

УДК 681.51:623.592

Ю.А. Данилов¹, Д.Н. Обидин¹, А.А. Тимочко¹, П.Г. Бердник²¹ Кировоградская летная академия Национального авиационного университета, Кропивницкий² Харьковский национальный университет имени Н. Каразина, Харьков

ПУТИ ПОСТРОЕНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ИХ ВОЗМОЖНОГО НЕРАЗРЕШЕНИЯ

Синтезирован оптимальный алгоритм сопровождения траекторий воздушных объектов в условиях плотных потоков воздушных объектов. Для этого предложено сокращение количества выдвигаемых и обрабатываемых гипотез совместного отождествления отметок. Разработаны решающие правила для квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий воздушных объектов. При этом учтены возможное неразрешение для одно- и многогипотезной моделей траектории движения воздушных объектов.

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) основан на формировании системы апостериорной плотности распределения вероятностей (АПРВ) параметров потока ВО в зоне ответственности источника радиолокационной информации (РЛИ). Он предполагает выдвижение и проверку большого количества гипотез совместного и поточечного отождествления отметок с учетом их классов с сопровождаемыми траекториями. Количество гипотез с увеличением числа сопровождаемых траекторий ВО лавинообразно нарастает. Реализация оптимального алгоритма сопровождения траекторий ВО в условиях их плотных потоков (с учетом их возможного неразрешения) в реальном масштабе времени требует значительных вычислительных затрат. Поэтому рассмотрим возможные пути построения квазиоптимальных алгоритмов. Они обеспечивают снижение вычислительных затрат в сравнении с оптимальным алгоритмом при сохранении или незначительном (приемлемом) ухудшении показателей качества.

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. Однако проведенный анализ показывает, что данные работы ориентированы на существующие методы обнаружения и сопровождения траекторий воздушных объектов и разработаны для условия полной разрешаемости. Данная же работа направлена на обоснование необходимости разработки алгоритмов вторичной обработки РЛИ в условиях плотных потоков ВО и выполнения ими маневра.

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

Основной материал

При разработке квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий ВО возможны следующие процедуры уменьшения вычислительных затрат:

- уменьшение общего количества выдвигаемых и проверяемых гипотез СО;
- уменьшение объема вычислений, связанных с конкретной гипотезой СО.

Введение априорных данных о потоке ВО в виде вектора минимальных и максимальных скоростей уже исключило из рассмотрения заведомо ложные гипотезы поточного отождествления (ПО) и совместное отождествление (СО). Формирование АПРВ производится, исходя из потенциальных скоростных возможностей современных летательных аппаратов.

Уменьшение объема вычислений, связанных с одной конкретной гипотезой СО, может достигаться путем исключения из рассмотрения заведомо ложных гипотез ПО, исходя из тех же соображений. Иначе говоря, гипотеза ПО не формируется и не рассматривается, если разность между оценкой вектора состояния ВО в предыдущем такте обновления

информации источника РЛИ и оценкой вектора наблюдения рассматриваемой отметки в текущем такте превышает потенциальные скоростные возможности современных летательных аппаратов, т.е. гипотеза ПО формируется при условии:

$$(\hat{\mu}_j^{(\alpha-1)} - y_i^{(\alpha)})A(T_j^{(i)}) < V_{\max} T_0, \quad (1)$$

где T_0 – длительность такта обновления информации (цикл обзора РЛС).

С учетом ошибок измерения координат отметки и оценивание параметров траектории ВО и описываемых многомерным вектором ошибок $\Delta \bar{y}$, введенные ограничения имеют вид:

$$(\hat{\mu}_j^{(\alpha-1)} - y_i^{(\alpha)}) + \Delta \bar{y} < V_{\max} T_0. \quad (2)$$

Количество гипотез СО, формируемых с учетом классов отметок, можно дополнительно уменьшить. Для этого из рассмотрения исключаются гипотезы о классах отметок, если разность оценок векторов состояния ВО, порождающих эти отметки, на предыдущем такте обновления информации источника РЛИ, исключает такую возможность, исходя из потенциальных возможностей летательных аппаратов.

При этом, правила и порядок расчета мер правдоподобия гипотез СО и соответствующих им оценок параметров траекторий ВО остаются прежними.

Для дальнейшего сокращения числа выдвигаемых и проверяемых гипотез применим упрощения:

- введение ограничения на максимальное количество классов отметок;
- введение пороговых значений для мер правдоподобия гипотез СО с последующим отказом от маловероятных гипотез;
- разбиение зоны ответственности источника РЛИ на подзоны и работа в подзонах.

Таким образом, при разработке квазиоптимальных алгоритмов сопровождения траекторий ВО, целесообразно использовать процедуру исключения из рассмотрения заведомо ложных или маловероятных гипотез СО, исходя из возможностей ВО.

Неадаптивный алгоритм сопровождения траекторий воздушных объектов с учетом их возможного неразрешения.

Неадаптивный (применительно к маневру ВО) алгоритм сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения является упрощением оптимального алгоритма при простой функции потерь и модели движения траектории ВО (рис. 1).

Упрощения оптимального алгоритма заключаются в том, что в очередном такте обновления информации принимаются окончательные решения о значениях параметров сопровождаемых ВО путем отбора из всех возможных гипотез совместного отождествления одной наиболее правдоподобной и исключения из рассмотрения гипотез ПО и СО, исходя из потенциальных возможностей современных ВО.



Рис. 1. Методика синтеза алгоритмов обнаружения и сопровождения траекторий ВО

Неадаптивный алгоритм сопровождения траекторий воздушных объектов с учетом их возможного неразрешения предусматривает выполнение следующих решающих правил:

1. Экстраполяция параметров траекторий воздушных объектов на α -й такт обновления информации источника РЛИ:

$$\pi_{\alpha}^2(\bar{\mu}_{\Sigma}) = \int_{\Omega} \pi_{\alpha-1}(\bar{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha-1)}) \omega(\bar{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha)} / \bar{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha-1)}) d\bar{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha)},$$

или при гауссовом распределении АПРВ параметров потока воздушных объектов для каждого из ВО:

$$\bar{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha)\varepsilon} = \Phi^{\alpha} \hat{\mu}_{\Sigma}^{(\alpha-1)}.$$

2. Выдвижение гипотез совместного отождествления H_1 , полученных в α -том такте обновления информации отметок с сопровождаемыми траекториями ВО с учетом их возможного неразрешения.

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

4. Вычисление мер правдоподобия гипотез совместного отождествления.

5. Выбор наиболее правдоподобной гипотезы совместного отождествления:

$$\max A(H_1) \rightarrow \hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^*; \rightarrow t_1^*, \dots, t_n^*.$$

6. Расчет для принятой гипотезы совместного отождествления H_i^* оценок параметров ВО $\hat{\mu}_1^*, \dots, \hat{\mu}_n^*$ и их ковариационных матриц.

Рассмотрим сущность алгоритма сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения на примере. Пусть сопровождается 3 траектории ВО и на α -м такте обновления информации источника РЛИ получено 3 отметки (рис. 2). Здесь r_{ij} – мера правдоподобия гипотезы ПО, состоящей в том, что i -я отметка порождена j -м ВО.

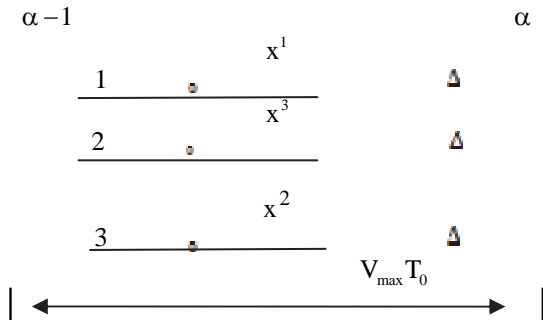


Рис. 2. Такты обновления информации:
 Δ – экстраполированное значение вектора состояния j -го ВО на α -й такт обновления информации источника РЛИ; x – отметки

Количество гипотез поточечного отождествления в данном случае составляет $(I + I) \cdot n$ (добавляем одну гипотезу ПО для случая, когда отметка ложная). Гипотезы ПО следующие (введем для удобства индексацию ij – i -я отметка порождена j -м ВО):

- T_{11} – первая отметка порождена первым ВО;
- T_{12} – первая отметка порождена вторым ВО;
- T_{13} – первая отметка порождена третьим ВО;
- T_{10} – первая отметка ложная;
- T_{21} – вторая отметка порождена первым ВО;
- T_{22} – вторая отметка порождена вторым ВО;
- T_{23} – вторая отметка порождена третьим ВО;
- T_{20} – вторая отметка ложная;
- T_{31} – третья отметка порождена первым ВО;
- T_{32} – третья отметка порождена вторым ВО;
- T_{33} – третья отметка порождена третьим ВО;
- T_{30} – третья отметка ложная.

Гипотезы ПО $T_{31}, T_{32}, T_{33}, T_{30}$ можно сразу исключить из рассмотрения, поскольку разность между оцененными значениями векторов состояний всех ВО на α -м такте обновления информации и вектором наблюдения \vec{y}_3 явно превышает потенциальные возможности летательных аппаратов.

Гипотезы СО (с учетом исключения гипотез ПО \vec{y}_3) будут выдвигаться как объединение гипотез ПО:

– без учета возможности неразрешения ВО:

$H(T_{10}T_{20})$ – обе отметки ложные, отметки всех ВО пропущены;

$H(T_{10}T_{21})$ – первая отметка ложная, вторая порождена первым ВО;

$H(T_{10}T_{22})$ – первая отметка ложная, вторая порождена вторым ВО;

$H(T_{10}T_{23})$ – первая отметка ложная, вторая порождена третьим ВО;

$H(T_{11}T_{20})$ – первая порождена первым ВО, вторая ложная;

$H(T_{12}T_{20})$ – первая порождена вторым ВО, вторая ложная;

$H(T_{13}T_{20})$ – первая порождена третьим ВО, вторая ложная;

$H(T_{11}T_{22})$ – первая порождена первым ВО, вторая вторым;

$H(T_{11}T_{23})$ – первая порождена первым ВО, вторая третьим;

$H(T_{12}T_{21})$ – первая порождена вторым ВО, вторая первым;

$H(T_{12}T_{23})$ – первая порождена вторым ВО, вторая третьим;

$H(T_{13}T_{21})$ – первая порождена третьим ВО, вторая первым;

$H(T_{13}T_{22})$ – первая порождена третьим ВО, вторая вторым;

– с учетом возможности неразрешения ВО (отметки 2 класса):

$H(T_{10}T_{21}T_{22})$ – первая отметка ложная, вторая порождена 1 и 2 ВО;

$H(T_{10}T_{21}T_{23})$ – первая отметка ложная, вторая порождена 1 и 3 ВО;

$H(T_{10}T_{22}T_{23})$ – первая отметка ложная, вторая порождена 2 и 3 ВО;

$H(T_{20}T_{11}T_{12})$ – вторая отметка ложная, первая порождена 1 и 2 ВО;

$H(T_{20}T_{11}T_{13})$ – вторая отметка ложная, первая порождена 1 и 3 ВО;

$H(T_{20}T_{12}T_{13})$ – вторая отметка ложная, первая порождена 2 и 3 ВО;

$H(T_{11}T_{22}T_{23})$ – первая отметка порождена 1 ВО, вторая порождена 2 и 3 ВО;

$H(T_{12}T_{21}T_{23})$ – первая отметка порождена 2 ВО, вторая порождена 1 и 3 ВО;

$H(T_{13}T_{21}T_{22})$ – первая отметка порождена 3 ВО, вторая порождена 1 и 2 ВО;

$H(T_{22}T_{11}T_{13})$ – вторая отметка порождена 2 ВО, первая порождена 1 и 3 ВО;

$H(T_{23}T_{11}T_{12})$ – вторая отметка порождена 3 ВО, первая порождена 1 и 2 ВО;

– с учетом возможности неразрешения ВО (отметки 3 класса):

$H(T_{10}T_{21}T_{22}T_{23})$ – первая отметка ложная, вторая порождена 1, 2, 3 ВО;

$H(T_{20}T_{11}T_{12}T_{13})$ – вторая отметка ложная, первая порождена 1, 2, 3 ВО.

Исходя из потенциальных возможностей современных летательных аппаратов, можно исключить из рассмотрения гипотезы СО формируемые с использованием гипотезы T_{13} , уменьшив таким образом количество гипотез СО без учета возможного неразрешения ВО на 3, для отметок 2 класса на 4, для отметок 3 класса на 1.

Таким образом, ограничения на количество выдвигаемых и проверяемых гипотез ПО и СО дает квазиоптимальный алгоритм сопровождения траекторий ВО с учетом их возможного неразрешения.

Дальнейшее уменьшение выдвигаемых и проверяемых гипотез ПО и СО отметок с сопровождаемыми траекториями ВО возможно за счет перечисленных ранее способов. Однако они существенно увеличат вероятность неправильного определения количественного состава ВО, и, следовательно, принесут ошибки в оценку векторов состояния ВО, в то время как приведенные ограничения гарантируют исключение только заведомо ложных гипотез.

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 // 36. 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 // 36. 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 / М.А. Pavlenko, А.І. Tymochko, P.G. Berdnyk, A.S. Shevchenko // Системи обробки інформації. – Вип. 3(128). – Х.: ХУ ПС, 2015. – С. 32-35.
8. Гибридная модель знаний для распознавания ситуаций в воздушном пространстве / М.А. Павленко, А.І. Тимочко, Н.А. Королюк, М.Ю. Гусак // Автоматика и вычислительная техника. – Рига: АВТ, 2014. – Вып. No. 5, 2014 (Vol. 49). – С. 16-25.
9. Бакут П.А. Обнаружение движущихся объектов / Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А.; под ред. П.А. Бакута. – М.: Сов. радио, 1980. – 287 с.

Поступила в редколлегию 11.01.2017

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

ШЛЯХИ ПОБУДОВИ КВАЗІОПТИМАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ СУПРОВОДУ ТРАЄКТОРІЙ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ МОЖЛИВОГО НЕРОЗРІЗННЯ

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

Синтезований оптимальний алгоритм супроводу траєкторій повітряних об'єктів в умовах щільних потоків повітряних об'єктів. Для цього запропоновано скорочення кількості гіпотез сумісного ототожнення відміток, що висувуються і оброблюються. Розроблені вирішальні правила для квазіоптимальних алгоритмів супроводу траєкторій повітряних об'єктів. При цьому враховані можливі нерозрізнення для одно- та багатогіпотезної моделей траєкторії руху повітряних об'єктів.

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

WAYS OF CONSTRUCTION OF QUASI-TOP ALGORITHMS OF SUPPORT OF TRAJECTORIES OF AIR OBJECTS WITH THE ACCOUNT OF THEIR POSSIBLE NON-RESOLUTION

Yu. Danilov, D. Obidin, A. Timochko, P. Berdnyk

An optimal algorithm for tracking the trajectories of air objects in the conditions of dense streams of air objects was synthesized. For this, a reduction in the number of proposed and processed hypotheses for the joint identification of marks has been proposed. Decision rules for quasi-optimal algorithms for tracking the trajectories of air objects have been developed. At the same time, a possible non-resolution for single- and multi-hypothetical models of the trajectory of the motion of air objects was taken into account.

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