

УДК 681.396.96

## МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА АЛГОРИТМОВ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ТРАССОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЭТАПЕ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ

А.А. БЕЛОУС

Военная академия Республики Беларусь  
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 13 мая 2016

Предлагается методика сравнительного анализа алгоритмов отождествления, применяемых на этапе третичной обработки радиолокационной информации в многодатчиковых радиолокационных системах мониторинга воздушного пространства, основанная на представлении процедуры отождествления траекторий воздушных объектов как задачи автоматической классификации на заданное число классов.

*Ключевые слова:* цифровая и третичная обработка радиолокационной информации, отождествление траекторий воздушных объектов.

### Введение

Широкое внедрение средств автоматизации на всех этапах сбора и обработки радиолокационной информации (РЛИ) позволило существенно повысить качество информационного обеспечения управляемых объектов в автоматизированной системе управления (АСУ) и мониторинга воздушного пространства. В то же время развитие современных АСУ, осуществляющих сбор и обработку РЛИ, характеризуется постоянным увеличением количества элементов системы и усложнением ее топологической структуры, что в совокупности с возрастающими объемами информации на входе информационной подсистемы АСУ ведет к необходимости совершенствования методов обработки РЛИ. Одним из наиболее сложных этапов обработки РЛИ является этап третичной обработки, главная задача которого – обобщение информации от всех имеющихся источников и ее выдача потребителю [1]. Для решения данной задачи в настоящее время разработано большое количество разнообразных алгоритмов [1,2], однако в литературе недостаточно внимания уделяется описанию методов, позволяющих проводить их сравнительный анализ. В статье предложен подход к оценке качества функционирования алгоритмов отождествления траекторной РЛИ, основанный на применении метода имитационного моделирования.

### Актуальность работы и постановка задачи

Необходимость разработки эффективного инструментария для исследования качества функционирования алгоритмов отождествления в первую очередь обусловлена разработкой целого ряда перспективных алгоритмов, основанных на применении как известных статистических, так и новых математических методов, таких как нейросетевые методы [3], методы на основе математического аппарата теории нечетких множеств [4] и др. Внедрение данных алгоритмов в процесс обработки РЛИ в АСУ характеризуется некоторыми особенностями, обусловленными тем, что в настоящее время большинство АСУ, реализующих процессы обработки РЛИ, имеют иерархическую структуру, которая подразумевает увеличение количества РЛИ (траекторных данных) от нижнего к верхнему уровню. Это, в свою очередь, ведет к изменению условий функционирования алгоритмов отождествления от уровня к уровню.

Таким образом, становится очевидным тот факт, что для отождествления РЛИ на различных уровнях иерархической АСУ целесообразно использовать алгоритмы, наиболее приемлемые к конкретным условиям функционирования. Таким образом, проведение сравнительного анализа различных алгоритмов отождествления, с целью выбора наиболее предпочтительного для заданных условий функционирования, является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес.

Необходимость решения задачи отождествления траекторий воздушных объектов в АСУ обусловлена возникновением ситуаций, при которых один и тот же воздушный объект наблюдается несколькими источниками. В виду наличия ошибок обработки трассовой информации в информационном тракте АСУ, на пункт обработки РЛИ по одной и той же траектории поступает несколько траекторных донесений, что в свою очередь ведет к необходимости принятия решения об их принадлежности к сопровождаемым ранее или вновь обнаруженным траекториям.

Графическая интерпретация задачи отождествления представлена на рис. 1.

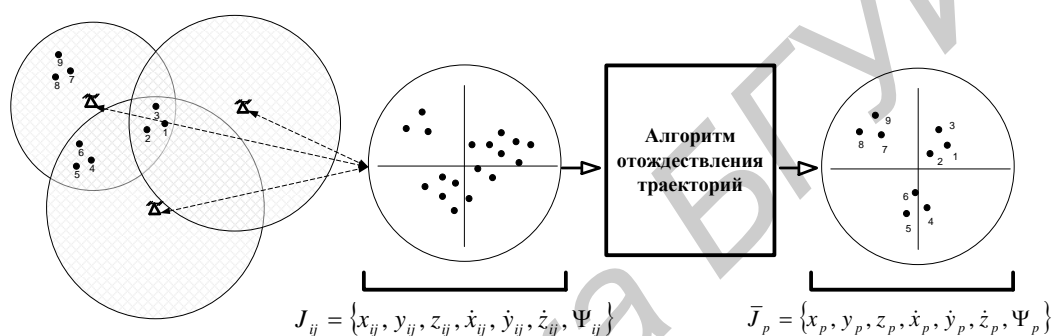


Рис. 1. Схема постановки задачи отождествления трассовой РЛИ

На рис. 1  $J_{ij}$  представляет собой вектор траекторных донесений, полученный от  $i$ -х воздушных объектов по данным от  $j$ -х источников трассовой РЛИ на входе алгоритма отождествления;  $\bar{J}_p$  – вектор параметров отождествленных траекторий, полученный на выходе алгоритма отождествления;  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, \dot{x}_{ij}, \dot{y}_{ij}, \dot{z}_{ij}, \Psi_{ij}$  и  $x_p, y_p, z_p, \dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p, \Psi_p$  – координаты положения, составляющие векторы скорости и корреляционные матрицы ошибок отождествляемых и отождествленных траекторий соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что данная задача относится к задаче классификации на заданное число классов, где под классом понимается набор траекторных донесений, относящихся к одному и тому же воздушному объекту.

### Методика сравнительного анализа алгоритмов отождествления трассовой РЛИ

Применение аналитического подхода для решения задачи сравнения алгоритмов отождествления подразумевает утверждение гипотезы о принадлежности пары траекторных донесений к одной цели. При этом задача отождествления сводится к стробированию параметров одного донесения относительно другого, а вероятности правильного отождествления определяются в соответствии с выражением (1) [5]:

$$P_{OT} = P(\Delta U_{ij} \leq \Delta U_{стр} | 0) [1 - P(\Delta U_{ij} \leq \Delta U_{стр} | \Delta S)], \quad (1)$$

где  $P(\Delta U_{ij} \leq \Delta U_{стр} | 0)$  – условная вероятность попадания в строб  $\Delta U_{стр}$ , образованный вокруг траекторного донесения полученного от  $i$ -го источника информации, траекторного донесения полученного от  $j$ -го источника информации, при условии, что оба донесения относятся к одному и тому же воздушному объекту ( $\Delta S = 0$ );  $P(\Delta U_{ij} \leq \Delta U_{стр} | \Delta S)$  – условная вероятность попадания

в строб траекторного донесения, принадлежащего другому воздушному объекту, при условии, что расстояние между ними равно  $\Delta S$ .

Анализ выражения (1) показывает, что даже в простейшем случае (когда отождествление осуществляется по плоскостным координатам) вычисление значения  $P_{OT}$  пары отметок является достаточно громоздким. Принимая во внимание тот факт, что количество траекторных донесений на входе алгоритмов отождествления может достигать десятков и даже сотен – количество паросочетаний отождествляемых траекторий, а следовательно и вычисляемых значений вероятностей  $P_{OT}$ , будет чрезвычайно велико, что в свою очередь делает применение аналитического подхода в задаче сравнения алгоритмов отождествления затруднительным. В качестве альтернативного подхода, предлагается использовать методику сравнительного анализа, на основе применения метода математического имитационного моделирования, включающую следующие этапы:

- 1) разработка варианта моделируемой воздушной обстановки и варианта структуры радиолокационного обеспечения этапа отождествления трассовой РЛИ;
- 2) формирование массива траекторных донесений на входах сравниваемых алгоритмов отождествления трассовой РЛИ;
- 3) проведение серии прогонов имитационных моделей и фиксация результатов работы алгоритмов отождествления;
- 4) расчет статистических оценок вероятности правильного отождествления  $P_{OT}$  и времени исполнения алгоритма  $T_{OBR}$  для каждого алгоритма;
- 5) анализ результатов имитационного моделирования, выбор предпочтительного алгоритма.

Для реализации этапов 1–4 предложенной методики предлагается имитационная модель, структура которой представлена на рис. 2.

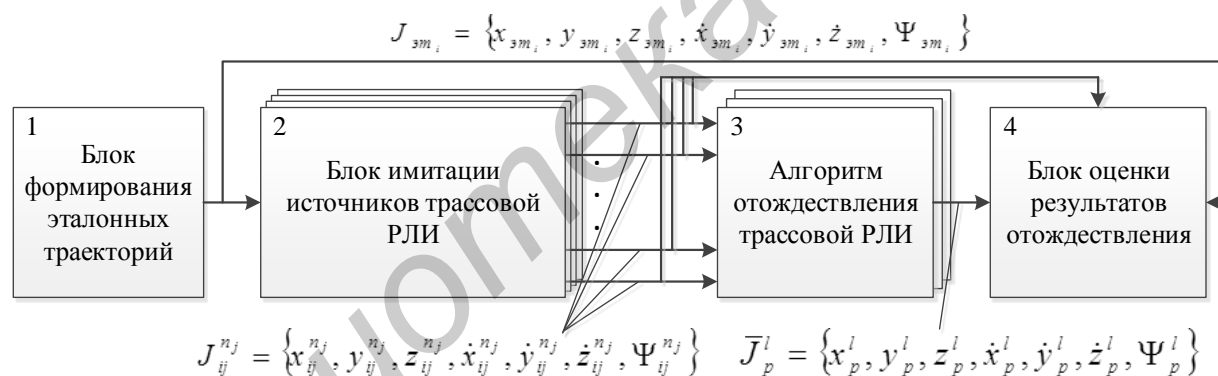


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели

В блоке 1 модели осуществляется формирование варианта моделируемой воздушной обстановки путем задания массива векторов эталонных траекторий  $J_{эти}$  в соответствии с требуемыми параметрами (количество траекторий, их взаимное расположение, параметры их движения и др.). Эталонные траектории  $J_{эти}$  поступают на входы имитационных моделей блока имитации источников трассовой РЛИ.

Определение варианта структуры радиолокационного обеспечения этапа отождествления трассовой РЛИ осуществляется посредством определения количества информационных входов алгоритмов отождествления, формируемых выходами имитационных моделей источников трассовой РЛИ. Имитационные модели источников трассовой РЛИ формируют на своих выходах массивы векторов обнаруженных траекторий, с параметрами, определяемыми в соответствии с техническими характеристиками имитируемых средств радиолокационной разведки. Совокупность траекторных донесений с выхода блока 2 имитационной модели является входной информацией для исследуемых алгоритмов (блок 3).

Общепринятым показателем качества функционирования алгоритмов отождествления принято считать вероятности правильного отождествления  $P_{OT}$ . Кроме этого, важнейшим показателем, характеризующим качество работы алгоритмов отождествления, является время их

выполнения  $T_{\text{ОБР}}$ . Данный факт обуславливается тем, что в системах мониторинга воздушного пространства задача отождествления является задачей близкой к задаче реального времени. Как правило, время ее решения не должно превышать 2–2,5 секунды. Результаты функционирования исследуемых алгоритмов (вектора  $\bar{J}_p$  отождествленных по  $p$  классам траекторий), получаемые на выходе блока 3, являются исходными данными для расчета статистических оценок  $P_{\text{ОТ}}$  и  $T_{\text{ОБР}}$  в блоке 4 имитационной модели.

Рассматривая задачу отождествления как задачу классификации на заданное число классов, можно выделить два ее подэтапа, определяющих значение вероятности  $P_{\text{ОТ}}$ , а именно этап определения количества классов (воздушных объектов) и этап распределения траекторных донесений в группы по критерию принадлежности к одним и тем же воздушным объектам. В следствии этого вероятность  $P_{\text{ОТ}}$  может быть представлена условной вероятностью вида (2):

$$P_{\text{ОТ}} = P_{\text{ОП.КЛ}} P_{\text{РАС.}} (N_{\text{КЛ}} = N_{\text{КЛИСТ}}), \quad (2)$$

где  $P_{\text{ОП.КЛ}}$  – вероятность правильного определения числа классов (количества действительных воздушных объектов);  $P_{\text{РАС.}} (N_{\text{КЛ}} = N_{\text{КЛИСТ}})$  – вероятность правильного распределения траекторных донесений в группы по критерию принадлежности к одним и тем же воздушным объектам, рассчитанная при условии правильного определения количества классов ( $N_{\text{КЛ}} = N_{\text{КЛИСТ}}$ ).

Расчет оценки  $P_{\text{ОП.КЛ}}$  осуществляется на основании выражения (3):

$$P_{\text{ОП.КЛ}} = \frac{\sum_{k=1}^l P_{\text{ОП.КЛ}_k}}{l}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ОП.КЛ}_k}$  – вероятность правильного определения числа классов в  $k$ -м прогоне имитационной модели:  $P_{\text{ОП.КЛ}_k} = \begin{cases} 1 & \text{если число классов определено верно;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$ ;  $l$  – количество прогонов имитационной модели.

Вычисление  $P_{\text{РАС}}$  целесообразно проводить на основе сравнения результатов распределения траекторий по группам полученных на выходе исследуемых алгоритмов с априорно известным распределение траекторий на их входе. При этом распределение траекторий по группам может быть представлено в виде матрицы размером  $n \times n$ , где  $n$  – количество траекторных донесений. На рис. 3 представлены матрицы распределения траекторий на входе (рис. 3, а) и выходе (рис. 3, б) алгоритма отождествления и соответствующие им графические интерпретации распределений.

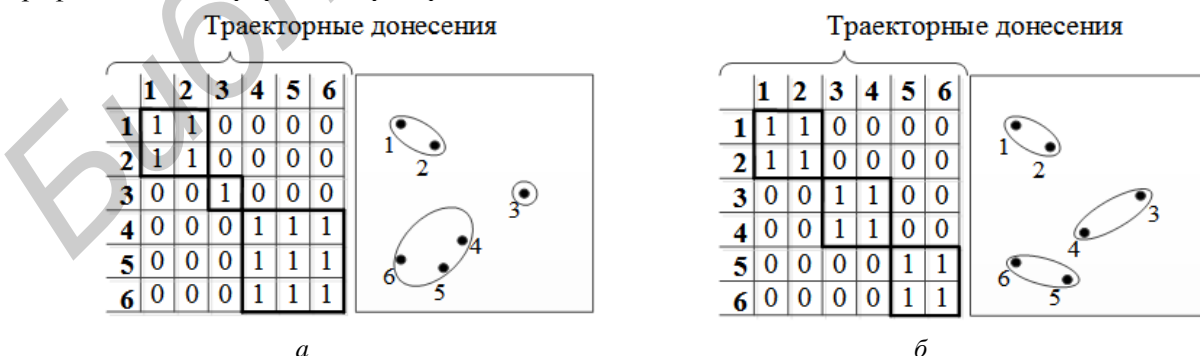


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения траекторных донесений: а – вариант истинного распределения траекторий по группам на входе алгоритма; б – вариант распределения траекторий по группам на выходе алгоритма

Наличие единиц на пересечении строк и столбцов матриц, представленных на рис. 3, определяет принадлежность траекторных донесений (1–6) к одним и тем же группам (классам).

Количественная оценка качества распределения траекторных донесений по группам в  $k$ -м прогоне имитационной модели определяется в соответствии с выражением (4) и характеризуется соотношением полученного на выходе алгоритма отождествления варианта распределения с истинным распределением на входе алгоритма:

$$P_{\text{PAC}_k} = 1 - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |a_{ij} - b_{ij}| / [n(n-1)], \quad (4)$$

где  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  – матрицы размером  $n \times n$ , соответствующие истинному и полученному на выходе алгоритма отождествления результату распределения траекторий.

Оценка вероятности  $P_{\text{PAC}}$  за  $l$  прогонов имитационной модели определяется в соответствии с выражением:

$$P_{\text{PAC}} = \frac{\sum_{k=1}^l P_{\text{PAC}_k}}{l} \quad (5)$$

Аналогично, на основании выражения (6), определяется статистическая оценка среднего времени выполнения алгоритма:

$$T_{\text{OBR}} = \frac{\sum_{k=1}^l T_{\text{OBR}_k}}{l} \quad (6)$$

Определение требуемого количества прогонов имитационных моделей осуществляется исходя из требований к достоверности оценок  $P_{\text{OT}}$  и  $T_{\text{OBR}}$ . Выбор предпочтительного алгоритма осуществляется на основе реализации критерия «время выполнения – качество», где под качеством принимается значение  $P_{\text{OT}}$ . Для примера применения предложенной методики ниже приведены результаты сравнительного анализа оптимального (основанного на полном переборе гипотез отождествления) и субоптимального (основанного на ограничении числа рассматриваемых гипотез отождествления) алгоритмов, реализующих метод максимального правдоподобия (рис. 4).

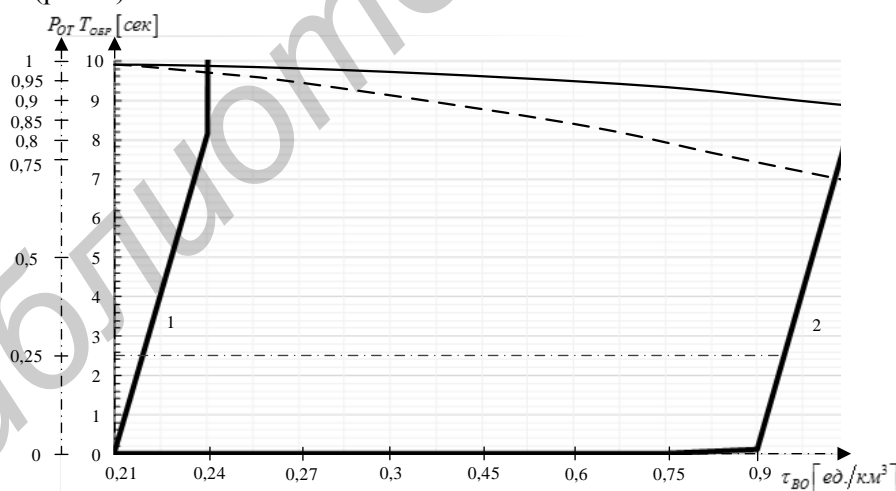


Рис. 4. Сравнительная характеристика алгоритмов отождествления

На рис. 4 тонкой пунктирной и сплошной линиями представлены зависимости вероятностей правильного отождествления от плотности траекторных донесений на входе субоптимального и оптимального алгоритмов соответственно. Сплошными жирными линиями 1 и 2 – зависимости времени выполнения оптимального и субоптимального алгоритмов от плотности траекторных донесений на входе алгоритмов соответственно.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что применение оптимального алгоритма, основанного на полном переборе всех гипотез отождествления оправданно при относительно малых плотностях траекторных донесений на входе алгоритма. С

увеличением количества траекторных донесений необходимо использовать субоптимальный алгоритм, характеризующийся более низким значением вероятности правильного отождествления, но в то же время удовлетворяющий требованию по времени исполнения.

### **Заключение**

Предлагаемая в статье методика сравнительного анализа может быть использована как достаточно удобный инструмент при исследовании процессов обработки РЛИ в информационном тракте автоматизированных систем управления и мониторинга воздушного пространства. Кроме того, применение данной методики позволяет выдвигать требования к качеству функционирования исследуемых алгоритмов отождествления в заданных условиях воздушной обстановки.

### **THE TECHNIQUE OF THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ROUTE TRACKING INFORMATION ALGORITHMS DURING THE TERTIARY PROCESSING**

A.A. BELOUS

### **Abstract**

The technique of the comparative analysis of the identification algorithms, applied at a stage of the tertiary radar-tracking information processing in the multisource radar-tracking systems of the air space monitoring is applied. The technique is based on the identification procedure representation of air objects trajectories as the automatic classification problem on the not given amount of classes.

*Keywords:* digital and tertiary processing, radar tracking information, trajectories identification of air objects.

### **Список литературы**

1. *Кузьмин С.З.* Цифровая радиолокация. Введение в теорию Киев, 2000.
2. *Bar-Shalom Y., Blair W.* Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances. Volume III. Norwood, 2000.
3. *Татузов А.Л.* Нейронные сети в задачах радиолокации. М., 2009.
4. *Белоус А.А., Хижняк А.В., Шевяков А.В.* // Инженерный вестник. 2010. № 3 (29). С. 38–43.
5. *Кузьмин С.З.* Основы цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.