

УДК 681.51:623.592

Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, Д.Н. Обидин<sup>1</sup>, А.А. Тимочко<sup>1</sup>, П.Г. Бердник<sup>2</sup><sup>1</sup> Кировоградская летная академия Национального авиационного университета, Кропивницкий<sup>2</sup> Харьковский национальный университет им. В.М. Каразина, Харьков

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СОПРОВОЖДЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ИХ ВОЗМОЖНОГО НЕРАЗРЕШЕНИЯ

На основе методики синтеза оптимального алгоритма сопровождения траекторий воздушных объектов в условиях их плотных потоков путем сокращения количества выдвигаемых и обрабатываемых гипотез совместного отождествления отметок разрабатываются решающие правила для квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий воздушных объектов с учетом их возможного неразрешения для одно- и многогипотезной моделей траектории движения.

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

### Введение

**Постановка проблемы.** Многоцелевой подход к решению задачи сопровождения траекторий воздушных объектов (ВО), предполагает выдвижение и проверку большого количества гипотез совместного и поточечного отождествления отметок.

Количество гипотез с увеличением числа сопровождаемых траекторий ВО лавинообразно нарастает. Поэтому целесообразно рассмотреть возможные пути построения квазиоптимальных алгоритмов, обеспечивающих снижение вычислительных затрат на их реализацию по сравнению с оптимальным алгоритмом, при сохранении или незначительном (приемлемом) ухудшении показателей качества.

В статье на основе методики синтеза оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО в условиях их плотных потоков, разработанной ранее, путем сокращения количества выдвигаемых и обрабатываемых гипотез совместного отождествления отметок, разрабатываются решающие правила для квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения для одно- и многогипотезной моделей траектории движения ВО.

**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 [1–9].

Большинство из этих работ показывают различные методики синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов. Проведенный анализ работ показывает, что все они ориентированы на существующие методы обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов и разработаны для условия полной разре-

шаемости. Данная же работа направлена на обоснование необходимости разработки алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ) в условиях плотных потоков ВО и применения ими маневра.

**Целью данной статьи** является освещение процесса разработки решающих правил для квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения для одно- и многогипотезной моделей траектории движения ВО.

### Основной материал

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

Адаптивный (применительно к маневру) алгоритм сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения упрощением оптимального алгоритма, синтезированного при простой функции потерь и модели движения воздушного объекта вида:

$$\bar{\mu}_k^{(\alpha)} = \Phi_k^{(\alpha)} \bar{\mu}_k^{(\alpha-1)} + \sum_{i=1}^r \tau_i^k \Gamma^{(\alpha)} \bar{g}_m^{(\alpha)} + G^{(\alpha)} \bar{\eta}. \quad (1)$$

Упрощение оптимального алгоритма заключается в том, что в каждом очередном такте обновления информации принимаются окончательные решения о значениях параметров сопровождаемых воздушных объектов путем отбора из всех гипотез совместного отождествления (СО) одной наиболее правдоподобной и сокращения количества выдвигаемых и проверяемых гипотез СО путем исключения из рассмотрения заведомо ложных гипотез.

Решающие правила для адаптивного алгоритма сопровождения траекторий воздушных объектов с учетом их возможного неразрешения заключаются в следующем:

1. Экстраполяция параметров сопровождаемых траекторий воздушных объектов на  $\alpha$ -й такт обновления информации для каждого возможного значения вектора маневра  $\vec{g}_m$  и их корреляционных матриц.

2. Выдвижение гипотез совместного отождествления  $H_i$  ( $i = \overline{1, N_H}$ ) полученных в  $\alpha$ -м такте обновления информации отметок (с учетом классов отметок) с сопровождаемыми траекториями воздушных объектов. Гипотезы поточечного отождествления  $T_j^{(i)}$ , из которых формируются гипотезы совместного отождествления  $H_i$  выдвигаются в совокупности с гипотезами о маневре воздушного объекта.

3. Исключение из рассмотрения гипотез, неприемлемых с точки зрения здравого смысла, исходя из потенциальных возможностей современных летательных аппаратов.

4. Вычисление мер правдоподобия гипотез совместного отождествления  $A(H_i)$ .

5. Выбор наиболее правдоподобной гипотезы совместного отождествления  $H_i$ :

$$\max A(H_i) \rightarrow \hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n; \\ S_1^*, \dots, S_n^*; \\ t_1^*, \dots, t_n^*.$$

6. Оценка параметров траектории воздушного объекта  $\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_n$ , их корреляционных матриц  $\hat{\psi}_1, \dots, \hat{\psi}_n$  и дискретных значений вектора маневра для каждой траектории воздушного объекта  $\vec{g}_{M_{S_1}}, \dots, \vec{g}_{M_{S_n}}$ , соответствующих принятой гипотезе  $H_i^*$ :

$$\hat{\mu}_j^{(\alpha)}(\vec{g}_{S_j}^{(\alpha)}) = \hat{\mu}_j^{(\alpha)\varepsilon}(\vec{g}_{S_j}^{(\alpha)}) + A_j^{(\alpha)}(\bar{y}_j - h(\hat{\mu}_j^{(\alpha)\varepsilon}(\vec{g}_{S_j}^{(\alpha)})); \\ \hat{\psi}_j^{(\alpha)} = \psi_j^{(\alpha)\varepsilon} - A_j^{(\alpha)}H_j^{(\alpha)}\psi_j^{(\alpha)\varepsilon},$$

где  $A_j^{(\alpha)} = \psi_j^{(\alpha)\varepsilon}H_j^{(\alpha)T}(H_j^{(\alpha)}\psi_j^{(\alpha)\varepsilon}H_j^{(\alpha)T} + \theta_j)^{-1}$ .

Поясним работу адаптивного алгоритма сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения на примере.

Пусть сопровождается 2 траектории ВО и на  $\alpha$ -м такте обновления информации источника РЛИ получено 2 отметки (рис. 1). Будем считать, что вектор маневра имеет 3 состояния:  $S_1$  – ВО выполняет левый разворот;  $S_2$  – ВО не маневрирует;  $S_3$  – ВО выполняет правый разворот.

Можно исключить из рассмотрения гипотезы ПО об отметках, когда разность между оцененными значениями векторов состояний всех ВО на  $\alpha$ -м такте обновления информации и вектором наблюдения явно превышает потенциальные возможности летательных аппаратов.

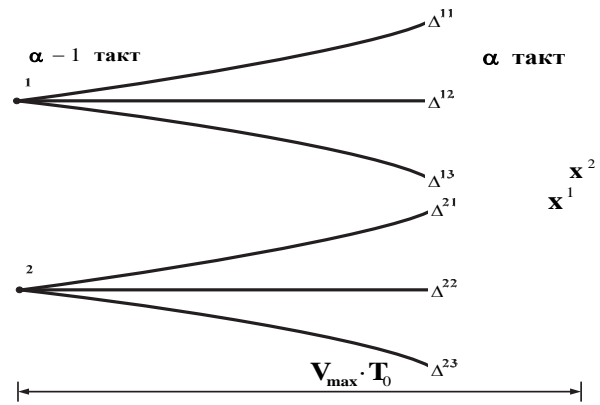


Рис. 1. Сопровождение двух траекторий ВО на  $\alpha$ -м такте обновления информации источника РЛИ с получением двух отметок

Тогда можно выдвигать следующие гипотезы ПО:

- $T_1(S_1)$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим левый разворот;
- $T_1(S_2)$  – отметка порождена 1 ВО, маневра нет;
- $T_1(S_3)$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим правый разворот;
- $T_2(S_1)$  – отметка порождена 2 ВО, выполняющим левый разворот;
- $T_2(S_2)$  – отметка порождена 2 ВО, маневра нет;
- $T_2(S_3)$  – отметка порождена 2 ВО, выполняющим правый разворот;
- $T_0$  – отметка ложная.

Сформируем следующие гипотезы СО:

- без учета возможного неразрешения ВО:
  - $H(T_0)$  – отметки 1 и 2 ВО пропущены;
  - $H(T_1(S_1))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим левый разворот, отметка 2 ВО пропущена;
  - $H(T_1(S_2))$  – отметка порождена 1 ВО, движущимся прямолинейно, отметка 2 ВО пропущена;
  - $H(T_1(S_3))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим правый разворот, отметка 2 ВО пропущена;
  - $H(T_2(S_1))$  – отметка порождена 2 ВО, выполняющим левый разворот, отметка 1 ВО пропущена;
  - $H(T_2(S_2))$  – отметка порождена 2 ВО, движущимся прямолинейно, отметка 1 ВО пропущена;
  - $H(T_2(S_3))$  – отметка порождена 2 ВО, выполняющим правый разворот, отметка 1 ВО пропущена;
- с учетом возможного неразрешения ВО:
  - $H(T_1(S_1)T_2(S_1))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим левый разворот, и 2 ВО, выполняющим левый разворот;
  - $H(T_1(S_1)T_2(S_2))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим левый разворот, и 2 ВО, движущимся прямолинейно;
  - $H(T_1(S_1)T_2(S_3))$  – отметка порождена 1 ВО,

выполняющим левый разворот, и 2 ВО, выполняющим правый разворот;

$H(T_1(S_2)T_2(S_2))$  – отметка порождена 1 ВО, движущимся прямолинейно, и 2 ВО, движущимся прямолинейно;

$H(T_1(S_2)T_2(S_3))$  – отметка порождена 1 ВО, движущимся прямолинейно, и 2 ВО, выполняющим правый разворот;

$H(T_1(S_3)T_2(S_1))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим правый разворот, и 2 ВО, выполняющим левый разворот;

$H(T_1(S_3)T_2(S_2))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим правый разворот, и 2 ВО, движущимся прямолинейно;

$H(T_1(S_3)T_2(S_3))$  – отметка порождена 1 ВО, выполняющим правый разворот, и 2 ВО, выполняющим правый разворот.

Если наиболее правдоподобной окажется гипотеза  $H(T_0)$  (т.е. отметки обоих ВО пропущены), то необходимо решить, какие из экстраполированных значений принять за оценку параметров траекторий ВО в текущем такте обновления информации. В этом случае, опираясь на здравый смысл, в качестве оценки выберем то экстраполированное значение, которое определяется значением вектора маневра рассматриваемого ВО на предыдущем такте обновления информации источника РЛИ. Кроме того, запоминание значения вектора маневра для каждого ВО определяется также необходимостью учета маневра при экстраполяции параметров траектории на следующий такт обновления информации источника РЛИ.

При рассмотрении гипотез СО (для данного примера) можно исключить из рассмотрения гипотезы, которые предусматривают маневр ВО в сторону, противоположную расположению отметки.

На рис. 2 и 3 показаны оценки параметров траекторий ВО для гипотез  $H(T_2(S_2))$  и  $H(T_1(S_3)T_2(S_1))$ , соответственно.

Для данного примера неадаптивный и адаптивный алгоритмы в случае наибольшей правдоподобности гипотезы с учетом возможного неразрешения ВО будут составлены из одинаковых гипотез ПО. Однако, у адаптивного алгоритма будет более высокая точность оценки. Кроме того, при продолжении маневра ВО, будут обеспечиваться меньшие сшибки экстраполяции на следующий такт обновления информации источника РЛИ.

Таким образом, путем сокращения числа выдвигаемых и проверяемых гипотез СО, получен адаптивный алгоритм сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения. Дальнейшее сокращение числа гипотез СО, как и в случае с неадаптивным алгоритмом, будет приводить к ухудшению качества сопровождения траекторий ВО.

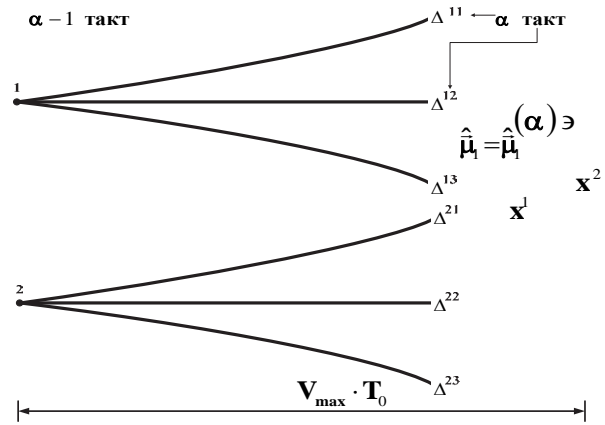


Рис. 2. Оценка параметров траекторий ВО для гипотезы  $H(T_2(S_2))$ ,

где \* – оцененное значение вектора состояния j-го ВО на  $\alpha$ -м такте обновления информации источника РЛИ.

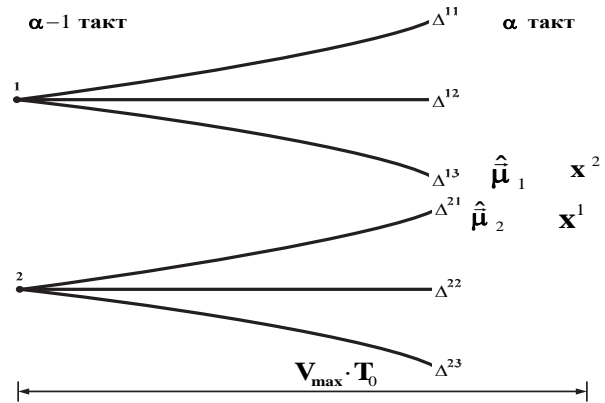


Рис. 3. Оценка параметров траекторий ВО для гипотезы  $H(T_1(S_3)T_2(S_1))$

## Выводы

В процессе наблюдения источником РЛИ по мере накопления информации изменяются представления о структуре и характеристиках потока воздушных объектов. Решения о значениях параметров траекторий ВО в любой момент времени принимаются на основе апостериорных характеристик потока, сформированных по результатам наблюдений, проведенных к данному моменту. Поэтому формирование апостериорных характеристик потока воздушных объектов является первоочередной задачей в процессе синтеза алгоритмов.

## Список литературы

1. Голуус М.А. Методика синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов / М.А. Голуус, С.А. Войтович // Зб. наукових праць. – Х.: ХВУ, 1998. – Вип. 21. – С. 82-86.
2. Голуус М.А. Алгоритм сопровождения траектории воздушных объектов с учетом возможности их неразрешения / М.А. Голуус, С.А. Войтович // Зб. наукових праць. – Х.: ХВУ, 1998. – Вип. 22. – С. 40-46.

3. Кузьмин С.З. Основы проектирования системы цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 432 с.

4. Kuo-Chu Chang, Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements. American Control Conference Proceedings. Vol. AES – 18, Feb. 1983. – Pp. 466-471.

5. Kuo-Chu Chang, Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements. M.S. Thesis, Dept. Elec. Engr. Sci., Univ. of Connecticut. Storrs. Sept. 1983. – Pp. 218-222.

6. Леман Э. Теория точечного оценивания: пер. с англ. / под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Наука, 1991. – 448 с.

7. Scenario approach to the engineering of information models, designed to enable the activities of operator in automated control systems / M.A. Pavlenko, A.I. Tymochko, P.G.

Berdnyk, A.S. Shevchenko // Системи обробки інформації. – Х.: 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: АБТ, 2014. – Вып. 5, 2014 (Vol. 49). – С. 16-25.

9. Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов / П.А. Бакут, Ю.В. Жулина, Н.А. Иванчук; под ред. П.А. Бакута. – М.: Сов. радио, 1980. – 287 с.

Поступила в редколлегию 6.01.2017

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

### АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ СУПРОВОДУ ТРАЄКТОРІЙ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ МОЖЛИВОГО НЕРОЗРІЗНЯННЯ

Ю.О. Данілов, Д.М. Обідін, О.О. Тімочко, П.Г. Бердник

На основі методики синтезу оптимального алгоритму супроводу траєкторій повітряних об'єктів в умовах їх цільних потоків шляхом скорочення кількості висунутих і оброблюваних гіпотез сумісного ототожнення відміток, розробляються вирішальні правила для квазіоптимальних алгоритмів супроводу траєкторій повітряних об'єктів з урахуванням їх можливого нерозрізнення для одно- і багатогіпотезної моделей траєкторії руху повітряних об'єктів.

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

### ADAPTIVE ALGORITHM OF TRAJECTOR ASSIGNMENT OF AIR OBJECTS WITH THE ACCOUNT OF THEIR POSSIBLE NON-RESOLUTION

Y. Danilov, D. Obidin, O. Timochko, P. Berdnik

Decision rules for quasi-optimal algorithms for tracking of air objects trajectories with their possible non-resolution for one- and multi-hypothetical models of the trajectory of movies. This rules are based on the technique of synthesizing the optimal algorithm for tracking of air objects trajectories in conditions of their dense flows by reducing the number of proposed and processed hypotheses of joint identification of marks.

**Keywords:** density of air objects, maneuver, information support, trajectories of air objects, processing of radar information.