

ПОКАЗАТЕЛИ НА КАЧЕСТВОТО ПРИ АВТОМАТИЗИРАНО ОТКРИВАНЕ И РЕШАВАНЕ НА КОНФЛИКТИ

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЗИРОВАНОГО ОБНОРУЖЕНИЯ И РЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

CONFLICT DETECTION AND RESOLUTION PERFORMANCE

доц. д-р Петров П. Г.¹, инж. Иванов Х. Ц.², инж. Йорданова-Дукова Е. А.³,
Технически университет - София¹, ДП РВД², А/К Хемус ЕР³

Abstract: A set of automated conflict detection and resolution performance indexes are presented and discussed. Interdependences between them are graphically shown and analysed. Some conclusions are made.

KEYWORDS: CONFLICT, CONFLICT DETECTION, CONFLICT RESOLUTION, PERFORMANCE INDEX

1. Увод

Откриването и решаването на конфликти (ОРК) е най-важната задача на управлението на въздушното движение (УВД). Въвеждат се автоматизирани средства за ОРК, с които се повишава безопасността на полетите, производителността на човешкия труд, капацитетът и пропускателната способност на системата за УВД. Проблемът е актуален и при другите видове транспорт, в робототехниката и др.

Автоматизираното ОРК (АОРК) е обект на интензивни изследвания и експерименти. Публикуват се десетки алгоритми [1], без обобщаваща теория. Дискутират се показатели на качеството на тези системи и начини за постигането им [2, 3]. Настоящата работа продължава терминологичното и съдържателното уточняване на качествените показатели на АОРК и представя нагледно взаимовръзките между тях.

Казва се, че ВС се срещат, ако траекториите на полетите им са такива, че те се доближават едно към друго. Конфликт се нарича всяко нарушаване на безопасните разстояния (норми за безопасно сепариране) между ВС или между тях и други обекти. Положението в пространството на две срещаша се ВС, при което разсоаянието между тях е минимално, се нарича **минимално отстояние**. Разстоянието между ВС при минимално отстояние се нарича **минимално разстояние на сближение** (MPC, d). То е величина със знак. Ако s е нормата за безопасно сепариране, то конфликт възниква когато $|d| \leq s$.

Ако t е текущото време, а t_d е момента на минималното отстояние, то $\tau_d = t_d - t$ се нарича **прогнозно време до MPC**. Вероятността $p_k = P(|d| \leq s)$, че MPC d е по-малко от сепарационния минимум s , се нарича **вероятност за конфликт**. Геометричната траектория на ВС, в която не се отчитат грешките, свързани с реалното движение, се нарича **номинална траектория**.

2. Показатели на качеството на АОРК

Поради това, че движението на ВС зависи от множество случайни фактори, АОРК има стохастичен характер. Откриването на конфликт, например, е едно дискретно решение. В зависимост от това дали определена величина (d, τ_d, p_k) преминава или не преминава конкретна стойност (наречена **праг** или **критерий** за откриване), откривателят или издава алармен сигнал, което означава, че е открит конфликт или "премълчава", което означава, че няма конфликт. Това решение обаче е вярно с определена вероятност и в конкретен, отделен случай може да е грешно. Възможните варианти на правилно и грешно сработване на откривателя и възприетите за тях термини са дадени в лявата част на табл. 1.

В действителност \ Според откривателя	Няма конфликт		Има конфликт	
	Има конфликт	Пропуск	Правилно откриване	Решаване на конфликта
Вероятност за пропуск M (Miss)		Вероятност за правилно откриване D (Detect)	Успешно решение S (Success)	Неуспешно решение \bar{S}
Няма конфликт	Правилно неоткриване	Лъжлива тревога	Ненужно решение	
	Вероятност за правилно неоткриване R (Reject)	Вероятност за лъжлива тревога F (False)	Вероятност за ненужно решение U (Unnecessary)	

Таблица 1. Показатели на качеството на АОРК

В интерес на безопасността е откривателят на конфликти да е **консервативен**, т.е. да има голяма вероятност за правилно откриване. В противния случай той е **рисков**, защото всеки пропуснат конфликт създава риск за полетите. Може да се счита, че пропускането е функционален отказ на откривателя, защото той не е изпълнил предназначението си и това е опасност, свързана с безопасността на полетите.

Откривателят на конфликти трябва да е **ефикасен**, т.е. да има малка вероятност за лъжлива тревога. Лъжливите тревоги предизвикват излишно работно натоварване, водят до

недоверие у хората-оператори към автоматизацията и игнорирането и.

След откриването на конфликт следва неговото решаване. Решаването става чрез маневриране на ВС по височина, курс и скорост. Тук много важен е моментът на стартиране на маневрата за решаване на конфликта. Търси се компромис на следното противоречие:

а) Колкото по-рано започне действието, толкова по-лесно, безопасно и ефективно може да бъде решен конфликта, но по-неясно е каква маневра точно е необходима и необходима ли е

тя въобще. Много рано предсказаният конфликт може да не се случи и тогава решението е **ненужно**.

б) Ако по-късно се започне действието е по-сигурно ще има или няма да има конфликт, но са необходими по-опасни, по-големи и неикономични маневри. Много късното стартиране на маневрата може да доведе до невъзможност за избягване на конфликта поради липса на време и пространство и тогава решението е **неуспешно**.

Възможните случаи на успешно, неуспешно и ненужно решение са дадени в дясната част на табл.1. Таблицата показва всички възможни събития, свързани с АОРК. Количествена мярка за тези случайни събития е тяхната вероятност. Названията и означенията на съответните вероятности са дадени в табл.1 и те са показатели на качеството на АОРК.

3. Предпоставки и зависимости между показателите на качеството при откриване на конфликти

Показателите на качеството на АОРК, дадени в табл.1, са вероятностите на противоположните събития:

- правилно откриване и пропуск на конфликт;
- правилно неоткриване и лъжлива тревога;
- успешно решение и неуспешно решение.

От теорията на вероятностите е известно, че противоположните събития са пълна група събития и сумата от вероятностите им е равна на единица, т.е.:

$$D + M = 1 \quad (1)$$

$$R + F = 1 \quad (2)$$

$$S + \bar{S} = 1 \quad (3)$$

$$\text{Ако } F = U, \text{ то } R + U = 1 \quad (4)$$

Доказано е, че грешките в местоположението на ВС, при прогнозиране на траекториите им, имат нормален закон на разпределение и средно-квадратичното (стандартното) им отклонение нараства линейно с нарастването на прогнозното време [4].

Най-общ при АОРК е вероятностният метод [4], при който в зависимост от началната геометрия на срещата на ВС се изчисляват:

- минималното разстояние на сближение d
- прогнозното време до MPC τ_d ,
- математическото очакване и дисперсията на MPC d
- вероятността за конфликт $p_k = P(|d| \leq s)$.

Ако приложим този подход, постановката на задачата и входните данни, дадени в [4], ще получим резултати в нова форма, които са представена на фиг.1. Там е показано семейство криви на вероятността за конфликт p_k във функция от хоризонталното MPC d , при различни прогнозни времена до MPC τ_d , т.е. $p_k = f(d)$, при $\tau_d = \text{const}$. Да приемем, както и в [4], че нормата за сепариране е $s = 5\text{NM}$. Тези графики дават възможност да се представят нагледно зависимостите между показателите на качеството при АОРК.

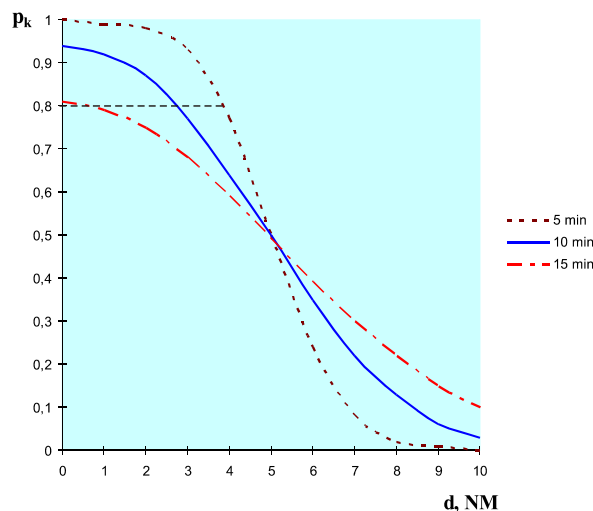
3.1. Зависимости между показателите на качеството при вероятностния метод

При вероятностния метод се изчислява вероятността за конфликт p_k . Задава се предварително приемлива вероятност за лъжлива тревога F . За критерий (праг T) за открит конфликт се използва вероятността за правилно неоткриване $R = 1 - F$ и правилото за взимане на решение е:

$$\text{ако } p_k \geq R, \text{ алармирай за открит конфликт,} \quad (5)$$

$$\text{ако } p_k < R, \text{ няма конфликт.}$$

Да приемем, както и в [4] приемлива вероятност за лъжлива тревога $F = 0,2$. Тогава праговата стойност за взимане на решение по правилото (5) е $T = R = 0,8$.



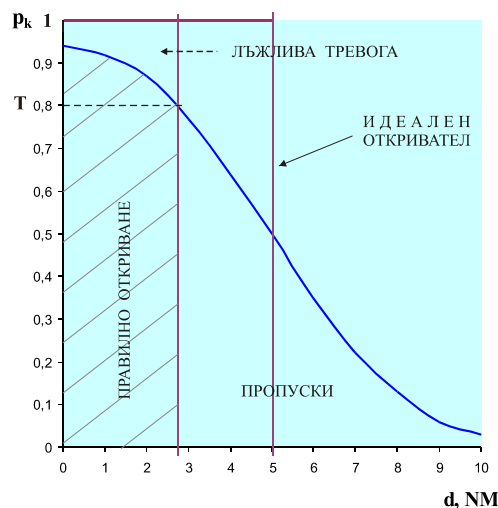
Фиг.1 Вероятност за конфликт $p_k(d)$, $\tau_d = \text{const}$

От фиг.1 могат да се направят следните констатации:

а) Всички криви преминават през близката околност на точката $d = s = 5\text{NM}$, $p_k = 0,5$. И това е естествено: когато MPC е равно на нормата за сепариране, е равновероятно да има или да няма конфликт.

б) Дори и при прогнозиран номинален сблъсък между ВС (MPC $d = 0$) вероятността за конфликт е по-малка от 1 и намалява с нарастване на прогнозното време.

в) При $\tau_d > 15\text{min}$ началната стойност на кривата $p_k(d)$ е по-малка от праговата стойност за взимане на решение $T = 0,8$. Това означава, че без допълнителни мерки не могат да се прогнозираят конфликти между ВС във времеви хоризонт над 15 min с приемлива вероятност за лъжлива тревога.



Фиг.2 Зони при вероятностния метод

Да разгледаме фиг.2, където е представена само средната крива (за $\tau_d = 10\text{min}$) от фиг.1. Означени са областите на правилно откриване ($p_k > T = 0,8$), на пропуски ($p_k \leq T$) и на лъжлива тревога ($p_{лт} = 1 - p_k$, $p_k > T$). От фиг.2 могат да се направят следните разсъждения:

а) Ако праговата стойност за взимане на решение T се намали, зоната на правилно откриване се разширява, а зоната на пропуски намалява, което е положителен ефект. Увеличава се обаче зоната за лъжлива тревога, което е отрицателен ефект. Ако прагът се увеличи е вярно точно обратното.

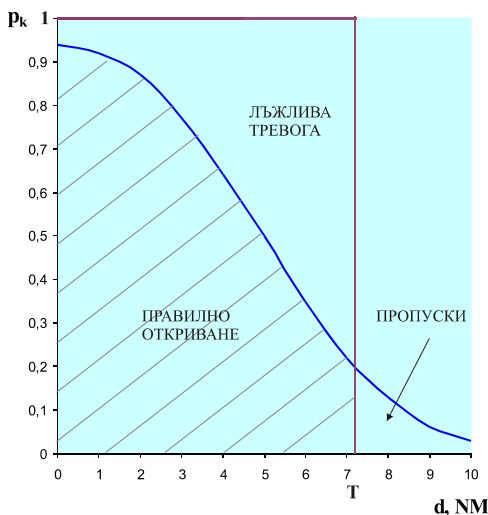
б) При по-малко прогнозно време кривата на откривателя е такава (виж фиг.1), че зоната на правилно откриване се разширява, а зоните на пропуски и лъжлива тревога намаляват. И трите ефекта са положителни. При по-голямо прогнозно време са в сила обратните констатации.

в) Откривателят на конфликти има по-добри показатели на качеството, ако характеризиращата го крива от фиг.2 е по-стъпаловидна. Идеалният откривател би имал правоъгълна характеристика, също показана на фиг.2. Той няма зони на пропуски и лъжлива тревога.

3.2. Зависимости между показателите на качеството при геометричния метод

Геометричният метод е частен случай на вероятностния метод. При него се прогнозира номиналната траектория на ВС, определя се MPC d между срещашите се ВС и то се сравнява с определена прагова стойност по разстояние T . Решение за открит конфликт се взема по правилото:

$$\begin{aligned} \text{ако } d \leq T, & \text{ алармирай за открит конфликт,} \\ \text{ако } d > T, & \text{ няма конфликт.} \end{aligned} \quad (6)$$



Фиг.3 Зони при геометричния метод

Да разгледаме фиг. 3, където са представени областите на правилно откриване ($d \leq T$), на пропуски ($d > T$, $p_k \neq 0$) и на лъжлива тревога ($p_{лт} = 1 - p_k$, $d \leq T$) при геометричния метод. От фиг.3 могат да се направят следните разсъждения:

а) Ако праговата стойност за взимане на решение T се увеличи, зоната на правилно откриване се разширява, а зоната на пропуски намалява, което е положителен ефект. Увеличаване се обаче зоната за лъжлива тревога, което е отрицателен ефект. Ако прагът се намали е вярно обратното.

б) При по-малко прогнозно време кривата на откривателя е такава, че зоната на правилно откриване се разширява, а зоните на пропуски и лъжлива тревога намаляват. И трите ефекта са положителни. При по-голямо прогнозно време са в сила обратните констатации.

в) Идеалният откривател и при този метод би имал правоъгълната характеристика от фиг.2.

3.3. Обобщение

Геометричният метод е по-консервативен и по-неефективен от вероятностния метод (областите на правилно откриване и лъжлива тревога от фиг.3 са по-големи от тези на фиг.2).

Резултатите б) и при двата метода показват, че откриването на конфликти е с по-добри качествени показатели при по-кратковременно прогнозиране. Това е така, защото при по-дългосрочно прогнозиране се натрупват по-големи случайни грешки. Следователно откриване на конфликти с

високи качествени показатели може да се постигне в по-къс времеви хоризонт и/или чрез намаляване на грешките в прогнозната траектория.

Един интегрален показател на качеството на откривателя на конфликти е

$$J_o = \frac{D}{F} \quad (7)$$

Оптимален е този откривател, за който показателят на качеството (7) добива максимална стойност. Това се постига при голяма вероятност за правилно откриване и малка вероятност за лъжлива тревога.

4. Зависимости между показателите на качеството при решаване на конфликти

Решаването на конфликта съдържа два принципни проблема:

- избор на момента за начало на решението (маневрата);
- определяне на маневрата.

4.1. Избор на момента за начало на решението

Моментът на започване на решението е пряко свързан с момента на откриването на конфликта. Противоречието между по-ранното и по-късно маневриране беше изяснено по-горе.

Най-ранното подходящо време за начало на маневрата е момента, в който вероятността за конфликт нарастне до прага за взимане на решение $p_k = R$ и по правилото (5) се алармира за открит конфликт. Фиг.1 показва, че това време зависи основно от зададената вероятност за лъжлива тревога F (в конкретния случай при $F = 0,2$ то е 15 min).

Най-късното време за маневриране, с отчитане на времето за координация, реакциите на пилотите и известен запас, трябва да бъде не по-малко от 2 min преди конфликта [6].

Ако p_k е вероятността за конфликт, то вероятността за безконфликтност, т.е. за решаване на конфликта е

$$p_p = 1 - p_k \quad (8)$$

Решението е ненужно с вероятност U , ако при оригиналното движение, без специално маневриране не се случва конфликт, т.е.

$$U = 1 - p_k \quad (9)$$

Ако системата за АОРК реагира когато вероятността за конфликт достигне определена стойност, за да е малка вероятността за ненужно решение U , е необходимо решението да се забави, докато вероятността за конфликт p_k се доближи до 1. Ако обаче се изчака твърде много може да се окаже, че няма достатъчно време и пространство за избягване на конфликта.

Решаването на конфликта има също стохастичен характер и вероятността за конфликт след маневрата е $p_{км}$. След заместване в (8) вероятността за успешно решение е

$$S = 1 - p_{км} \quad (10)$$

Вероятността за успешно решение S е голяма, ако $p_{км}$ е малка. И обратно, ако вероятността за конфликт и след маневрата $p_{км}$ е близка до 1, то решението е неуспешно и от (2) се вижда, че вероятността му е

$$\bar{S} = p_{км} \quad (11)$$

Един интегрален критерий на качеството на АОРК е

$$J_o = \frac{S}{U} \quad (12)$$

Оптимална е тази система за АОРК, за която отношението (12) добива максимална стойност. Това се постига при голяма вероятност за успешно решение и малка вероятност за ненужно решение. Максимизирането на израза (12) осигурява оптимално време за начало на маневрата за решаване на конфликта.

4.2. Определяне на маневрата

Качеството на решаване на конфликтите, освен с вероятностния критерий (12), се характеризира и с показателите на качеството *безопасност*, *икономическа ефективност* (*икономичност*), *капацитет* на системата за УВД и *устойчивост на потока* на ВД [8].

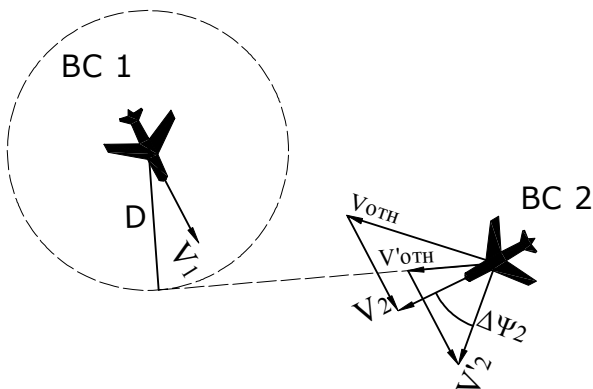
Решението на конфликта ще бъде **безопасно**, ако MPC на ВС е по-голямо от нормата за безопасно сепариране.

Решението на конфликта ще бъде **икономично**, ако необходимите за отстраняването му допълнително полетно време и допълнително изминатият път (а оттам и допълнително използвано гориво) са малки.

Решението на конфликта ще осигури голям **капацитет** на системата за УВД, ако отклонението от първоначалната траектория е минимално и MPC след маневрата е близко до нормата за сепариране, защото така се минимизира необходимото за маневрирането ВП.

Решението на конфликта ще осигури **устойчивост** на потока на ВД, ако се минимизира броят на ВС, на които се налага да променят движението си.

Конфликтът се решава чрез предприемане на стъпки за увеличаване на MPC от d (преди решението) на $D > d$. Това намалява вероятността за конфликт от p_k (преди маневрата) на p_{km} (след маневрата). Разстоянието D е радиус на защитена окръжност (пространствена зона) около ВС1, в която ВС2 не трябва да навлиза.



Фиг.4 Геометрия на решаването на конфликта

Относителното движение между ВС може да се промени единствено с промяна по големината и посоката на вектора на относителната скорост от V_{OTH} на V'_{OTH} . Измежду многото възможни решения се търси това, при което ъгълът между векторите V_{OTH} и V'_{OTH} е минимален. В този случай ВС2 се насочва, така че траекторията му да се допира до защитената зона, както е показано на фиг.4. Такава маневра удовлетворява едновременно изискванията за безопасност, икономичност и капацитет.

Размерът D на защитената зона зависи от приемливата вероятност за конфликт след маневрата p_{km} и прогнозното време до MPC τ_d . Една приблизителна формула на тази функция е дадена в [5].

И така възможната последователност за решаване на конфликта е следната .

а) Задава се вероятността за успешно решение S и от (10) се определя

$$p_{km} = 1 - S \quad (13)$$

б) От фазата на откриването на конфликта и избора на момента за начало на решението е изчислено прогнозното време до MPC τ_d .

в) От p_{km} и τ_d се определя размера на защитената зона D .

г) От геометрията на срещата, показана на фиг.4 се изчислява изменението в курса $\Delta\psi_2$ (вертикалната или хоризонтална скорост), така че новата траектория на движение на ВС2 да се допре до защитената зона.

д) В процеса на решението размерът на защитената зона D , а оттам и промените във вектора на скоростта V'_{OTH} се уточняват [6, 7], а след срещата маневриращото ВС се връща на първоначалната му траектория.

5. Заключение

В работата е представена една съвкупност от показатели на качеството на автоматизираното откриване и решаване на конфликти. Табл.1 съдържа всички възможни случайни събития, свързани с АОРК, т.е. пълни групи събития. Вероятностите на тези събития, описват изцяло стохастичната страна на процесите и представляват основните показатели на качеството на АОРК. Тяхната свързаност показва, че автоматизираното откриване на конфликти трябва да се проектира и разглежда не самостоятелно, а във връзка с решаването на конфликта, дори ако решението не е автоматизирано.

В настоящата работа е използвана нова форма на представяне на основните зависимости между величините от които зависи конфликта. Това дава възможност да се представят нагледно взаимовръзките между показателите на качеството на АОРК. Тези зависимости показват няколко неща:

а) АОРК е съпроводено с пропуски (срещу което са специалистите по безопасност) и лъжливи тревоги (срещу което са операторите: пилоти, ръководители на полетите и др.). Принципно е невъзможно АОРК да бъде без пропуски и лъжливи тревоги, важното е показателите за тях да бъдат в приемливи граници.

б) С помощта на интегралните критерии на качеството от вида (7), (12) се удовлетворяват компромисно и оптимално противоречивите изисквания за безопасност (малко пропуски) и ефикасност (малко лъжливи тревоги).

в) Вероятностният метод има предимства пред геометричния метод.

Вероятностният подход към АОРК дава възможност да се разпределят изискванията към такива средства, действащи в различно прогнозно време: планиране на полета, откриване на средносрочни конфликти (MTCD), алармиране за близки конфликти (STCA), системи за избягване на сблъскване (TCAS, ACAS) или опасно сближение със земята (MSAW, GPWS).

Решаването на конфликтите се характеризира с още показатели на качеството: безопасност, икономичност, капацитет, устойчивост на потока. Те служат основно за избор на конкретна маневра от множеството възможни решения при средносрочните конфликти.

6. Литература

1. Kuchar J. K., Yang L. C., A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 1, No 4, Dec. 2000.
2. Kuchar J. K., Methodology for Alerting-System Performance Evaluation, Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 19, No 2, 1996.
3. Kuchar J. K., Managing Uncertainty in Decision-Aiding and Alerting-System Design, 6th CNS/ATM Conference, Taipei, Taiwan, March 27-29, 2001.
4. Irvine R., A Geometrical Approach to Conflict Probability Estimation, Air Traffic Control Quarterly, Vol 10(2) 2002.
5. Irvine R., Target Miss Distance to Achieve a Required Probability of Conflict, 5th ATM Seminar, Budapest, Hungary, June, 2003.
6. Yang L. C., Kuchar J. K., Prototype conflict alerting system for free flight, ATAA Meeting Papers on Disk, January 1997.
7. Петров П. Г., Баронов Д., Един алгоритъм за автоматизирано решаване на конфликти във въздушното движение, Сборник доклади от Юбилейна научна сесия "10 години катедра "Въздушен транспорт", ТУ – София, 01-03. 10. 2003.
8. Петров П. Г., Автоматизация на управление на въздушното движение, ТУ – София, 2003.