

IZBOR KOORDINATNIH SISTEMA ZA PRAĆENJE CILJEVA U MULTISENZORSKOM OKRUŽENJU

UDC: 623.593.5.024 ; 623.4.084.7 ; 681.586

Rezime:

Rad ukazuje na probleme koji se pojavljuju pri izboru koordinatnih sistema, u slučaju kada treba da se prati mnoštvo ciljeva uz korišćenje više senzora. U savremenim sistemima za praćenje ciljeva ovaj proces je zasnovan na rezultatima dobijenim pomoću algoritama za procenu stanja cilja, koji sadrže jednačine kojima se opisuje kretanje cilja i proces merenja. Postojanje različitih koordinatnih sistema zahteva izvršenje odgovarajućih transformacija tokom procesa estimacije stanja. Kod nekih algoritama to smanjuje tačnost procene stanja. S obzirom na to da je potrebno obaviti više izračunavanja, može se pojaviti problem implementacije tih algoritama u realnom vremenu. Cilj ovog rada jeste da se istaknu relevantne činjenice koje moraju biti uzete u obzir tokom planiranja i razvoja sistema za praćenje više ciljeva pomoću više senzora.

Ključne reči: automatsko upravljanje, praćenje ciljeva, senzori.

THE CHOICE OF TARGET TRACKING SYSTEM IN MULTIPLE SENSOR SURROUNDING

Summary:

This paper gives an overview of the issues in the choice of a coordinate system in the case when multiple target are tracked using multiple sensors. In modern target tracking systems, tracking is based on results obtained using some of the target state estimation algorithms. These algorithms involve equations describing the target movement and the measurement process. The existence of different coordinate systems requires appropriate transformations in the state estimation process. In some algorithms this decreases the state estimation accuracy. Since numerous calculations have to be done, a problem may occur in real-time implementation of these algorithms. The goal of this paper is to emphasize the relevant facts that must be taken into consideration during the planing and development of multiple targets multiple sensors tracking (MTSTT) systems.

Key words: automatic control, target tracking, sensors.

Uvod

Pri projektovanju sistema za realizaciju procesa praćenja ciljeva u multisenzorskom okruženju pojavljuje se niz pro-

blema, kao što su: izbor senzora, sinhronizacija njihovog rada, odabir algoritama za obradu podataka, definisanje protokola za njihovu razmenu, itd. U nizu zahteva koje pri tome treba ispuniti, pojavljuje

se problem izbora adekvatnih koordinatnih sistema. Rešenje ovog problema treba potražiti kroz analizu karakteristika senzora, analizu uticaja njihove mobilnosti i prostornog razmeštaja, kao i analizu zahteva u pogledu mogućnosti primene konkretnih algoritama za procenu kinematskih stanja cilja.

Značaj multisenzorskog osmatranja prostora

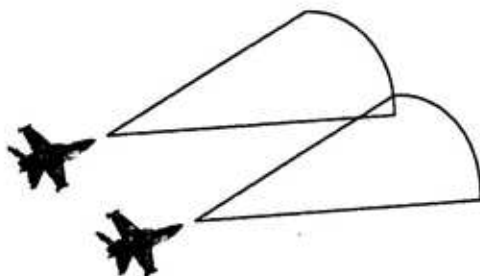
Primenom multisenzorskog osmatranja prostora ostvaruje se:

- proširenje zone osmatranja,
- povećanje verovatnoće otkrivanja cilja,
- povećanje prostorne rezolucije tokom procene koordinata konkretnog cilja,
- podizanje nivoa poverenja u verodostojnost prikupljenih podataka,
- poboljšanje operativne pouzdanosti sistema za osmatranje vazdušnog prostora i dr.

Nabrojani efekti ukazuju na to da se objedinjavanjem podataka koji su prikupljeni u uslovima multisenzorskog osmatranja prostora u suštini rešavaju dva globalna problema, kao što su povećanje „volumena“ korisnih informacija (information augmentation) i ovladavanje nezvesnošću (uncertain managment) [1].

Prvi problem podrazumeva uslove u kojima se zone osmatranja pojedinih senzora ne preklapaju (prostorno i vremenski). U takvoj situaciji svaki senzor, svojim radom, omogućava proširenje ukupne zone osmatranja. Na slici 1 prikazan je primer dva aviona čiji senzori osmatraju susedne zapremine prostora. Treba istaći da se ovakvim objedinjavanjem

prikupljenih podataka ostvaruje kvantitativno povećanje raspoloživih informacija, ali ne i njihov bolji kvalitet.



Sl. 1 – Multisenzorsko proširenje zone osmatranja

Analizirajući problem objedinjavanja prikupljenih podataka sa aspekta odabira najpogodnijeg koordinatnog sistema, treba uočiti nekoliko momenata. Položaj ciljeva definisan je u sfernom koordinatnom sistemu (SKS) koji menja položaj u prostoru zajedno sa letelicom. U tom smislu najpogodnije je prevesti koordinate uočnog cilja u pravougli sistem koordinata čije se ose poklapaju sa osama inercije letelice (body axes system – BKS), a zatim u pokretni sistem koordinata koji je orijentisan tako da mu je x -osa usmerena ka severu, z -osa prema središtu zemlje, a y -osa čini desni pravougli koordinatni sistem sa prethodne dve. U anglosaksonskoj literaturi ovaj sistem se sreće pod nazivom „sever istok dole“ (north east down – NED).

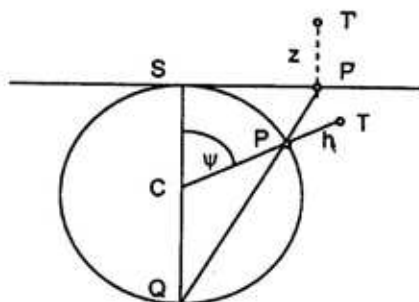
Za konačno objedinjavanje podataka neophodno je poznavanje uzajamnog položaja letelica. Ukoliko se one nalaze na znatnom rastojanju to postaje složen problem. U uslovima primene savremenih tehnologija, kao što je orijentacija uz pomoć satelita (global positioning system – GPS), ovaj problem se relativno lako rešava.

Ovladavanje neizvesnošću, kao što su, na primer, nepoznavanje manevra cilja, greške u proceni njegovih kinematskih stanja, izdvajanje realnih u odnosu na lažne ciljeve, podrazumeva objedinjavanje podataka dobijenih pomoću senzora koji se mogu razlikovati po svojim spektralnim karakteristikama i preciznosti merenja pojedinih parametara ili su distribuirani tako da prate kretanje konkretnog cilja sa različitih lokacija. Pri tome senzori rade u sinhronom ili asinhronom režimu. Na taj način prioritarno se ostvaruje kvalitativno poboljšanje raspoloživih informacija, kao i pouzdaniji rad sistema za osmatranje vazdušnog prostora. Primer takvog sistema predstavlja sprezanje klasičnog impulsnog radara sa pasivnim infracrvenim (IC) senzorom [2]. Radar obezbeđuje kvalitetno merenje rastojanja do cilja, ali ne i dobru preciznost u pogledu određivanja njegovih ugaonih koordinata. S druge strane, pasivni IC senzor obezbeđuje bolje merenje uglova, ali ne i merenje rastojanja. Objedinjavanjem podataka dobijenih od oba senzora dobija se daleko preciznija informacija o položaju konkretnog cilja. S obzirom na to da se oba senzora nalaze na istoj platformi, prikupljanje podataka se ostvaruje u SKS-u, tako da njihovo objedinjavanje ne predstavlja problem. Međutim, u uslovima kada su senzori prostorno distribuirani, izbor koordinatnih sistema postaje nezaobilazni deo analize rada ovih sistema. Pri tome treba imati u vidu dve situacije: kada se senzori nalaze na bliskim rastojanjima, ne većim od 20 do 30 km, i kada su ta rastojanja mnogo veća.

Uticaj prostorne distribucije senzora na izbor koordinatnog sistema

U slučaju senzora koji se nalaze na relativno kratkim rastojanjima praćenje ciljeva se ostvaruje u lokalnim pravouglim sistemima čije su ose međusobno paralelne, a ishodišta im se nalaze na položajima konkretnih senzora. Primenom jednostavnih linearnih transformacija, koordinate ciljeva se lako prevode iz jednog u drugi lokalni pravougli sistem koordinata radi objedinjavanja i dalje obrade. Uspostavljanjem jedinstvenog pravouglonog sistema koordinata koji je „vezan“ za jedan od senzora ili neku tačku prostora koja je određena da bude referenca, lako je odrediti sferne koordinate svakog cilja u odnosu na bilo koju tačku konkretnog prostora.

U slučaju kada su senzori razmešteni na široj teritoriji pojavljuje se problem objedinjavanja njihovih merenja u jedinstvenom koordinatnom sistemu. Objekti koji se na ovaj način prate, na većem delu svoje putanje uglavnom održavaju konstantnu visinu u odnosu na nivo mora, pa je njihov položaj pogodno definisati u vidu x, y koordinata i visine. Imajući u vidu složenost problema koja je uslovljena zakrivljenošću Zemljine povr-

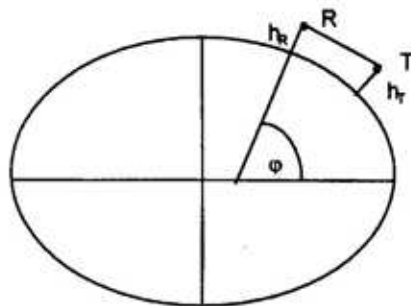


Sl. 2 – Određivanje stereografske projekcije položaja cilja

šine, pri definisanju koordinata ciljeva usvojen je veoma specifičan stereografski sistem koordinata [3–6].

Osnovni princip stereografskog koordinatnog sistema (SGKS) ilustrovan je na slici 2. Ravan ovog sistema dodiruje površinu Zemlje u centru koordinatnog sistema (tačka S). Projekcije svih ciljeva definišu se u odnosu na tačku Q koja je određena presekom prave povučene iz tačke S kroz centar Zemlje C i njene površine. Projekcija cilja T predstavljena je u odnosu na SGKS tako što se prvo odredi projekcija P stvarne pozicije cilja T na površini Zemlje, a zatim se povlačenjem linije kroz tačke Q i P određuje projekcija cilja P' u stereografskoj ravni. Na taj način dobijaju se x, y koordinate u stereografskoj ravni. Koordinata z (visina) odgovara visini cilja u odnosu na površinu Zemlje h_T .

Za preciznije određivanje koordinata trebalo bi koristiti elipsoidni model Zemlje (slika 3).



Sl. 3 – Određivanje položaja cilja pri elipsoidnom modelu Zemlje

Tačka R predstavlja položaj radara na geodetskoj širini φ i visini h_R . Cilj T nalazi se na visini h_T , na udaljenosti RT u odnosu na položaj radara. Ne postoji izraz, u zatvorenom obliku, za određivanje

geodetske širine tačke T na osnovu kose daljine, azimuta i visine.

Za potrebe praćenja uočenog cilja u stereografskom sistemu neophodna su tri koraka. Merenja se prvo konvertuju u lokalni stereografski sistem čiji je centar smešten na položaju radara. Dobijene koordinate zatim se konvertuju u glavni stereografski sistem koordinata. Na kraju se greške merenja koordinata konvertuju u kovarijansu greški merenja, definisanu u odnosu na glavni SGKS. Očigledno, u pitanju je veoma kompleksan skup jednačina koje su neophodne kako bi se izvršile odgovarajuće transformacije.

Izbor koordinatnog sistema prema algoritmima za estimaciju kinematskih stanja cilja

Primena algoritama za obradu podataka prikupljenih u procesu merenja, u nekom od brojnih modaliteta Kalmanovog filtra [7–12], postala je svojevrstan standard pri realizaciji sistema za praćenje uočenih objekata. U razvoju konkretnog algoritma polazi se od dve jednačine. Prva od njih opisuje model kretanja cilja, a druga proces merenja. U najopštijem slučaju obe jednačine su nelinearne i mogu se zapisati kao:

$$X(k+1) = f[k, X(k), U(k), w_p(k)] \quad (1)$$

$$Z(k) = h[k, X(k), w_m(k)] \quad (2)$$

gde su:

X – vektor kinematskih stanja cilja,

U – poznata pobuda,

Z – vektor merenja,

f – vektorska funkcija kojom se opisuju kretanje cilja,

h – vektorska funkcija kojom se opisuje proces merenja,

w_p – vektor šuma procesa koji opisuje neodređenost trajektorije cilja uslovljenu njegovim slučajnim manevrom,

w_m – vektor šuma kojim se opisuje kvalitet, odnosno preciznost merenja,

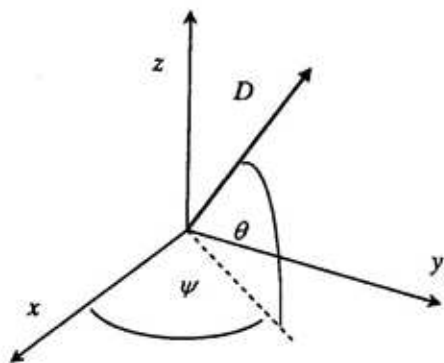
k – diskretna vremenska promenljiva.

Izvođenje jednačina Kalmanovog filtra detaljno je prikazano u literaturi [13–15], tako da se u ovom tekstu navode samo konačne jednačine njegovog algoritma. U zavisnosti od toga kako je u konkretnom algoritmu opisano kretanje cilja, kao i sam proces merenja, jednačine (1) i (2) se pojavljuju u linearnom ili nelinearnom obliku.

Ukoliko se za proces praćenja, kao na slici 4, odabere Dekartov koordinatni sistem (*DKS*) sa ishodištem u položaju senzora, predikcija x koordinate cilja izračunava se na osnovu dobro poznate linearne jednačine;

$$x(k+1) = x(k) + Tv_x(k) + \frac{T^2}{2} a_x(k) \quad (3)$$

Pri tome je T perioda odabiranja, a v_x i a_x brzina i ubrzanje cilja u smeru x -ose.



Sl. 4 – Geometrijski odnosi između sfernog i pravouglog koordinatnog sistema

Usvajanjem promenljivih x , v_x i a_x za elemente vektora stanja, kao i matrice prelaza

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

jednačina (1) pojavljuje se u linearnom obliku

$$\bar{X}(k+1) = F\hat{X}(k) + U(k) \quad (5)$$

gde su:

$\hat{X}(k)$ – ažurirana procena stanja u trenutku k ,

$\bar{X}(k+1)$ – predikcija stanja u trenutku $k+1$,

$U(k)$ – poznati deterministički ulaz, kao što je npr. relativna promena položaja cilja uzrokovana manevrom objekta na kojem je smešten senzor.

Istovetan model primenjuje se i u slučaju preostale dve koordinate cilja.

Ukoliko se kao vektor merenja $Z = [x \ y \ z]^T$ usvoje koordinate cilja u *DKS* i jednačinu merenja (2) moguće je opisati u linearnom obliku

$$Z(k+1) = HX(k+1) \quad (6)$$

pri čemu H predstavlja matricu merenja. S obzirom na to da se u slučaju radara, kao rezultat merenja, dobijaju daljina, azimut i elevacija, odnosno sferne koordinate cilja (*SKS*) u odnosu na položaj senzora, neophodno je izvršiti njihovu konverziju u *DKS* na osnovu transformacija opisanih jednačinama (7a–7c):

$$x = D \cos \psi \cos \vartheta \quad (7a)$$

$$y = D \sin \psi \cos \vartheta \quad (7b)$$

$$z = D \sin \vartheta \quad (7c)$$

Ažuriranje nove vrednosti vektora stanja obavlja se korišćenjem jednačine

$$\hat{X}(k+1) = \bar{X}(k+1) + W(k+1)[Z(k+1) - \bar{Z}(k+1)] \quad (8)$$

Vrednosti predikcije merenja $\bar{Z}(k+1)$ i matrice Kalmanovog pojačanja $W(k+1)$ dobijaju se u skladu sa sledećim jednačinama:

$$\bar{Z}(k+1) = H\bar{X}(k+1) \quad (9a)$$

$$\bar{P}(k+1) = F \cdot \hat{P}(k) \cdot F^T + Q \quad (9b)$$

$$S(k+1) = H(k+1) \cdot \bar{P}(k+1) \cdot H^T(k+1) + R \quad (9c)$$

$$W(k+1) = \bar{P}(k+1) \cdot H^T(k+1) + S^{-1}(k+1) \quad (9d)$$

$$\hat{P}(k+1) = \bar{P}(k+1) - W(k+1) \cdot H(k+1) \cdot \bar{P}(k+1) \quad (9e)$$

gde su:

$\hat{P}(k+1)$, $\hat{P}(k+1)$ – ažurirana i predviđena kovarijaciona matrica greški procena stanja,

$S(k+1)$ – kovarijaciona matrica inovacione sekvence $[Z(k+1) - \bar{Z}(k+1)]$,

Q i R – kovarijacione matrice šumova procesa i šumova merenja.

Na prvi pogled prikazano rešenje sasvim je prihvatljivo s obzirom na to da obezbeđuje jednostavnu implementaciju algoritma. Međutim, detaljnijom analizom uočavaju se dva ozbiljna nedostatka [16].

Prvi problem proističe iz zahteva da podatak o daljini cilja bude obavezno raspoloživ, kako bi se mogle izvršiti konverzije podataka iz sfernog u Dekartov sistem koordinata. U slučaju individualnog korišćenja IC senzora ovaj podatak nije raspoloživ.

S druge strane, u slučaju da se praćenje ostvaruje u DKS , greške merenja postaju međusobno korelisane, bez obzi-

ra na to što su u izvornom koordinatnom sistemu merenja međusobno nezavisne. Pri opisu kovarijacione matrice šuma merenja R_S u SKS , pretpostavlja se da statističke karakteristike šumova odgovaraju sekvencama belog Gaussovog šuma, sa nultim srednjim vrednostima, i standardnim devijacijama $\sigma_R^2 \sigma_\psi^2 \sigma_\theta^2$, tako da matrica R_S ima dijagonalnu formu:

$$R_S = \text{diag} [\sigma_R^2 \sigma_\psi^2 \sigma_\theta^2] \quad (10)$$

Imajući u vidu da su merenja u DKS definisana na osnovu transformacija (7a–7c) Jakobijan transformacije iz sfernih u Dekartove koordinate, J_{DS} se definiše kao:

$$J_{DS} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\vartheta & -D \sin\psi \cos\vartheta & -D \cos\psi \sin\vartheta \\ \sin\psi \cos\vartheta & D \cos\psi \cos\vartheta & -D \sin\psi \sin\vartheta \\ \sin\vartheta & 0 & D \cos\vartheta \end{bmatrix} \quad (11)$$

pa se kovarijaciona matrica šuma merenja u DKS izračunava kao:

$$R = J_{DS} R_S J_{DS}^T \quad (12)$$

Očigledno je da su vandijagonalni elementi matrice R različiti od nule, što otežava izračunavanje odgovarajuće inverzne matrice u jednačini (9d) za Kalmanovo pojačanje. Vrednosti njenih elemenata izračunavaju se tokom samog procesa praćenja, u realnom vremenu, na osnovu podataka o daljini D , uglu azimuta ψ i elevaciji ϑ .

Alternativni pristup problemu omogućava direktno uvođenje izmerenih vrednosti u vidu nelinearnih merenja u jednačinu za ažuriranje stanja (8). S obzirom na to da vektor merenja $Z = [D \psi \vartheta]^T$ u ovom slučaju sadrži podatke o daljini,

azimutu i elevaciji cilja, neophodno je uvesti predikcije njihovih vrednosti:

$$\bar{D} = [\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2]^{1/2} \quad (13a)$$

$$\bar{\psi} = \tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x}) \quad (13b)$$

$$\bar{\vartheta} = \tan^{-1}\left(\left([\bar{x}^2 + \bar{y}^2]^{1/2}\right)/\bar{D}\right) \quad (13c)$$

Jednačina merenja (2) ostaje nelinearna, pa je u odgovarajućim jednačinama filtra (9c–9e) neophodno uvesti matricu H koja se u konkretnom slučaju izračunava kao Jakobijan

$$H = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}(k+1)} \quad (14)$$

na osnovu parcijalnih derivacija jednačina (13a–13c).

Novodobijena forma algoritma poznata je pod nazivom prošireni Kalmanov filter. Imajući u vidu nelinearnost merenja, kao i nemogućnost raspredanja filtra zbog prirode Jakobijana (14) (na primer, parcijalna derivacija elevacionog ugla ϑ sadrži derivative u smeru sve tri ose DKS), numerička realizacija filtra postaje složenija, a može se očekivati i veća osetljivost na greške u proceni inicijalnih vrednosti kinematskih stanja cilja, kao i kovarijacione matrice greške procene stanja P .

Treći mogući pristup zasniva se na prevođenju estimiranih stanja ciljeva, kao i odgovarajućih kovarijacionih matrica, iz pravouglog sistema u koordinatni sistem senzora. Nakon ažuriranja vrednosti unutar odgovarajućeg filtra, novodobijene procene stanja se prevode, kao i odgovarajuća kovarijaciona matri-

ca, ponovo u pravougli koordinatni sistem. S obzirom na to da je neophodno izvršiti dve transformacije, ovaj metod se smatra nepraktičnim u odnosu na prethodna dva, ali je neizbežan u nekim situacijama, kao na primer u slučaju IMM (interactive-multiple-model) algoritma.

Osnovna ideja ovog algoritma ogleda se u paralelnom korišćenju filtra sa različitim modelima kretanja cilja. Ceo algoritam izvršava se u vidu ciklične strukture sastavljene od četiri osnovna koraka a to su:

1. *Formiranje ulaznih procena (interaaction)*. Ovaj korak je tipičan za IMM algoritam. Svaki ciklus otpočinje kombinovanjem poslednjih procena stanja $\hat{x}_i(t-1)$, kao i kovarijacionih matrica $P_i(t-1)$, uz upotrebu odgovarajućih težinskih koeficijenata p_{ij} i μ_i , kako bi se formirali podaci $(\hat{x}_j^0(t-1), P_j^0(t-1))$ za filter zasnovan na modelu $M_j(t)$, ($1 \leq j \leq N$):

$$\hat{x}_j^0(t-1) = \sum_{i=1}^N \hat{x}_i(t-1) \frac{p_{ij}\mu_i(t-1)}{c_j} \quad (15)$$

$$P_j^0(t-1) = \sum_{i=1}^N \frac{p_{ij}\mu_i(t-1)}{c_j} [P_i(t-1) + (\hat{x}_i(t-1) - x_i^0(t-1))(\hat{x}_i(t-1) - x_i^0(t-1))^T] \quad (16)$$

pri čemu

$$c_j = \sum_{i=1}^N p_{ij}\mu_i(t-1) \quad (17)$$

predstavlja normalizacionu konstantu. Koeficijent p_{ij} označava verovatnoću prelaska sa modela M_i u ($t-1$) na model M_j u trenutku (t), a $\mu_i(t-1)$ predstavlja vred-

nost odgovarajućeg težinskog koeficijenta. Tako je u okviru N novodobijenih procena ($\hat{x}_j^0(t-1), P_j^0(t-1)$) ostvareno povezivanje hipoteza o validnosti svakog modela M_j .

2. *Obrada podataka u Kalmanovim filtrima.* U ovom koraku svaki filter generiše nove procene $\hat{x}_i(t-1)$ i $P_i(t-1)$ u skladu sa svojim modelom kretanja cilja $M_i (1 \leq i \leq N)$.

3. *Izračunavanje težinskih koeficijenata.* Na osnovu funkcije gustine verovatnoće

$$\Lambda_j(t) = \frac{1}{\left[(2\pi)^n |S_j(t)| \right]^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \eta_j^T(t) S_j^{-1}(t) \eta_j(t) \right] \quad (18)$$

gde je:

$\eta_j(t)$ – inovacija (razlika izmerenih i očekivanih vrednosti),

n – dimenzija merenja,

$S_j(t)$ – matrica kovarijanse sekvence inovacija u filtru sa modelom M_j ,

težinski koeficijenti se izračunavaju kao:

$$\mu_j(t) = \frac{\Lambda_j(t) \cdot c_j}{\sum_{j=1}^N \Lambda_j(t) \cdot c_j} \quad (19)$$

4. *Formiranje konačne procene.*

Kombinacijom pojedinačnih procena, dobijenih na izlazima svih filtera, formira se konačna procena stanja:

$$\hat{x}(t) \equiv \sum_{j=1}^N \hat{x}_j(t) \mu_j(t) \quad (20)$$

Sličnim postupkom dobija se i odgovarajuća kovarijaciona matrica greški procena stanja:

$$P(t) = \sum_{j=1}^N \mu_j(t) [P_j(t) + (\hat{x}_j(t) - \hat{x}(t)) (\hat{x}_j(t) - \hat{x}(t))^T] \quad (21)$$

Ukoliko se pretpostavi realizacija IMM algoritma tako što su usvojena tri modela kretanja cilja u horizontalnoj ravni [17]:

– kretanje konstantnom brzinom (constant velocity – CV) sa vektorom kinematskih stanja $X_C = (x \ v_x \ y \ v_y)^T$,

– Singerov model kretanja [7] sa vektorom kinematskih stanja $X_S = (x \ v_x \ a_x \ y \ v_y \ a_y)^T$,

– kružno kretanje cilja približno konstantnom brzinom v u horizontalnoj ravni sa vektorom kinematskih stanja $X_T = (x \ y \ \psi \ \omega \ v)^T$,

jasno je da nastaje konfliktna situacija s obzirom na to da treba kombinovati vektore stanja koji se razlikuju, kako po broju, tako i po fizičkoj prirodi odabranih elemenata. U konkretnom slučaju problem se rešava transformisanjem vektora stanja koji odgovara modelu kružnog kretanja cilja u horizontalnoj ravni, u jedinstveni format koji odgovara Singerovom modelu kretanja cilja:

$$X_{TC} = (x \ v_{x_C} \ a_{x_C} \ y \ v_{y_C} \ a_{y_C})^T$$

Pri tome su elementi novodobijenog vektora X_{TC} definisani jednačinama:

$$\begin{aligned} v_{x_C} &= v \cos(\psi) & v_{y_C} &= v \sin(\psi) \\ a_{x_C} &= -\omega v_{y_C} & a_{y_C} &= \omega v_{x_C} \end{aligned} \quad (22)$$

U slučaju *CV* modela fizikalna priroda kinematskih stanja cilja identična je prirodi stanja u jedinstvenom formatu, pa se procenjene vrednosti koriste direktno uz pretpostavku da odgovarajuća ubrzanja a_x i a_y ne postoje, odnosno da su njihove vrednosti jednake nuli.

Nakon objedinjavanja odgovarajućih vektora stanja neophodno je izvršiti konverziju dobijenih podataka na osnovu jedinačina (22), ali ovaj put u inverznom obliku, kako bi se mogli koristiti pri reinicijalizaciji filtra sa modelom kružnog kretanja cilja u horizontalnoj ravni. Pri tome treba imati u vidu da je neophodno sprovesti sličan postupak i sa odgovarajućim kovarijacionim matricama stanja cilja P .

Zaključak

U radu je prikazan deo raspoloživih informacija koje se odnose na problematiku izbora koordinatnih sistema, kako bi se ilustrovao značaj razmatranja ovog problema pri projektovanju globalnog sistema za praćenje ciljeva u multisenzorskom okruženju. Konačan izbor očigledno proizlazi iz niza zahteva koje treba ispuniti, posebno kada se ima u vidu mobilnost senzora, njihov prostorni razmeštaj, kao i specifičnost algoritama za estimaciju kinematskih stanja i formiranje trajektorija uočenih ciljeva. U slučaju senzora koji su smešteni na mobilnoj platformi (na primer, bespilotna letelica ili avion) neophodno je obaviti najmanje dve konverzije prikupljenih podataka: iz sfernog u koordinatni sistem, vezan za ose letelice, i konačno u odgovarajući pravougli koordinatni sistem, vezan za neku referentnu tačku na Zemlji, u kojem se objedinjuju podaci sa svih senzora. S

druge strane, kada su u pitanju stacionarni senzori, izbor koordinatnog sistema je uslovljen njihovim prostornim rasporedom. U slučaju da se podaci dobijaju od senzora koji su prostorno udaljeni, tako da zaobljenost Zemlje ima značajniji uticaj, objedinjavanje podataka zahteva primenu stereografskog koordinatnog sistema koji, za razliku od drugih koordinatnih sistema, zahteva primenu niza specifičnih transformacija. Specifičnosti algoritama za estimaciju stanja, kao i numerički zahtevi koji se pojavljuju u tom smislu, takođe unose dodatna ograničenja u pogledu slobode izbora odgovarajućih koordinatnih sistema.

Može se zaključiti da izbor koordinatnog sistema, kada se prati veći broj ciljeva u multisenzorskom okruženju, treba zasnovati na primeni odgovarajuće višekriterijumske analize.

Literatura:

- [1] Lang Hong: Sense Your world better: multisensor/information fusion, Circuits and systems, vol. 10. number 3, September/October 1999.
- [2] A. Houles and Y. Bar-Shalom: Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., vol AES-25, March. 1989, pages 176-188.
- [3] J. J. Burke: Stereographic Projection of radar data in a netted radar system, ESD-TR-73-210, AD 771544, Bedford, MA: The MITRE corporation, Nov. 1973.
- [4] R. G. Mulholland and D. W. Stout: Stereographic projection in the national airspace system, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., vol AES-18, Jan. 1982, pages 48-57.
- [5] E. M. Shank: A coordinate conversion algorithm for multi-sensor data processing, DOT/FAA/PM-86-37, DTIC Report No AD-A176368, Cambridge, MA: MIT Lincoln Laboratory, Aug. 5, 1986.
- [6] S. S. Blackman et al.: Application of multiple hypothesis tracking to multi-radar air defense systems, AGARD Proc. multi-sensor multi-target data fusion, tracking and identification techniques for guidance and control applications, AGARD-AG-37, Oct. 1996.
- [7] R. A. Singer: Estimation optimal tracking performance for manned maneuvering targets, IEEE trans, on Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-6, July 1970, pages 473-483.
- [8] Y. T. Chan, A. G. C. Hu, J. B. Plant: A Kalman filter based tracking scheme with input estimation, IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-15, Mar. 1979, pages 237-244.

- [9] Y. Bar-Shalom and K. Birmiwal: Variable dimension filter for maneuvering target tracking, *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, vol AES-18, Sept. 1982, pages 621–629.
- [10] P. L. Bogler: Tracking a maneuvering target using input estimation, *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, vol AES-23, May 1987, pages 298–310.
- [11] H. A. P. Blom and Y. Bar-Shalom: The interacting multiple-model algorithm for systems with Markovian switching coefficients, *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, vol AES-24, Aug. 1988, pages 780–783.
- [12] J. A. Roecker, C. D. McGillem: Target tracking in maneuver-centered coordinates, *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, vol AES-25, Nov. 1989, pages 836–842.
- [13] A. S. Gelb: *Applied optimal estimation*, Cambridge, MA: MIT Press, 1974.
- [14] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann: *Tracking and data association*, Orlando, FL: Academic Press, 1988.
- [15] A. H. Jazwinski: *Stochastic processes and filtering theory*, New York: Academic Press, 1970.
- [16] S. S. Blackman: *Multiple-target tracking with radar applications*, Artech House, 1986.
- [17] S. S. Blackman and R. Popoli: *Design and analysis of modern tracking systems*, Artech House, 1999.