \alpha = \\ &= \operatorname{tg}(\beta_s + \Delta \beta) \cos \Delta \alpha \end{aligned}$$

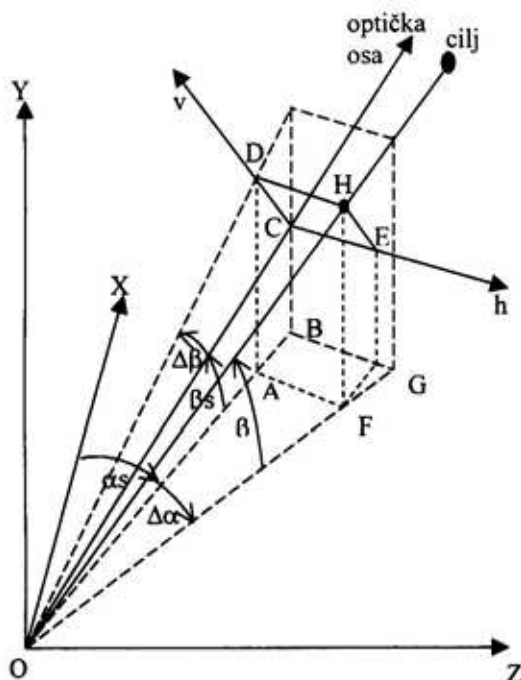
Pošto je vrednost vidnog ugla optike dovoljno mala može se usvojiti da je:

$$\operatorname{tg} \Delta \alpha = \Delta \alpha, \quad \cos \Delta \alpha = 1, \quad \operatorname{tg} \Delta \beta = \Delta \beta \quad (7)$$

Za određivanje lokalnih uglova linije viziranja cilja dobijaju se sledeće jednačine:



Sl. 2 - Izgled snimka cilja



Sl. 3 - Vidno polje snimka objekta praćenja (cilj)

$$\alpha = \alpha_s + \Delta\alpha$$

$$\beta = \beta_s + \Delta\beta \quad (8)$$

Pri tome uglovi odstupanja linije viziranja cilja od optičke ose instrumenta određeni su izrazom:

$$\Delta\alpha = \frac{kh}{\cos \beta_s - kv \sin \beta_s}$$

$$\Delta\beta = kv \quad (9)$$

Model i vrste grešaka merenja daljine i uglova viziranja cilja

Analiza grešaka merenja od velikog je značaja za praćenje ciljeva, zato što većina metoda praćenja zahteva informacije o greškama merenja. Greške merenja su slučajne veličine, takozvani šumovi merenja za koje se uvode određene pretpostavke, saglasno prirodi procesa čije se izlazne veličine mere.

Izlazni signal procesa je aditivno superponiran sa šumom pri merenju:

$$r_m = r + v \quad (10)$$

Ova jednačina je poznata u literaturi [3, 4] kao „opservacioni model“ i definiše način prikupljanja merenih podataka. Ovde je r_m merena vrednost izlaznog signala, r je izlazna veličina procesa dostupna merenju, a v je signal šumova prisutnih pri merenju izlazne veličine. Primljena na merenje polarnih koordinata cilja, jednačina (10) u nekom trenutku merenja, glasi:

$$\begin{bmatrix} \alpha_m(t) \\ \beta_m(t) \\ d_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \\ d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_d(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Korišćenjem jednačine (8) dobija se, da za greške merenja uglova viziranja cilja, važi:

$$v_\alpha = v_{\alpha_s} + v_{\Delta\alpha}$$

$$v_\beta = v_{\beta_s} + v_{\Delta\beta} \quad (12)$$

Prva i najvažnija pretpostavka u vezi sa greškama merenja je da su sistematke greške isključene, tj. da su svi merni senzori (merači uglova i daljine) izbaždareni i rektifikovani tako da srednje vrednosti grešaka merenja budu jednake nuli:

$$\begin{aligned} E[v_d] &= 0, E[v_{\alpha s}] = 0, E[v_{\beta s}] = 0, \\ E[v_{\Delta\alpha}] &= 0, E[v_{\Delta\beta}] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

To znači da su matematička očekivanja svih merenih veličina jednaka njihovim tačnim vrednostima:

$$E[r_m] = r \quad (14)$$

Slučajne greške (šumovi) u mernim uređajima mogu se smatrati sumom velikog broja mikroskopskih šumova čija rezultujuća raspodela je normalna (Gausova) raspodela. Proces merenja uglova i daljine su nezavisni, pa se pretpostavlja da su šumovi merenja $v_{\alpha s}$, $v_{\beta s}$, $v_{\Delta\alpha}$, $v_{\Delta\beta}$ i v_d međusobno nekorelisani. Vremenske konstante mernih senzora su nekoliko stotina puta manje od vremenskih konstanti praćenih ciljeva. Stoga može se pretpostaviti da greške merenja nisu korelisane u vremenu. Znači da vrednosti grešaka merenja u posmatranom trenutku ne zavise od vrednosti grešaka u prethodnim trenucima merenja. S obzirom na uvedene pretpostavke, varijanse grešaka merenja v_{α} , v_{β} iznose:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha}^2 &= \sigma_{\alpha s}^2 + \sigma_{\Delta\alpha}^2 \\ \sigma_{\beta}^2 &= \sigma_{\beta s}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Greške merenja sa navedenim osobinama predstavljaju bele Gausove šumove nultih matematičkih očekivanja. Pošto su greške merenja međusobno nekorelisane i vremenski nekorelisane, važi sledeće:

$$\begin{aligned} E[v_{\alpha}(t_1)v_{\beta}(t_2)] &= 0, E[v_{\alpha}(t_1)v_d(t_2)] = 0 \\ E[v_{\beta}(t_1)v_d(t_2)] &= 0, E[v_{\alpha}(t_1)v_{\alpha}(t_2)] = 0 \\ E[v_{\beta}(t_1)v_{\beta}(t_2)] &= 0, E[v_d(t_1)v_d(t_2)] = 0 \\ t_1 \neq t_2, t_1, t_2 \in R \end{aligned} \quad (16)$$

Svi šumovi merenja su Gausovi, odnosno imaju normalnu raspodelu verovatnoće sa nultim matematičkim očekivanjem $v \in N(0, V_v)$. Ovde je V_v varijaciona matrica vektora šuma v , čiji dijagonalni elementi su varijanse (disperzije) elemenata vektora v , a nedijagonalni elementi ukazuju na korelaciju (stepen povezanosti) elemenata vektora v :

$$V_v = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Greške određivanja uglovnih odstupanja $\Delta\alpha$ i $\Delta\beta$ mogu se, razvojem jednačina (9) u Tejlorov red, dobiti u linearnoj zavisnosti od grešaka merenja veličina ξ , η i βs :

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta\alpha) &= \frac{\partial\Delta\alpha}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial\Delta\alpha}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial\Delta\alpha}{\partial\beta s} \Delta\beta s \\ \Delta(\Delta\beta) &= \frac{\partial\Delta\beta}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial\Delta\beta}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial\Delta\beta}{\partial\beta s} \Delta\beta s \end{aligned} \quad (18)$$

Varijanse uglovnih odstupanja $\Delta\alpha$ i $\Delta\beta$ dobijaju se u obliku:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta\alpha}^2 &= \left(\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial v}\right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial\beta s}\right)^2 \sigma_{\beta s}^2 \\ \sigma_{\Delta\beta}^2 &= \left(\frac{\partial\Delta\beta}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial\Delta\beta}{\partial v}\right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial\Delta\beta}{\partial\beta s}\right)^2 \sigma_{\beta s}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Jednačine (19) daju funkcionalnu zavisnost srednje kvadratne greške uglovnih odstupanja od ugla elevacije optičke ose instrumenta:

$$\sigma_{\Delta\alpha} = f(\beta_s), \quad \sigma_{\Delta\beta} = f(\beta_s) = k\sigma_{\eta} \quad (20)$$

Srednje kvadratne greške merenja uglova optičke ose i daljine kod savremenih nišanskih uređaja na osnovu podataka proizvođača, iznose:

– za nišanski radar:

$$\sigma_{\alpha_s} = \sigma_{\beta_s} = 0,25 \text{ mrad} = 50'' \text{ i } \sigma_d = 5 \text{ m}$$

– za optoelektronski sistem: (21)

$$\sigma_{\alpha_s} = \sigma_{\beta_s} = 0,25 \text{ mrad} = 5'' \text{ i } \sigma_d = 2 \text{ m}$$

Ako se usvoji uobičajena rezolucija snimka od 50 linija/mm, tada srednje kvadratne greške obrade snimka iznose:

$$\sigma_{\xi} = \sigma_{\eta} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ mm} \quad (22)$$

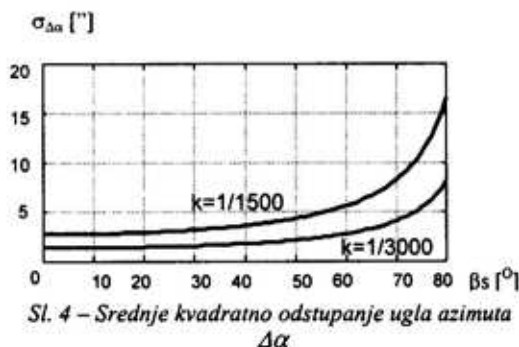
Za faktor razmere k uzima se recipročna vrednost žižine daljine objektiva $f = 1500 \text{ mm}$ ili $f = 3000 \text{ mm}$.

Zavisnosti (20) određene su za $\beta \in (0, 80^\circ)$ i prikazane su na dijagramima na slici 4 i slici 5.

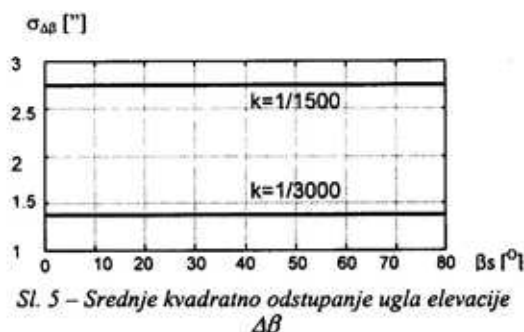
Greška određivanja ugla $\Delta\beta$ zavisi, u osnovnom, od greške obrade snimka, a greška određivanja ugla $\Delta\alpha$, pored greške obrade snimka, zavisi i od veličine ugla elevacije β_s optičke ose teodolita. Priroda te zavisnosti je takva da se greška $\sigma_{\Delta\alpha}$ neograničeno uvećava kada elevacija β_s raste ka vrednosti od 90° . Međutim, za vrednosti elevacije do $60\text{--}70^\circ$ može se smatrati da greška određivanja ugla $\Delta\alpha$ ne zavisi od ugla elevacije β_s , i tada važe pretpostavke o međusobno nekorelisanim greškama merenja.

Određivanje grešaka merenja pravougljih koordinata cilja

Greške merenja koordinata putanje cilja mogu se oceniti vrednostima njihovih disperzija, odnosno srednje kvadratnih odstupanja $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. Merenje pravougljih koordinata putanje cilja (X, Y, Z) vrši se posredno, transformacijom me-



Sl. 4 – Srednje kvadratno odstupanje ugla azimuta $\Delta\alpha$



Sl. 5 – Srednje kvadratno odstupanje ugla elevacije $\Delta\beta$

renja polarnih koordinata (α, β, d). Radi toga greške merenja pravougljih koordinata međusobno su korelativne.

Greške merenja polarnih koordinata u lokalnom sistemu mernog instrumenta date su matricom varijansi merenih veličina (17). Pravougke koordinate putanje projektila u lokalnom geodetskom koordinatnom sistemu date su jednačinama (1). Greške određivanja koordinata x, y, z mogu se, razvojem tih jednačina u Tejlorov red, dobiti u vidu linearne zavisnosti od grešaka merenja polarnih koordinata α, β, d . Za određivanje matrice kovarijansi grešaka merenja u pravougljim koordinatama može se tada upotrebiti relacija:

$$V_{\xi} = F V_{\alpha} F^T \quad (23)$$

gde su:

$$V_{\xi} = \begin{bmatrix} \sigma_{\xi}^2 & \sigma_{\xi\eta}^2 & \sigma_{\xi\zeta}^2 \\ \sigma_{\xi\eta}^2 & \sigma_{\eta}^2 & \sigma_{\eta\zeta}^2 \\ \sigma_{\xi\zeta}^2 & \sigma_{\eta\zeta}^2 & \sigma_{\zeta}^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$F = \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(\alpha, \beta, d)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\xi}{\partial\alpha} & \frac{\partial\xi}{\partial\beta} & \frac{\partial\xi}{\partial d} \\ \frac{\partial\eta}{\partial\alpha} & \frac{\partial\eta}{\partial\beta} & \frac{\partial\eta}{\partial d} \\ \frac{\partial\zeta}{\partial\alpha} & \frac{\partial\zeta}{\partial\beta} & \frac{\partial\zeta}{\partial d} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Rešavanjem matrice jednačine (23) dobija se:

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi}^2 &= \zeta^2 \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\xi^2 \eta^2}{\xi^2 + \zeta^2} \sigma_{\beta}^2 + \frac{\xi^2}{d^2} \sigma_d^2 \\ \sigma_{\eta}^2 &= (\xi^2 + \zeta^2) \sigma_{\beta}^2 + \frac{\eta^2}{d^2} \sigma_d^2 \\ \sigma_{\zeta}^2 &= \xi^2 \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\eta^2 \zeta^2}{\xi^2 + \zeta^2} \sigma_{\beta}^2 + \frac{\zeta^2}{d^2} \sigma_d^2 \\ \sigma_{\xi\eta}^2 &= -\xi\eta \sigma_{\beta}^2 + \frac{\xi\eta}{d^2} \sigma_d^2 \\ \sigma_{\xi\zeta}^2 &= -\xi\zeta \sigma_{\alpha}^2 + \xi\zeta \frac{\eta^2}{\xi^2 + \zeta^2} \sigma_{\beta}^2 + \frac{\xi\zeta}{d^2} \sigma_d^2 \\ \sigma_{\xi\eta\zeta}^2 &= -\eta\zeta \sigma_{\beta}^2 + \frac{\eta\zeta}{d^2} \sigma_d^2 \end{aligned} \quad (26)$$

Matrica kovarijansi grešaka merenja u startnom koordinatnom sistemu RXYZ, dobija se uvođenjem matrice rotacije lokalnog geodetskog koordinatnog sistema u referentni geodetski koordinatni sistem B_n i matrice C, za rotaciju referentnog geodetskog koordinatnog sistema Rxyz u startni sistem RXYZ:

$$V_x = C B_n V_{\xi} B_n^T C^T \quad (27)$$

Ocena grešaka merenja mernog sistema

Analiza mogućnosti praćenja leta određenih ciljeva pomoću postojećeg mernog sistema, ili pri formiranju novog mernog sistema, zahteva ocenjivanje grešaka merenja mernog sistema. Primenom jednačina za određivanje matrica varijansi za svako pojedinačno merenje položaja cilja moguće je odrediti srednju kvadratnu grešku određivanja koordinata i drugih parametara leta u funkciji vremena. Tako se za svaku kinematsku veličinu kretanja cilja može odrediti srednja kvadratna greška njenog određivanja u bilo kom trenutku.

Jednačine za određivanje matrica varijansi omogućavaju da se za unapred pretpostavljenu putanju ili ravan kretanja cilja, ocene greške merenja u funkciji položaja cilja u prostoru. Srednje kvadratne greške određivanja koordinata su funkcije koordinata tačke u prostoru obuhvaćenom merenjem:

$$\sigma_{x,y,z} = f(X, Y, Z) \quad (28)$$

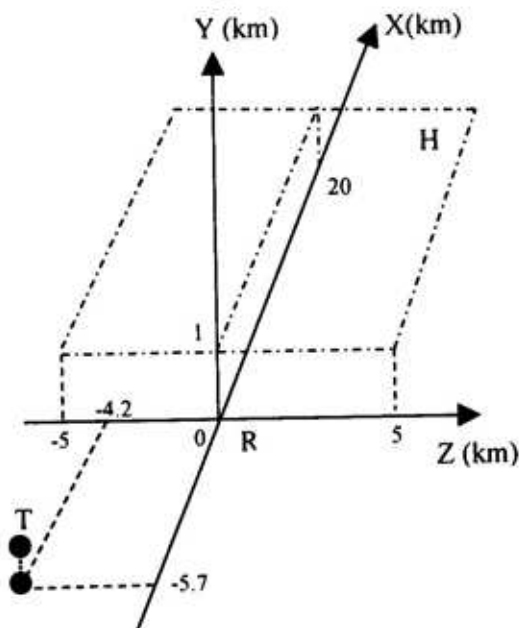
Ako se let cilja na delu putanje odvija u horizontalnoj ravni, na određenoj visini $Y = H$, tada se variranjem vrednosti za X i Z mogu dobiti vrednosti srednje kvadratnih grešaka određivanja parametara leta cilja u toj ravni. Na osnovu izračunatih vrednosti srednje kvadratnih grešaka, u izabranoj ravni, mogu se nacrtati takozvani konturni dijagrami, odnosno krive u kojima su vrednosti srednje kvadratnih grešaka konstantne. Ovakvi dijagrami predstavljaju ocene grešaka merenja za konkretno izabranu konfiguraciju mernog sistema i služe za analizu tačnosti merenja pri izboru merne

opreme, izboru rasporeda merne opreme, ili izboru mogućih putanja leta cilja, u toku planiranja PA odbrane.

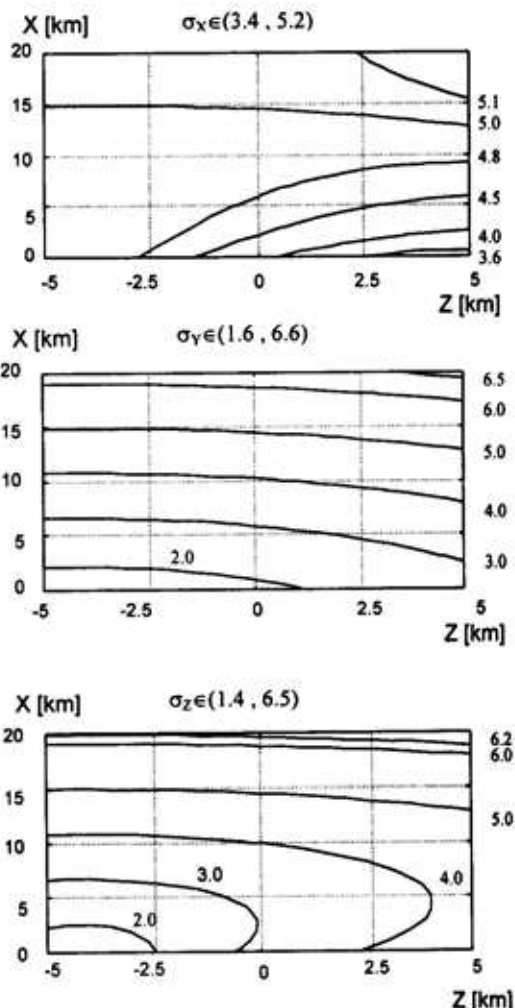
Simulacija grešaka određivanja koordinata cilja u horizontalnoj ravni

Primenom jednačina za određivanje matrica varijansi izvršena je numerička simulacija određivanja grešaka merenja u funkciji koordinata trenutnog položaja cilja u prostoru.

Pri praćenju cilja koji se kreće u horizontalnoj ravni XZ u oblasti: $X \in [0, 20000 \text{ m}]$ i $Z \in [-5000 \text{ m}, 5000 \text{ m}]$ na visini od $Y = 1000 \text{ m}$ vrednosti srednje kvadratne greške koordinata određene su u funkciji položaja cilja i nacrtani su konturni dijagrami rasporeda grešaka, pri čemu su usvojene sledeće vrednosti koordinata mernog instrumenta:



Sl. 6 – Položaj mernog instrumenta T i oblasti merenja koordinata u ravni H : $Y = 1000 \text{ m}$

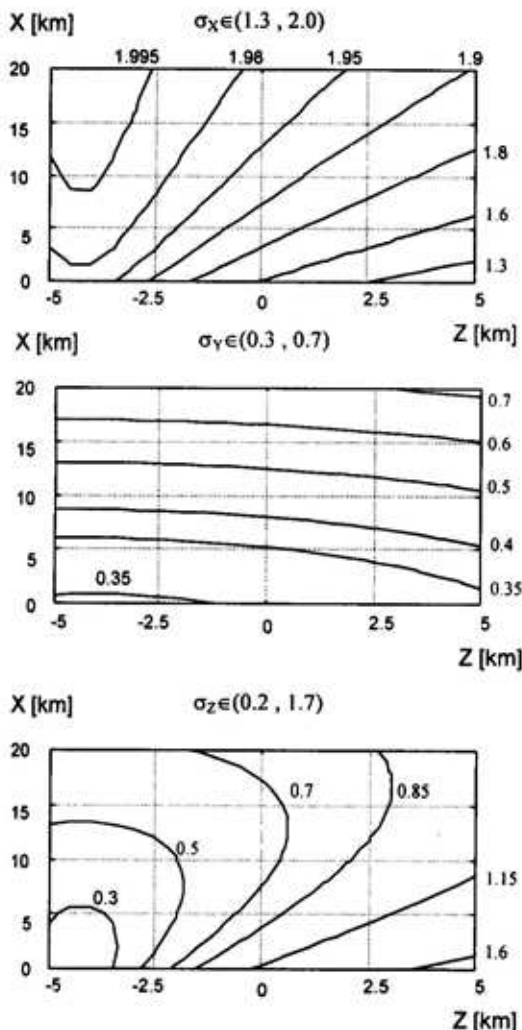


Sl. 7 – Srednje kvadratne greške određivanja koordinata u horizontalnoj ravni XZ za $Y = 1000 \text{ m}$, pri merenju pozicije pomoću radara

$X = -5700 \text{ m}$, $Y = 1000 \text{ m}$, $Z = -4200 \text{ m}$

Srednje kvadratne greške određivanja koordinata položaja cilja u referentnom koordinatnom sistemu određene su za sledeće uslove:

– putanja cilja meri se pomoću radara, pri čemu je poznato da srednje kvadratne greške merenja uglova i daljine iznose:



Sl. 8 – Srednje kvadratne greške određivanja koordinata u horizontalnoj ravni XZ za $Y = 1000$ m, pri merenju pozicije pomoću OENU sa laserskim daljinomerom

$$\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 50'' \text{ i } \sigma_d = 5 \text{ m}$$

Putanja cilja meri se pomoću optičko-elektronskog nišanskog uređaja sa laserskim daljinomerom (OENUL), pri čemu srednje kvadratne greške merenja uglova azimuta, elevacije i daljine položaja cilja u prostoru iznose:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\sigma_{\alpha_s}^2 + \sigma_{\Delta\alpha}^2} = \sqrt{5^2 + 2^2} = \sqrt{29} (")$$

$$\sigma_\beta = \sqrt{\sigma_{\beta_s}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2} = \sqrt{5^2 + 2^2} = \sqrt{29} (")$$

$$\sigma_d = 2 \text{ m}$$

Za $\sigma_{\Delta\alpha}$ i $\sigma_{\Delta\beta}$ usvojeno je da iznose $2''$, saglasno dijagramima na slikama 4 i 5, a ostale vrednosti su poznate karakteristike sistema.

Proračun srednje kvadratnih grešaka određivanja koordinata urađen je na bazi jednačina izvedenih u prethodnom poglavlju, simulacijom na računaru, a dobijeni dijagrami dati su na slikama 7 i 8.

Analizom datih dijagrama može se zaključiti da se veća tačnost postiže pri merenju teodolitom sa laserskim daljinomerom ($\sigma_x = 1,95$ m, $\sigma_y = 0,7$ m, $\sigma_z = 0,7$ m). Kod merenja radarom, na 20 km daljine srednje kvadratne greške određivanja koordinata znatno su veće (iznose $\sigma_x = 5,2$ m, $\sigma_y = 6,5$ m, $\sigma_z = 6,5$ m), zato što su greške određivanja uglova i daljine kod radara veće nego kod OENU sa laserom.

Zaključak

Kvalitet merenja položaja cilja, u toku postupka njegovog praćenja, bitno utiče na uspešnost ocenjivanja kinematskih parametara kretanja cilja, a time i na efikasnost sistema za upravljanje vatrom.

U radu je predložena metodologija analize uticaja grešaka merenja na tačnost određivanja koordinata cilja koji se prati u realnom vremenu. Predloženi algoritam može se, uz pomoć savremene tehnologije, iskoristiti u brojnim primenama za povećanje verovatnoće pogađanja u sistemima za upravljanje vatrom, u povećanju kvaliteta ispitivanja sistema za praćenje

ciljeva i u optimizaciji lociranja sistema za protivvazdušnu odbranu sa ciljem povećanja njene efikasnosti.

Uz pomoć prigodnog matematičkog aparata izvršena je analiza uticaja grešaka merenja pozicije cilja i uticaja šuma na tačnost određivanja koordinata cilja u toku praćenja. U analizi je pretpostavljeno da su greške merenja uglova azimuta i elevacije i daljine cilja fiksne, zatim, da slučajne greške imaju Gausovu raspodelu i da međusobno nisu korelisane, dok su sistemske merne greške isključene. Navedene pretpostavke olakšale su analizu, a nisu značajnije uticale na njen kvalitet.

Na osnovu izvršene analize i datih dijagrama raspodele grešaka merenja u praćenju cilja, mogu se izvesti opšti zaključci da tačnost merenja pozicije cilja zavisi ne samo od grešaka merenja azimuta, elevacije i daljine cilja, nego i od trajektorije leta cilja, kao i od razmeštaja uređaja za merenje pozicije cilja.

Budući rad na opisanom pristupu može se razvijati u dva pravca. Jedan podrazumeva analizu uticaja grešaka merenja na tačnost određivanja koordinata praćenog cilja u modelima koji su bliži realnim uslovima, a drugi aplikaciju prikazanog. Od širokog spektra mogućih primena posebnu pažnju zaslužuje primena ovog pristupa u razvoju sistema za upravljanje vatrom sa ciljem povećanja verovatnoće pogodaka.

Literatura:

- [1] Ugarak, D.: Određivanje pozicije cilja mernom opremom sa Zemlje, Stručni skup, Ispitivanje kvaliteta sredstava NVO, Tehnički opitni centar Beograd, 2003.
- [2] Ugarak, D.: Problemi merenja performansi raketnih sistema u toku ispitivanja opremom sa zemlje, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [3] Debeljković, D.: Stohastički linearni sistemi automatskog upravljanja, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [4] Milinović, M., Dodić N.: Modeliranje sistema upravljanja vatrom i praćenja vazdušnih ciljeva, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [5] CONTRAVES: SKYTRACK Cinetheodolite Concept, Zurich, 1989.
- [6] RCA: NIDIR Digital Instrumentation Radar, Radar set AN/TPQ, 1987.