

УДК 621.396.96

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ В ЗАДАЧЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ТРАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. ХИЖНЯК, А.А. БЕЛОУС, А.С. БЕЛЫЙ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 20 декабря 2011

Современные автоматизированные системы управления контроля воздушного пространства характеризуются наличием большого числа источников радиолокационной информации. Сбор и обобщение данных от них представляют сложную задачу, направленную на формирование представления о единой картине воздушной обстановки. Одной из наиболее сложных задач при объединении траекторной информации является идентификация траекторий воздушных объектов по данным от нескольких источников информации. Предлагается подход к решению задачи идентификации траекторных данных в алгоритмах сопровождения воздушных объектов, основанный на применении аппарата теории нечетких множеств.

*Ключевые слова:* отождествление траекторий, сопровождение траекторий, нечеткая автоматическая классификация, третичная обработка радиолокационной информации.

### Введение

Задача сбора и обработки радиолокационной информации о воздушных объектах является одной из основных в существующих автоматизированных системах контроля воздушного пространства. Современные автоматизированные системы управления (АСУ) позволяют одновременно получать информацию от нескольких источников. В каждом конкретном случае количество источников может составлять несколько десятков. Большинство сопрягаемых с АСУ абонентов осуществляют обмен траекторными данными, следствием чего является необходимость качественного решения задачи объединения трассовой информации.

Качество объединения трассовой информации оказывает непосредственное влияние на функционирование АСУ в целом. Снижение качества РЛИ за счет неэффективного решения задачи объединения трассовой информации приводит к возникновению ложных и дублирующих траекторий, а также к снижению точности оценки параметров объединенных траекторий за счет низкого качества решения задачи идентификации траекторных данных. В свою очередь низкое качество РЛИ не позволяет эффективно решать задачи управления.

### Постановка задачи

При решении задачи объединения трассовой информации от нескольких источников возникают ситуации попадания воздушных объектов в область перекрытия зон обнаружения РЛС, что приводит к дублированию траекторий воздушных объектов на входе алгоритмов объединения. Это приводит к необходимости решения задачи идентификации траекторных данных (рис. 1).

На рис. 1 представлена ситуация попадания воздушного объекта в область трехкратного перекрытия зон обнаружения РЛС. Ошибки оценки траекторных параметров, а также различные точностные характеристики РЛС приводят к тому, что на пункт объединения трассовой

информации приходит не одна, а три траектории одного и того же воздушного объекта. Для каждой полученной траектории может быть принято решение о привязке к сопровождаемой трассе либо о том, что полученная траектория является информацией о новом воздушном объекте. Задача идентификации в данном случае состоит в принятии решения об истинном количестве траекторий, а также их истинном положении в области перекрытия зон обнаружения источников трассовой информации. Это требует комбинаторного анализа, заключающегося в необходимости построения и расчета всех возможных вариантов идентификации [1].

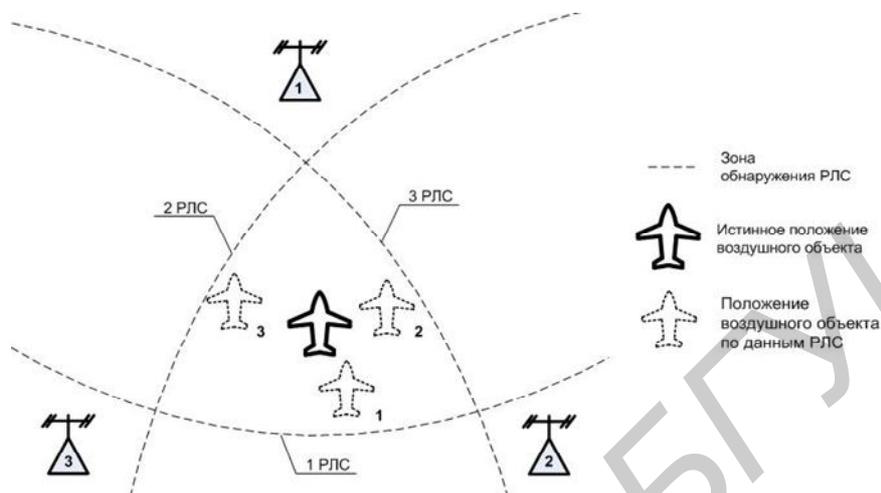


Рис. 1. Постановка задачи объединения радиолокационной информации

Очевидно, что с увеличением количества воздушных объектов в области перекрытия зон обнаружения РЛС количество вариантов решения задачи идентификации возрастает в геометрической прогрессии. В то же время одним из требований, предъявляемым к современным АСУ контроля воздушного пространства, является возможность решения задач обработки РЛИ в реальном масштабе времени.

Задача объединения трассовой информации от нескольких источников может быть сформулирована в следующем виде [2]: на пункт объединения информации, в зоне ответственности которого имеется  $L$  воздушных объектов, по данным  $j$  источников поступает  $i$  трасс воздушных объектов, характеризующихся вектором параметров

$$U_{ij} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, V_{x_{ij}}, V_{y_{ij}}, V_{z_{ij}}, \Pi_{ij}, X_{ij}\},$$

где  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, V_{x_{ij}}, V_{y_{ij}}, V_{z_{ij}}$  – совокупность оценок положения воздушного объекта;  $\Pi_{ij}, X_{ij}$  – совокупность признаков и характеристик соответственно, присвоенных воздушному объекту  $j$ -м источником информации.

На пункте объединения информации по результатам предыдущих циклов объединения имеется  $k$  сопровождаемых траекторий, характеризующихся вектором параметров

$$U_p^* = \{x_p^*, y_p^*, z_p^*, V_{x_p^*}, V_{y_p^*}, V_{z_p^*}, \Pi_p^*, X_p^*\},$$

где  $x_p^*, y_p^*, z_p^*, V_{x_p^*}, V_{y_p^*}, V_{z_p^*}$  – совокупность оценок положения,  $\Pi_{ij}^*, X_{ij}^*$  – совокупность признаков и характеристик сопровождаемого воздушного объекта соответственно.

Требуется таким образом поставить в соответствие полученные в текущем цикле объединения трассы  $U_{ij}$  к сопровождаемым трассам  $U_p^*$ , чтобы полученное отображение воздушной обстановки максимально соответствовало действительной.

Таким образом возникает задача разработки методов и алгоритмов их реализующих, позволяющих решать задачу идентификации траекторных данных в реальном масштабе времени.

## Теоретический анализ

Среди методов идентификации траекторной информации в АСУ наиболее широкое распространение получили методы, реализующие байесовский и небайесовский подходы [2].

Решению задачи объединения трассовой информации от нескольких источников при использовании как байесовского, так и небайесовского подходов, характерно наличие в структуре алгоритмов задачи комбинаторного анализа. Анализ существующих алгоритмов объединения трассовой информации показал, что снижение вычислительной сложности в процессе решения задачи идентификации данных достигается путем искусственного ограничения количества возможных вариантов идентификации за счет введения априорных допущений о характере поведения траекторных параметров (вида закона распределения ошибок измерения и его параметров). В то же время в АСУ, обладающих многоуровневой структурой, характеризующейся наличием многократного преобразования РЛИ, возникают дополнительные ошибки оценки траекторных параметров, обуславливаемые наличием временных задержек в процессе передачи информации, координатных преобразований при пересчете в различные системы координат, многократной фильтрацией траекторных параметров и других факторов. В данных условиях возникают затруднения в процессе оценки параметров объединяемых траекторий и, как следствие этого, сложность получения достоверной информации о выборе параметров возможных допущений. Данный факт приводит к снижению эффективности применения субоптимальных алгоритмов идентификации данных в задаче объединения трассовой информации. В связи с этим в настоящее время наиболее перспективными являются следующие направления развития методов идентификации траекторных данных [3]:

- разработка упрощенных алгоритмов идентификации траекторных данных с последующим анализом их эффективности;
- разработка быстрых алгоритмов и средств их реализации.

В настоящее время существует большое количество методов удовлетворяющих вышеизложенным требованиям, а в частности: нейросетевые алгоритмы, генетические алгоритмы, алгоритмы нечетко-нейронного управления, алгоритмы нечеткой автоматической классификации [4] и ряд других.

В данной статье предложена методика, основанная на использовании Fuzzy Classifier Means (FCM) подобного алгоритма нечеткой автоматической классификации на заданное число классов.

### Идентификация трассовой информации на основе применения метода нечеткой автоматической классификации

Решение задачи идентификации трассовой информации на основе применения FCM-подобного алгоритма может быть реализовано по следующей методике:

- 1) определение интервала возможных значений количества действительных траекторий;
- 2) разбиение совокупности объединяемых траекторий на заданное число групп (классов) в соответствии с интервалом значений количества действительных траекторий;
- 3) определение наиболее вероятного варианта разбиения;
- 4) переход от матрицы нечетких отношений к матрице идентификации.

Определение интервала возможных значений количества действительных траекторий производится на основе логического анализа признаковой информации, поступающей на пункт объединения трассовой информации в составе траекторных данных. В основе критерия, используемого при определении интервала действительных траекторий, используется критерий принадлежности траекторий к РЛС. Результатом логической обработки является интервал возможного числа действительных траекторий, значения которого используются на следующем шаге для решения задачи получения нечеткого разбиения на заданное число классов [3].

Разбиение на заданное число классов является задачей нечеткой автоматической классификации, которая представляет собой решение оптимизационной задачи по нахождению экстремума функционала вида (1):

$$Q_{N_i}(P, \bar{T}) = \sum_{l=1}^{N_i} \sum_{i=1}^n \mu_{li}^2 \cdot d(U_i, \bar{\tau}^l), \quad (1)$$

где  $d(U_i, \bar{\tau}^l)$  – расстояние между параметрами отождествляемых траекторий и центрами классов.

Выбор метрики, а также природа поведения параметров отождествляемых траекторий в функционале (2), определяет выбор алгоритма нечеткой автоматической классификации. При допущении о нормальном законе распределения параметров отождествляемых траекторий целесообразно использовать алгоритм нечеткой автоматической классификации И. Гейта и А. Гевы (GG-алгоритм) [4]. При этом, функционал (2) имеет следующий вид:

$$d(U_i, \bar{\tau}^l) = \frac{1}{P_l} \sqrt{\det(\Psi_l)} \exp\left(-\frac{(U_i - \bar{\tau}^l)^T \Psi_l^{-1} (U_i - \bar{\tau}^l)}{2}\right), \quad (2)$$

где  $P_l$  – вероятность кластера, определяемая в соответствии с выражением (3):

$$P_l = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_{li}^2}{\sum_{l=1}^s \sum_{i=1}^k \mu_{li}^2}, \quad (3)$$

$\Psi_l$  – корреляционная матрица ошибок оценки параметров отождествляемых траекторий;  $U_i$  – вектор параметров отождествляемых траекторий;  $\bar{\tau}^l$  – центр  $l$ -го класса – вектор параметров сопровождаемой или вновь обнаруженной траектории.

Критерием выбора варианта разбиения является максимум показателя качества разбиения, характеризующего компактность размещения траекторий в многомерном пространстве признаков. Наиболее часто в качестве показателя качества разбиения используется коэффициент разбиения, определяемый в соответствии с выражением (4):

$$F_c(S) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n \mu_{li}^2, \quad (4)$$

где  $\mu_{li}$  – степени принадлежности  $i$  траекторий к  $l$  классам, определяемые на выходе алгоритма нечеткой автоматической классификации на заданное число классов;  $n$  – количество траекторий на входе алгоритма отождествления;  $c$  – количество классов из заданного интервала.

На выходе этапа нечеткой автоматической классификации формируется нечеткое разбиение, представляющее собой матрицу нечетких отношений, элементами которой являются значение степеней принадлежности траекторий к классам.

Дальнейшее решение задачи идентификации требует перехода от матрицы нечетких отношений к матрице идентификаций. При этом принимаются следующие ограничения:

$$\sum_{i=0}^n \mu_{ij} = 1, \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^m \mu_{ij} \geq 0. \quad (6)$$

Ограничение (5) предполагает, что любая из идентифицируемых траекторий может быть идентифицирована только с одной действительной. Ограничение (6) предполагает, что с любой действительной траекторией может быть идентифицировано любое число отождествляемых траекторий.

Переход от матрицы нечетких отношений к матрице идентификации реализуется на основе применения известного алгоритма несимметричного комбинированного аукциона [5].

Исходными данными для аукционного алгоритма являются:

- случайный вектор ставок  $p = \|p_1, \dots, p_m\|^T$ ;

- неслучайный вектор прибылей  $\pi = \|\pi_1, \dots, \pi_n\|^T$ ;
- порог ставок  $\lambda$ ;
- минимальное приращение ставки  $0 < \varepsilon < 1/n$ ;
- множество идентификаций  $S$ ;
- матрицы нечетких отношений размерностью  $m \times n$ .

Выходными данными аукционного алгоритма является непустое множество идентификаций  $S^*$ , состоящее из последовательности пар «сопровождаемая траектория – идентифицируемая траектория», которое однозначно определяет принадлежность идентифицируемых траекторий к сопровождаемым с учетом возможности появления новых траекторий.

### Сравнительный анализ алгоритмов идентификации

Сравнительный анализ FCM-подобного алгоритма, оптимального алгоритма, реализующего метод максимального правдоподобия, и субоптимального алгоритма, реализующего метод максимального правдоподобия, проводился по ряду показателей.

1. Достоверность отображения трассовой информации – характеризующая количество действительных траекторий во всей совокупности траекторий полученных при идентификации (рис. 2,а).

2. Точность отображения трассовой информации – характеризующая среднее расстояние между идентифицированной траекторией и реальным положением соответствующего воздушного объекта (рис. 2,б).

3. Среднее время работы алгоритма (рис. 2,в).

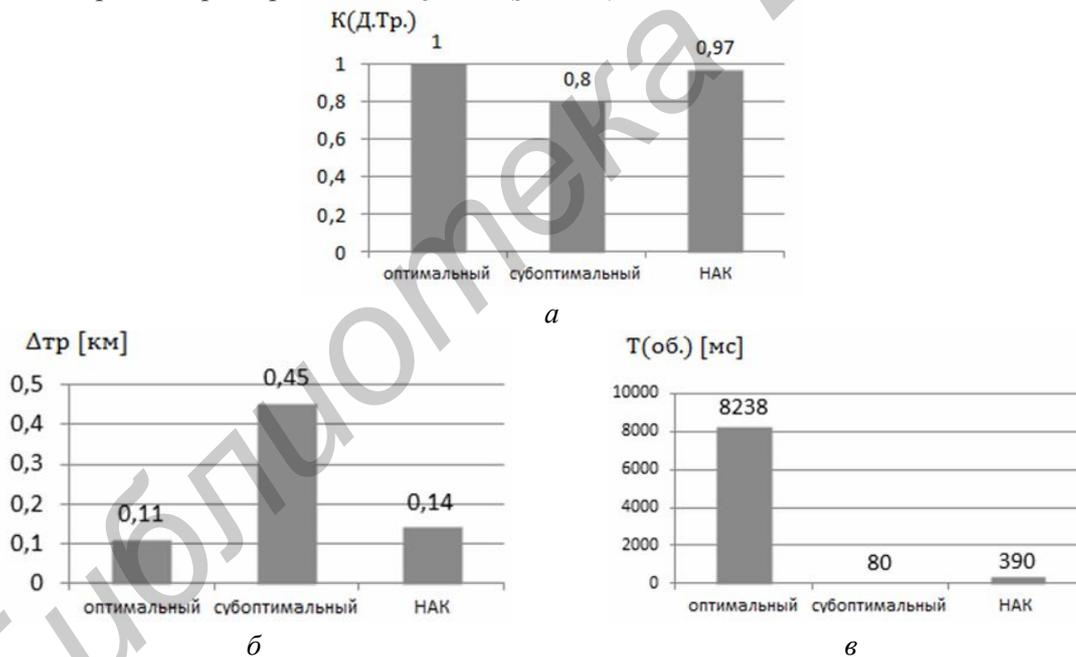


Рис. 2. Сравнительная характеристика достоверности (а), точности отображения трассовой информации (б) и времени работы (в) для различных алгоритмов объединения

Достоверность отображения трассовой информации (рис. 2,а) для субоптимального алгоритма, реализующего метод максимального правдоподобия, хуже, чем для оптимального алгоритма, реализующего метод максимального правдоподобия и FCM-подобного алгоритма. Большое количество ложных трасс для субоптимального алгоритма приводит к снижению точности отображения трассовой информации по сравнению с двумя другими рассматриваемыми алгоритмами (рис. 2,б).

При сравнении между собой оптимального алгоритма, реализующего метод максимального правдоподобия, и FCM-подобного алгоритма видно, что FCM-подобный алгоритм незначительно уступает оптимальному алгоритму (рис. 2,а,б). Однако среднее время работы опти-

мального алгоритма (рис. 2,е) не позволяет решать задачу идентификации в масштабе реального времени, что делает его неприменимым в АСУ.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет качественно решать задачу идентификации в масштабе реального времени.

### **Заключение**

В статье предложена методика идентификации трассовой информации на основе FCM-подобного алгоритма нечеткой автоматической классификации, которая позволяет повысить качество решения задачи идентификации трассовой информации при ее объединении по данным от нескольких источников в АСУ контролем воздушного пространства.

Отличительным свойством представленной методики является существенное снижение вычислительной сложности по сравнению с оптимальным, что позволяет реализовывать ее в реальных автоматизированных системах управления, решающих задачу объединения трассовой информации.

## **IDENTIFICATION OF TRAJECTORY INFORMATION BY APPLYING FUZZY AUTOMATIC CLASSIFICATION IN THE INFORMATION ASSOCIATION PROBLEM**

A. V. KHIZHNIAK, A. A. BELOUS, A. S. BELY

### **Abstract**

Modern automated control systems of the air space are characterized by a large number of sources of radar data. Collection and compilation of data from them is a difficult task, aimed at creating a unified view of the air situation picture. One of the most difficult tasks in trajectory data unification is the identification of the trajectories of aerial objects based on data from multiple sources of orbital information. It is described an approach to solving the problem of trajectory data identification in algorithms for tracking aerial objects based on the application of the theory of fuzzy sets.

### **Список литературы**

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. М., 2000.
2. Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М., 2004.
3. Вятчинин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации. Минск, 2004.
4. Gustafson D.E., Kessel W.C. Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. Amsterdam, 1979.
5. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. М., 1998.