

## ПРИМЕР ДЕТЕКЦИЈЕ КОНФЛИКТА АВИОНА ПРИМЕНОМ АЛГОРИТМА АСОЦИЈАЦИЈЕ ПОДАТАКА ПО ВЕРОВАТНОЋИ

Звонко Радосављевић, ВТИ Београд, Катанићева 15

**Садржај** – У раду је описана метода детекције конфликта применом асоцијације података по вероватноћи. У основи алгоритма за естимацију је Калманов филтар чији се резидуал ажурира тежинском сумом резидуала, што доводи до корекције коваријационе матрице грешке естимације. Дат је опис алгоритма, вредности одговарајућих параметара и матрица и приказани су симулациони резултати, на примеру две конфликтне ситуације, када се авиони крећу са и без маневра. Скок вероватноће конфликта у тренуцима непосредно пре и у току конфликта показују оправданост избора ове методе за дводимензионално радарско праћења помоћу осматрачког радара

### 1. УВОД

Метод асоцијације или здруживања података везане су за проблем проналажења оптималне корелације између мерења и трајекторија кретања циља. У раду је предложена метода придруживања података по вероватноћи коју су предложили *Y. Bar Shalom* и *W. Blair* [1], а названа је *PDAF (Probabilistic Data Association Filter)*. У основи алгоритма је проналажење максималне вероватноће за сва мерења унутар дефинисаног прозора (гејта) односно минималне дистанце између свих мерења (циљеви, клатери и лажни аларми) унутар прозора и предикције циља из претходне секвенце података. Ова апликација дозвољава праћење циљева са широким опсегом маневра помоћу осматрачких *TWS (Track While Scan)* радара, у чијој основи је коришћење стандардног Калмановог филтра.

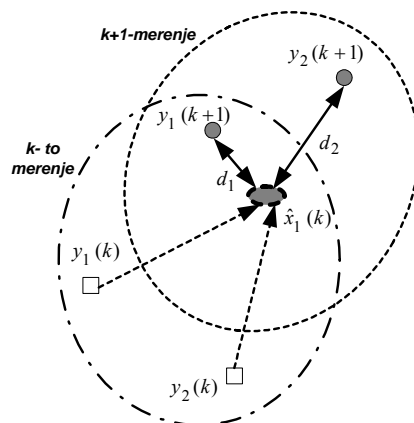
### 2. ОПИС PDA АЛГОРИТМА

У раду је описан једноставан случај где се у сваком скену (опсервацији) појављују два трага, као што је показано на Сл. 1. За сваки траг се израчунава предикција, при чему се само један од трагова третира као циљ. Ради лакшег разумевања алгоритма, појмимо од генералне поставке проблема, т.ј. да у једној секвенци (пролазу) са радара стиже укупно  $M(k)$  опсервација. Према литератури [2], у  $k$ -том скенирању налази се унутар гејта скуп опсервација:

$$y_i(k), \quad i=1,2,\dots,M(k) \quad (1)$$

односно скуп свих измерених података до тренутка (скена)  $k$ :

$$Y(k) = \{y_i(k)\}_{i=1}^{M(k)} \quad (2)$$



Сл 1. Илустрација PDA алгоритма за случај једног трага и две опсервације или као скуп свих кумулативних опсервација до тренутка  $t$  као:

$$Y(k) = \{Y(k), Y(k-1), Y(k-2), \dots\} \quad (3)$$

У овој методи, придруживање заснива на познавању претходних вредности мерења. Први корак представља израчунавање вероватноћа појединих хипотеза. Ако се будућа стања могу апроксимирати Гаусовом расподелом вероватноћа, тада се она може представити:

$$p(x(k)|Y(k-1)) = N[x(k); \hat{x}(k|k-1), P(k|k-1)] \quad (4)$$

Ако ова вероватноћа обухвата два партикуларна случаја (догађаја) или хипотезе:

$$H_0(k) = \{Ni \text{ jedna opservacij a ne pripada cilju}\} \quad (5)$$

$$H_i(k) = \{Izmerena opservacija pripada cilju\} \quad (6)$$

са одговарајућим вероватноћама:

$$p_i(k) = P_r \{H_i(k)|Y(k)\}, \quad i=0,1,\dots,M(k) \quad (7)$$

при чему су ове хипотезе међусобно искључиве, односно да је њихова укупна вероватноћа:

$$\sum_{i=0}^{M(k)} p_i(k) = 1 \quad (8)$$

односно израз за естимацију циља коришћењем теореме о тоталној (укупној) вероватноћи постаје:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|k) &= E\{x(k)|Y(k)\} = \sum_{i=0}^{M(k)} E\{x(k), H_i(k), Y(k)\} p_r \{H_i(k)|Y(k)\} = \\ &= \sum_{i=0}^{M(k)} E\{x(k), H_i(k), Y(k)\} p_i(k) = \sum_{i=0}^{M(k)} x_i(k|k) p_i(k) \end{aligned} \quad (9)$$

где је  $x_i(k|k)$  стање које се ажурира на основу догађаја  $H_i(k)$ , где је  $y_i(k)$  вредност мерења у тренутку  $k$ . Следећи корак представља спрезање појединих хипотеза. Под претпоставком да је у почетном тренутку, када нема мерења, предикција дата као чиста естимација :

$$x_0(k|k) = \hat{x}(k|k-1) \quad (10)$$

израз за предикцију будућег стања, на основу дефиниције Калмановог филтра, за  $i = 1, 2, \dots, M(k)$ , добија се:

$$x_i(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)r_i(k) \quad (11)$$

Ако је  $h$ -матрица мерења, тада је  $r_i(k)$ -резидуал потребан за спрезање хипотеза дат помоћу израза:

$$r_i(k) = y_i(k) - h * x_i(k|k-1) \quad (12)$$

Комбинацијом горњих једначина, под претпоставком да не постоји почетна неодређеност мерења добијамо израз за предикцију :

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)r(k) \quad (13)$$

где је тежинска сума резидуала дата помоћу израза :

$$r(k) = \sum_{i=0}^{M(k)} p_i(k)r_i(k) \quad (14)$$

односно, ажурирана коваријациона матрица дата је помоћу израза:

$$P(k|k) = p_0(k)P(k|k-1) + (1 - p_0(k))P^c(k|k) + \tilde{P}(k|k) \quad (15)$$

при чему је:

$$P^c(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1) \quad (16)$$

$$\tilde{P}(k|k) = K(k) \left[ \sum_{i=1}^{M(k)} p_i(k)r_i(k)(r_i(k))' - r(k)r(k)' \right] K'(k) \quad (17)$$

На основу претходних израза (15), (16) и (17) може се дефинисати здружена вероватноћа  $p_i(k)$  за све хипотезе [2]:

$$\begin{aligned} p_i(k) &= P_r \{ H_i(k) | \mathbf{Y}(k) \} = \\ &= P_r \{ H_i(k) | Y(k), M(k), \mathbf{Y}(k) \}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, M(k) \end{aligned} \quad (18)$$

а укључујући Бајесов критеријум вероватноће у (18), добијамо израз за густину вероватноће:

$$\begin{aligned} p(Y_i(k) | H_i(k), M(k), \mathbf{Y}(k)) &= \\ &= P_G^{-1} N[y_i(k); h(k|k-1), S(k)] = P_G^{-1} N(r_i(k); 0, S(k)) \end{aligned} \quad (19)$$

где је  $P_G$ -вероватноћа да се мерење које је стигло у посматраној периоди налази унутар гејта а  $S$ -коваријациона матрица резидуала. Први фактор у једначини (18) се може израчунати помоћу израза:

$$\begin{aligned} p(Y(k) | H_i(k), M(k), \mathbf{Y}(k-1)) &= \\ &= \begin{cases} V_i^{1-M(k)}(k) P_G^{-1} N[r_i(k); 0, S(k)] & i = 1, 2, \dots, M(k) \\ V^{-M(k)}(k), & i = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

где је  $V(k)$  регион који припада области гејта, односно регион очекивања појаве опсервације. Други фактор у поменутој релацији може се израчунати помоћу следећег израза:

$$\begin{aligned} P_r \{ H_i(k) | M(k), \mathbf{Y}(k-1) \} &= P_r \{ H_i(k) | M(k) \} = \\ &= \begin{cases} \frac{1}{M(k)} P_D P_G [P_D P_G + (1 - (P_D P_G) \frac{\mu_F(M(k))}{\mu_F(M(k-1))})^{-1}], & i = 1, 2, \dots, M(k) \\ (1 - P_D P_G) \frac{\mu_f(M(k))}{\mu_f(M(k-1))} [P_D P_G + (1 - (P_D P_G) \frac{\mu_F(M(k))}{\mu_F(M(k-1))})^{-1}], & i = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

где је:

- $\mu_F(M(k))$  функција густине вероватноће лажних аларма
- $P_G$ -вероватноћа да се опсервација од циља налази унутар гејта,
- $P_D$ -вероватноћа детекције циља .

У раду је примењен параметарски модел за израчунавање вероватноћа  $\mu_F(M(k))$  помоћу Поасонове расподеле са параметром  $\lambda V(k)$  која је дата као [3]:

$$\mu_F(M_i) \propto e^{-\lambda V_i} \frac{\lambda^{M(k)}(k)}{M(k)!}, \quad M(k) = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

### 2.1. ОДРЕЂИВАЊЕ ДИМЕНЗИЈЕ ГЕЈТА

За одређивање гејта, одабрана је метода максимизације функције веродостојности придруживања опсервације  $j$  трагу  $i$ . Под претпоставком да је она Гаусовске расподеле може се израчунати као:

$$g_{ij} = \frac{e^{-\frac{d^2(i,j)}{2}}}{2\pi \sqrt{|S_i|}} \quad (23)$$

где је са  $S_i$  дата коваријациона матрица резидуала у  $i$ -тој опсервацији,

$$d^2(i, j) = r'(i, j) S^{-1} r(i, j) \quad (24)$$

Изглед гејта у две суседне секвенце дат је Сл 1.

### 3. ОПИС ПРЕДЛОЖЕНОГ АЛГОРИТМА

Под претпоставком да је угао кретања оба авиона Гаусова функција и константан у току трајања маневра, укупна вероватноћа конфликта се може израчунати као дводимензионална густине вероватноће и једнака је производу две једнодимензионалне функције [4]:

$$\begin{aligned} p(x, y) &= p(x)p(y), \\ p(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \end{aligned} \quad (25)$$

Предложени алгоритам за детекцију конфликта при блиском лету два авиона заснива се на модификацији описаног алгоритма асоцијације података по вероватноћи, с тиме да се у последњем кораку, поред ажурирања

једначине стања и коваријационе матрице уз помоћ одговарајућих тежинских коефицијената, ажурира и такозвани "мод естимације" добијен као максимум свих тежинских коефицијената:

$$\hat{m}(k) = \arg \max_j (\mu_j(k)) \quad (26)$$

Сада се коришћењем матрице веродостојности  $B(k)$  у којој је садржан историјат параметара међусобних стања положаја и брзине свих циљева, естимира вероватноћа међусобног преклапања гејтова појединих авиона, која се може добити као:

$$B_{ij}(k) = [b_1(k) b_2(k) \dots b_N(k)] \quad (27)$$

где је  $N$  - број циљева у  $k$ -том временском тренутку. Матрица  $B(k)$  је двоструко стохастичка, т.ј.

$$\sum_{i=1}^N B_{ij}(k) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^N B_{ij}(k) = 1, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

Развој ове матрице је везан за матрицу прелаза из стања у стање  $C_{ij}(k)$  [4],[7] на следећи начин:

$$B_{ij}(k) = B_{ij}(k-1)C_{ij}(k) \quad (29)$$

Другим речима, остварује се предикција могућег конфликта авиона, у трајању од једне периоде скенирања антене радара, пре настајања конфликта. У случају описаном у раду време "упозорења" износи 5 s. Око авиона се формира заштитна зона која је одређена димензијом гејта за коју је авион безбедан т.ј када се конфликтни авион приближава максималном могућом брзином у правцу посматраног авиона кроз "заштитну зону". Када се конфликтни авион појави у гејту референтног, у матрици

$B_{ij}(k)$  појављује се вероватноћа  $f_{t-n}(k)$  која је везана за приближавања два суседна авиона у тренутку  $k$ , а дефинише се преко нормализованог односа њихових естимираних положаја, која представља функцију конфликта:

$$f_{t-n}(k) = \frac{\hat{x}_t(k) - \hat{x}_n(k)}{\hat{x}_t(k)} \quad (30)$$

тако да она постаје дијагонална матрица:

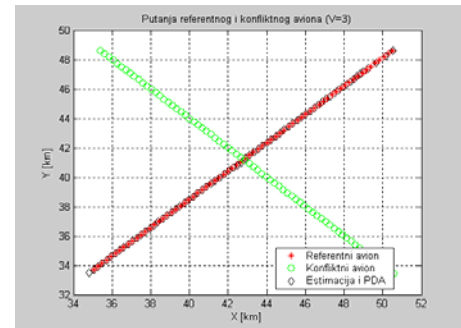
$$B_{ij}(k) = \begin{bmatrix} f_{1-1}(k) & & & \\ & \dots & & \\ & & & f_{N-N}(k) \end{bmatrix}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

На тај начин, проблем се своди на налажење максимума поменуте вероватноће.

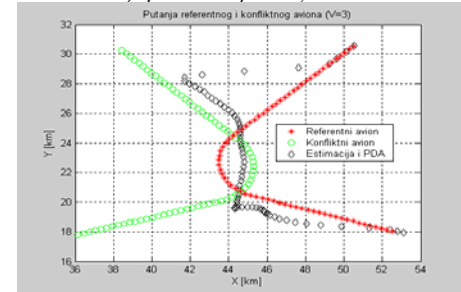
#### 4. СИМУЛАЦИОНИ РЕЗУЛТАТИ

У циљу испитивања ефикасности алгоритма предложеног у литератури [4], креиране су две путање: са и без маневра. Први корак представља коришћење описаног алгоритма придруживања података по вероватноћи. Естимација добијена на тај начин представља ново референтно стање позиције авиона, у односу на које се рачуна вероватноћа

настанка судара два авиона у претходном стању. Авиони лете на истим висинама. Испитан је на две врсте путања, као што показује Сл.2. У првом случају референтни авион се креће праволинијски, почев из горњег левог угла, брзином од **311 m/s**, док се конфликтни авион креће истом брзином из горњег десног угла, тако да им се путање хипотетички секу у 43. скену. У другом случају референтни авион се креће истом брзином и на исти начин, али врши маневар почев од 32. до 44. скена са оптерећењем од **4g**, док се конфликтни авион креће истом брзином али као лик у огледалу у односу на њега, при чему се путање први пут секу на почетку маневра а други пут на крају истог. За димензију гејта [5] је, на основу  $\chi^2$  табеле усвојена вредност 4.6. Подаци о лету стижу са радара чија је периода окретања антене 5 s. Путања добијена алгоритмом асоцијације података по вероватноћи и естимацијом положаја помоћу стандардног Калмановог филтра 6. реда, је приказана на овој слици. **RMSE (Root Mean Square Error)** по растојању дат је на Сл.3.

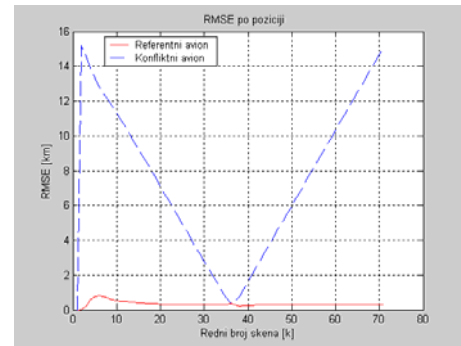


а) праволинијска путања



б) путања са маневром

Сл. 2 Путање референтног и конфликтног авиона

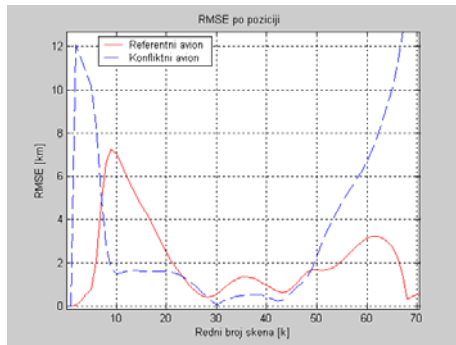


а) праволинијска путања

Сл. 3. Средња квадратна грешка позиције

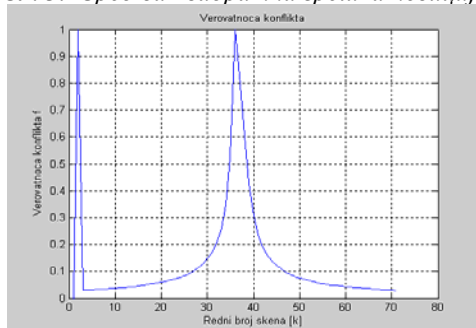
Резултати са Сл.3 показују да при маневру алгоритам асоцијације остварује баланс између путања, кад су оба авиона у гејту као што је описано у литератури [2]. Ово ствара забуну при детекцији конфликта, али вероватноћа конфликта преко матрице веродостојности отклања ову

забуну, тако да је максимална вредност вероватноће конфликтне ситуација дата на *Сл. 4.*

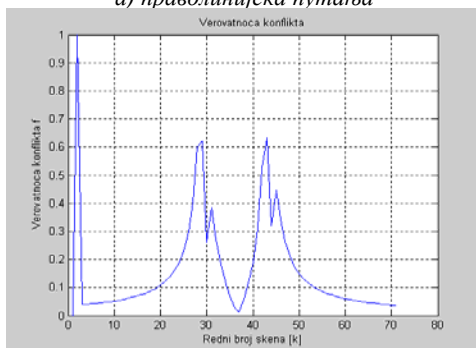


б) путања са маневром

Сл. 3. Средња квадратна грешка позиције



а) праволијска путања



б) путања са маневром

Сл. 4. Вероватноћа конфликта

У случају праволијског кретања, када се вектори брзина у сваком тренутку поклапају са правцем кретања вероватноћа конфликта достиже вредност "1" (*Сл. 4а*). У случају кретања са маневром, када се естимирани вредности вектора брзине мењају по правцу у свакој периоди скенирања уочава се смањена вероватноћа конфликта, и у примеру датом у раду износи око "0.6" (*Сл. 4б*). Ова чињеница захтева детаљније истраживање матрице конфликта и објашњење утицаја маневра на поменути матрицу, што ће бити предмет даљег истраживања. Постојање два блиска максимума вероватноћа (*Сл. 4б*) указује на два могућа конфликта. "Искрзаност" у максимумима вероватноћа објашњава се резидуалном грешком коју уноси *PDA* филтар [4]. Упоредне анализе треба да обухвате испитивање ефикасности алгоритма праћења и асоцијације података помоћу алгоритма већег броја хипотеза (*MHT- Multi Hypothesis Tracking*) као што је предложено у литератури [6] и [7].

## 5. ЗАКЉУЧАК

У раду је дат опис и сумулациони резултати методе за откривање конфликтних ситуација која је заснована на алгоритму асоцијације података по вероватноћи, при блиском лету два авиона. Када се у гејту посматраног авиона појави авион који може да угрози сигурност лета посматраног авиона, тада се укључује аларм управљан функцијом конфликта. Изведена је функција конфликта и предложена метода за откривање ових ситуација током лета. Потврђена је тачност методе на основу упоређивања са познатим параметрима током лета авиона. Предложена је *PDA* метода здруживања трагова и дати су математички модел и симулациони резултати примене ове методе за податке који се добијају са осматрачког радара. У једној секвенци са радара се шаљу два трага. Димензија гејта није мењана током симулације. Резултати симулације показују оправданост примене ове методе на циљеве који лете брзинама блиским 300 m/s и указују на могућност примене сложенијих филтара, на пример *IMM* модела (*Interacting Multiple Model*).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y. Bar-Shalom, W. Dale Blair "Multitarget multisensor tracking: Applications and Advanced Volume III, (Norwood, MA, Artech House, 2000).
- [2] R. Karlsson, "Simulation Based Methods For Target Tracking", Linkoping Studies in Science and Technology, Thesis No. 930, Department of Electrical Engineering, Linkoping 2002.
- [3] Bar-Shalom, Y. and Li, X. "Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques." (Norwood, MA, Artech House, 1999).
- [4] I. Hwang: "Air Traffic Surveillance and Control Using Hybrid Estimation and Protocol-Based Conflict Resolution", Dissertation Submitted of Aeronautics and Astronautics Department of Stanford University, December 2003.
- [5] S. Blackman, "Multiple-Target Tracking With Radar Applications", Prentice-Hall, 1986.
- [6] G. van Keuk, "Multihypothesis tracking using incoherent signal-strength information", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 32(3), pages 1164-1170, 1996.
- [7] P. P. Eiserloh, "An Introduction to Kalman Filters and Applications", Electronic Combat Range, Naval Air Warfare Center, China Lake, CA, USA, January 2002.

**Abstract:** This paper propose one algorithm for flight conflict detection by the use of data association. We enable automation of some of the ATC function. These functions include Multiple Target Tracking and Identity Management for air traffic surveillance and conflict detection and resolution between aircrafts for Air Traffic Control. This is very simply algorithm which does prevention of the aircraft conflict. Simulation results, obtain for several kind of flight, like a closely maneuvering and nearly maneuvering aircrafts, show and verify the usage of this algorithm.

## ONE APPROACH FOR FLIGHT CONFLICT DETECTION USING DATA ASSOCIATION ALGORITHM

Zvonko Radosavljevic