

УДК681.51:623.592

Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, А.С. Могилатенко<sup>1</sup>, А.А. Тимочко<sup>1</sup>, М.А. Павленко<sup>2</sup><sup>1</sup> Кировоградская летная академия национального авиационного университета, Кропивницкий<sup>2</sup> Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА СОПРОВОЖДЕНИЯ ПЛОТНЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОСТОЙ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ

*В статье проводится синтез оптимального алгоритма сопровождения траекторий воздушного объекта с использованием критерия минимума условного среднего риска при простой функции потерь для учета и реализации возможностей методов обработки радиолокационной информации в автоматизированных системах управления воздушным движением.*

**Ключевые слова:** плотность воздушных объектов, маневр, информационное обеспечение, траектории воздушных объектов, первичная обработка радиолокационной информации.

### Введение

Развитие новых технологий с одной стороны, рост интенсивности воздушного движения (ВД) с другой, а также накопленный опыт по разработке автоматических систем управления и планирования потоков ВД Украины позволяют существенно расширить возможности системы организации воздушного движения (ОрВД), систем управления воздушным движением (УВД) за счет автоматизации операций, связанных с планированием и регулированием потоков ВД.

Необходимость разработки алгоритмов и методов прогнозирования, планирования и регулирования потоков ВД связана еще с принятием Украиной норм Международной организации гражданской авиации (ИКАО).

Цель ИКАО состоит в удовлетворении потребности населения в безопасном, регулярном, эффективном и экономичном международном воздушном транспорте и обеспечении безопасного и планомерного роста международной гражданской авиации во всем мире. Она поощряет конструирование и эксплуатацию самолетов в мирных целях, а также создание и развитие авиалиний, аэропортов и навигационного оборудования.

Оптимизационные задачи, связанные с планированием и регулированием потоков ВД, являются предельно сложными для решения, их описание связано с высокой размерностью, нелинейностями, сочетанием непрерывных, целочисленных, дискретных параметров, несвязностью областей допустимых параметров, неопределенностями во внешних условиях, что приводит к чрезвычайной сложности построения конструктивных алгоритмов оптимального синтеза и их программной реализации.

Разработка алгоритмов определения потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС), алгоритмов прогнозирования потоков ВД велась с использованием методов теории вероятности и математической статисти-

стики, методов объектно-ориентированного программирования, методов имитационного моделирования.

Существующие методики синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов разработаны для условия полной разрешаемости, т.е. каждому объекту соответствует не более одной отметки и каждая отметка принадлежит одному объекту.

Разработанные и реализованные по этим методикам алгоритмы не обеспечивают качественного сопровождения траекторий в условиях плотных потоков воздушных объектов, т.е. когда разность значений параметров сигналов, отраженных от них, соразмерна с мерой разрешающей способности РЛС. Учитывая целый ряд факторов, влияющих на принятие решения на этапе первичной обработки РЛИ, вполне возможны случаи, когда сигналы, отраженные от воздушных объектов, накладываются, порождая всего лишь одну отметку.

**Анализ литературы.** К основным работам, посвященным повышению качества радиолокационной информации за счет разработки новых способов и алгоритмов сопровождения траекторий воздушных объектов (ВО), можно отнести следующие [1–10].

Большинство из этих работ показывают различные методики синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов [1; 7; 8; 10]. Однако, проведенный анализ данных работ показывает, что все они ориентированы на существующие методы обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов и разработаны для условия полной разрешаемости. Данная же работа направлена обоснование необходимости разработки алгоритмов вторичной обработки РЛИ в условиях плотных потоков ВО и применения ими маневра.

**Целью данной статьи** является анализ моделей потока истинных отметок, ложных отметок, не-

разрешимых отметок, суммарного потока истинных и ложных отметок для разработки модели потока движущихся воздушных объектов.

### Основная часть

В предыдущих статьях мы уже рассмотрели основные этапы предлагаемой методики синтеза оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО в условиях их плотных потоков.

В соответствии с критерием минимума условного среднего риска при простой функции потерь оптимальный алгоритм многоцелевого сопровождения траекторий ВО по результатам наблюдения на  $\alpha$ -м такте обновления информации источника РЛИ может быть получен исходя из таких соображений.

Условный риск  $R_n(\hat{\mu}_\Sigma)$ :

$$R_n(\hat{\mu}_\Sigma) = \int \dots \int A(n; \vec{\mu}_\Sigma; \hat{\mu}_\Sigma) \times \pi_\alpha(n; \vec{\mu}_\Sigma / \vec{y}_\Sigma) d\vec{\mu}_\Sigma$$

где  $A(n; \vec{\mu}_\Sigma; \hat{\mu}_\Sigma)$  – многомерная функция стоимости потерь;

$\pi_\alpha(n; \vec{\mu}_\Sigma / \vec{y}_\Sigma)$  – многомерная АПРВ параметров потока ВО. При задании функции потерь  $\sigma(x)$ :

$$\sigma(x) = \begin{cases} \delta(\hat{\mu} - \vec{\mu})x < 0; \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

может быть представлен следующим выражением:

$$R_n(\hat{\mu}_\Sigma) = -\pi_\alpha(n; \vec{\mu}_\Sigma / \vec{y}_\Sigma). \quad (1)$$

Т.е., условный средний риск, при фиксированном значении числа сопровождаемых ВО  $n$ , является функцией возможных оценок параметров  $\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n$  и равен значению апостериорной плотности распределения в точке оценки параметров этих ВО  $\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n$ , взятой с отрицательным знаком.

Особенностью задачи оценивания неизвестных параметров на этапе сопровождения траекторий ВО является то, что оцениванию подлежит значение непрерывного случайного параметра – векторов состояния этих ВО  $\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n$ .

Известно [9], что минимум условного среднего риска при простой функции потерь соответствует оценкам параметров траекторий ВО  $\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n$ :

$$\min R_n(\hat{\mu}_\Sigma) \xrightarrow{\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n} \hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^*, \quad (2)$$

которые обеспечивают абсолютный максимум АПРВ потока ВО, для фиксированного числа ВО в зоне ответственности источника РЛИ  $n$ .

$$\min R_n(\hat{\mu}_\Sigma) \xrightarrow{\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n} \hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^*. \quad (3)$$

Учитывая, что формирование АПРВ производится при выдвижении гипотез СО на основании гипотез о классах отметок ВО, можно утверждать, что при оценках параметров траекторий ВО, обеспечивающих абсолютный максимум АПРВ, определяется наиболее правдоподобная гипотеза о классах отметок ВО. Это означает, что появляется дополнительная информация (по сравнению с известными методиками синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий ВО) о количественном составе ВО. Кроме того, при использовании многогипотезной модели траектории движения ВО имеется информация о маневре ВО.

Исходя из этого, выражение (3) можно записать как

$$\max \pi_\alpha(n; \vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n / \vec{y}_\Sigma) \xrightarrow{\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n} \hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^* \quad (4)$$

$$\xrightarrow{\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n} \vec{t}_1, \dots, \vec{t}_n$$

$$\xrightarrow{\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n} \vec{S}_1, \dots, \vec{S}_n$$

Так как сформированная АПРВ  $\pi_\alpha(n; \vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n / \vec{y}_\Sigma)$  является многопиковой, то оценки параметров траекторий ВО должны находиться следующим образом.

Для каждого пика АПРВ (в предположении справедливости соответствующей гипотезы совместного отождествления  $H_i = (i = \overline{1, N_H})$ ) находится условная оценка параметров траекторий ВО  $\vec{\mu}_\Sigma$  и амплитуда пика. При расчете мер правдоподобия гипотез совместного отождествления с использованием соотношения для апостериорной плотности можно не учитывать нормирующий коэффициент

$$C = \int_{(\Omega)} \dots \int \pi_\alpha(n; \vec{\mu}_\Sigma / \vec{y}_\Sigma) d\vec{\mu}_\Sigma,$$

одинаковый для всех слагаемых АПРВ. Тогда в качестве меры правдоподобия гипотезы совместного отождествления  $H_i$  можно использовать относительную амплитуду пика апостериорной плотности  $A(H_i)$ , соответствующего данной гипотезе. Относительная амплитуда пика  $A(H_i)$  при выбранном критерии оптимальности находится как

$$A(H_i) = \max \left[ \omega_\alpha(\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n / H_i) V_{H_i}^{(\alpha)} \right], i = \overline{1, N_H}. \quad (5)$$

Относительная амплитуда пика АПРВ, соответствующего произвольной гипотезе совместного отождествления, с учетом соотношений

$$\omega_\alpha(\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_n / H_i) = \prod_{j=1}^n \left( f^{(\alpha)}(\vec{\mu}_j / T_j^{(k)}) \right),$$

$$f^{(\alpha)}(\vec{\mu}_j / T_j^{(k)}) = f_\alpha(\vec{\mu}_j / \vec{y}_i) = f_\alpha^3(\vec{\mu}_j) \times f_\alpha(\vec{y}_i / \vec{\mu}_j)$$

и

$$V_{T_j^{(i)}} = \begin{cases} V\left(\bar{\mu}_j^{(\alpha)} / \bar{y}_i\right), & \text{если на } \alpha\text{-м такте обновления} \\ & \text{информации в соответствии с гипотезой } T^{(i)} \\ & \text{к } j\text{-му ВО "привязана" } i\text{-я отметка;} \\ V\left(\bar{\mu}_j^{(\alpha)}\right), & \text{если отметка } j\text{-го ВО на } \alpha\text{-м такте} \\ & \text{обновления информации пропущена,} \end{cases}$$

может быть выражена в следующем виде:

$$A(H_i) = \prod_{i=1}^n A\left(T_j^{(i)}\right) = \prod_{i=1}^n \max \left[ V_{T_j^{(i)}}^{(\alpha)}(i) \times f^{(\alpha)}_{T_j^{(i)}}\left(\bar{\mu}_j / T_j^{(i)}\right) \right], \quad (6)$$

где  $A\left(T_j^{(i)}\right)$  – относительная амплитуда пика АПРВ соответствующего  $j$ -й гипотезе поточечного отождествления, входящей в  $i$ -ю гипотезу совместного отождествления.

Если гипотеза  $T_j^{(i)}$  предполагает принадлежность  $i$ -й отметки в  $\alpha$ -м такте обновления информации источника РЛИ траектории  $j$ -го ВО, то величина  $A\left(T_j^{(i)}\right)$  рассчитывается по формуле:

$$A\left(T_j^{(i)}\right) = \max \left[ V_{T_j^{(i)}}^{(\alpha)}(i) f^{(\alpha)}\left(\bar{\mu}_j / T_j^{(i)}\right) \right] = V_{T_j^{(i)}}^{(\alpha)}(i) \max \left[ f^{(\alpha)}\left(\bar{\mu}_j / y_j^{(\alpha)}\right) \right]. \quad (7)$$

Максимум функции  $f^{(\alpha)}\left(\bar{\mu}_j / y_j^{(\alpha)}\right)$  соответствует значению  $\bar{\mu}_j$ , равному ее математическому ожиданию  $\hat{\mu}_j$ .

После нахождения мер правдоподобия всех гипотез  $H_i$  в качестве оценки параметров траектории ВО берется условная оценка, соответствующая самой правдоподобной гипотезе совместного отождествления:

$$\max A(H_i) \rightarrow \hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^*. \quad (8)$$

Таким образом, оптимальный алгоритм сопровождения траекторий ВО по фиксированной реализации потока ВО предполагает выполнение следующих правил:

1. Экстраполяция параметров траекторий ВО на следующий такт обновления информации источника РЛИ.

2. Выдвижение гипотез СО  $H_i$ , полученных в текущем такте обновления информации отметок ВО с сопровождаемыми траекториями ВО с учетом их возможного неразрешения.

3. Вычисление мер правдоподобности гипотез СО.

4. Отбор наиболее правдоподобной гипотезы СО.

5. Расчет для принятой гипотезы СО оценок параметров траекторий ВО и их ковариационных матриц.

Далее после получения новой информации в  $(\alpha+1)$  такте обновления информации проводится экстраполяция сформированной на  $\alpha$ -м такте ПРВ параметров траекторий ВО на  $(\alpha+1)$  такт обновления информации и формируется новая АПРВ потока ВО.

При синтезе оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО с использованием АПРВ, сформированной для многогипотезной модели траектории движения, особенностью является то, что выдвижение гипотез ПО, из состава гипотезы  $H_i$ , производится совместно с одной из гипотез о маневре ВО.

В этом случае, решающие правила для алгоритма сопровождения траекторий ВО такие:

1. Экстраполяция параметров траекторий ВО на следующий такт обновления информации источника РЛИ.

2. Выдвижение гипотез ПО совместно с одной из гипотез о маневре ВО.

3. Формирование гипотез СО  $H_i$  полученных в текущем такте обновления информации отметок ВО с сопровождаемыми траекториями ВО с учетом их возможного неразрешения.

4. Вычисление мер правдоподобности гипотез СО.

5. Отбор наиболее правдоподобной гипотезы СО.

6. Расчет, для принятой гипотезы СО, оценок параметров траекторий ВО и их ковариационных матриц, а также оценка значений вектора маневра для каждой траектории.

Реализация оптимального алгоритма в существующих автоматизированных системах управления вызывает затруднения в связи с лавинообразным ростом количества проверяемых гипотез СО и ПО, при увеличении количества сопровождаемых траекторий ВО.

Так для оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО, реализованного с использованием одногипотезной модели траектории движения без учета возможного неразрешения ВО, количество гипотез СО, рассматриваемых в одном такте обновления информации источника РЛИ [14], составляет

$$N_H^i = \sum_{p=0}^i C_n^p A_i^p, \quad (9)$$

где  $C_n^p$  – число сочетаний из  $n$  по  $p$ ;

$A_i^p$  – число размещений из  $i$  по  $p$ .

Для оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО, реализованного с использованием многогипотезной модели траектории движения без учета возможного неразрешения ВО, количество ги-

потез СО, рассматриваемых в одном такте обновления информации источника РЛИ [14], уже составляет

$$N_H^2 = \hat{A}_r^n \sum_{p=0}^1 C_n^p A_I^p, \quad (10)$$

где  $\hat{A}_r^n$  – число размещений с повторениями из  $r$  по  $n$ .

Количество гипотез СО для разработанного оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО, можно вычислить:

для одногипотезной модели траектории движения ВО как

$$N_H^3 = \hat{A}_r^{1-n-p+1} \hat{A}_r^n \sum_{p=0}^1 C_n^p A_I^p, \quad (11)$$

для многогипотезной модели траектории движения ВО как

$$N_H^4 = \hat{A}_r^{1-n-p+1} \hat{A}_r^n \sum_{p=0}^1 C_n^p A_I^p. \quad (12)$$

Таким образом, целесообразно использовать некоторые упрощения для построения квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий воздушных объектов.

## Заклучение

Синтез оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО целесообразно проводить с использованием критерия минимума условного среднего риска при простой функции потерь, что наиболее подходит при решении многогипотезных задач. Синтезированный оптимальный алгоритм сопровождения траекторий ВО предполагает выдвижение и проверку гипотез СО, выдвинутых для конкретных значений числа сопровождаемых траекторий ВО, отметок и конкретных гипотез о классах отметок. Кроме того, при использовании многогипотезной модели траектории движения ВО, дополнительно выдвигаются и проверяются гипотезы о маневре ВО. В каждом такте обновления информации источника РЛИ принимается окончательное решение по оценке параметров траекторий ВО, путем отбора наиболее правдоподобной гипотезы СО, отвечающей абсолютному максимуму АПРВ.

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ СУПРОВОДУ ЩІЛЬНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ПРОСТІЙ ФУНКЦІЇ ВТРАТ

Ю.О. Данилов, А.С. Могілатенко, О.О. Тимочко, М.А. Павленко

У статті проводиться синтез оптимального алгоритму супроводження траєкторій повітряного об'єкта з використанням критерію мінімуму умовного середнього ризику при простій функції втрат для обліку та реалізації можливостей методів обробки радіолокаційної інформації в автоматизованих системах управління повітряним рухом.

**Ключові слова:** щільність повітряних об'єктів, маневр, інформаційне забезпечення, траєкторії повітряних об'єктів, первинна обробка радіолокаційної інформації.

## SYNTHESIS OF OPTIMAL ALGORITHM OF MAINTAINABILITY OF A DENSE FLOW OF AIR OBJECTS WITH A SIMPLE LOSS OF FUNCTION

Y.A. Danilov, A.S. Mogilatenko, A.A. Timochko, M.A. Pavlenko

In the article the synthesis of the optimal algorithm for tracking the trajectories of the air conditioned facility with a minimum average risk criterion in the simple loss function for accounting and sales opportunities radar information processing methods in automated air traffic control systems.

**Keywords:** density of air objects, maneuver, information provision, the trajectory of air objects, primary processing of radar data.

## Список литературы

1. Голуус М.А. Методика синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов / М.А. Голуус, С.А. Войтович // 36. наукових праць. – Харків: ХВУ, 1998. – Вип. 21. – С. 82-86.
2. Кузьмин С.З. Основы проектирования системы цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 432 с.
3. Определение параметров движения объектов в статистически неопределенных ситуациях / Н.С. Гриценко, В.П. Логинов, В.И. Мальцев и др. // Зарубеж. радиоэлектроника. – 1988. – № 2. – С. 3-29.
4. Kuo-Chu Chang. Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements / Kuo-Chu Chang // American Control Conference Proceedings. Vol. AES – 18, Feb. 1983. – P. 466-471.
5. Данилов Ю.А. Разработка модели потока воздушных объектов в районе аэропорта для системы управления воздушным движением / Ю.А. Данилов, Д.Н. Обидин, А.А. Тимочко, П.Г. Бердник // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2016. – Вип. 2 (38). – С. 14-20.
6. Метод формирования признаков информационной модели конфликтных ситуаций для подсистем поддержки принятия решений в перспективных системах управления специального назначения / М.А. Павленко, Г.С. Степанов, М.В. Касьяненко, В.Н. Руденко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 3(48). – С. 101-103.
7. Scenario approach to the engineering of information models, designed to enable the activities of operator in automated control systems / М.А. Pavlenko, А.І. Tymochko, P.G. Berdnyk, A.S. Shevchenko // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2015. – Вип. 3(128). – С. 32-35.
8. Гибридная модель знаний для распознавания ситуаций в воздушном пространстве / М.А. Павленко, А.И. Тимочко, Н.А. Королюк, М.Ю. Гусак // Автоматика и вычислительная техника". – Рига: АВТ, 2014. – Вып. No.5, (Vol. 49). – С. 16-25.
9. Бакут П.А. Обнаружение движущихся объектов / П.А. Бакут, Ю.В. Жулина, Н.А. Иванчук; под ред. П.А. Бакута. – М.: Сов. радио, 1980. – 287 с.
10. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Поступила в редколлегию 18.01.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Тимочко, Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.