

УДК 623.5

А.Н. Пифтанкин, А.В. Половинкина, С.В. Токмаков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ЗАДАЧИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ТАКТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ПО ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ ОТ КОРАБЛЕЙ ТАКТИЧЕСКОЙ ГРУППЫ

Пифтанкин Александр Николаевич, кандидат технических наук, окончил механико-математический факультет Ульяновского государственного университета. Главный специалист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области автоматизации процессов совокупной обработки радиолокационной информации. [e-mail: mars@mv.ru].

Половинкина Анастасия Владимировна, кандидат физико-математических наук, окончила факультет математики и информационных технологий УлГУ. Инженер-программист 1 категории ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области фундаментальных исследований. [e-mail: mars@mv.ru].

Токмаков Станислав Владимирович, окончил факультет математики, информационных и авиационных технологий УлГУ. Инженер-программист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Область научных интересов: методы машинного обучения в системах управления. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В данной работе представлены математическая модель и алгоритм задачи отождествления радиоизлучающих объектов. Произведена декомпозиция задачи отождествления на составляющие. Представлены новые подходы к расчету меры тождественности радиоизлучающих объектов по геометрическим и сигнальным признакам. Предложен порядок приоритетов решаемых задач на основании опыта работы со специальной информацией. Разработана новая математическая модель построения функции оценки тождественности по сигнальным признакам, которая не ограничивается предположением о линейности данной функции. Представлены алгоритмы вычисления пороговых значений тождественности объектов. В среде Matlab поставлен вычислительный эксперимент, в рамках которого разработан алгоритм отождествления радиотехнических объектов. По итогам данного вычислительного эксперимента произведены уточнения алгоритма и получен положительный результат использования модели.

Ключевые слова: пассивные средства локации, отождествление информации, мера тождественности объектов, метод машинного обучения.

MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITHM FOR THE IDENTIFICATION TASK OF RADIO-EMITTING OBJECTS OF TACTICAL SITUATION ON DATA FROM SHIPS OF TASK FORCE

Aleksandr Nikolaevich Piftankin, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Mathematics and Mechanics at Ulyanovsk State University; Chief Specialist of FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of papers in the field of process automation of complex radar information processing. e-mail: mars@mv.ru.

Anastasiia Vladimirovna Polovinkina, Candidate of Science in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies at Ulyanovsk State University; Software Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of papers in the field of fundamental investigations. e-mail: mars@mv.ru.

Stanislav Vladimirovich Tokmakov, graduated from the Faculty of Mathematics, Information and Aeronautical Technologies at Ulyanovsk State University; Software Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; his research interests include machine learning methods of control systems. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article presents a mathematical model and algorithm for tasks of radio-emitting objects identification. The identification task partition into component parts is carried out. New approaches to the calculation of the radio-emitting object identification level from geometric and signal features will be found in the article. Authors propose a priority sequence of tasks to be solved based on practice of working with special information. A new mathematical model for constructing the identification evaluation function from signal features is developed. This model is not restricted to the assumption of the

linearity of this function. Algorithms for calculating the threshold values of object identification are presented. An algorithm for the radio object identification is developed under conditions of the computing experiment performed in the MATLAB environment. Following the results of the computing experiment, the algorithm has been defined more exactly, the positive outcomes of using the model have been provided.

Key words: passive radio aids, information identification, object identification level, machine learning method.

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае под задачей отождествления понимаются выявление физически одних и тех же объектов по результатам различных измерений. Под отождествлением радиоизлучающих объектов будем понимать принятие решения о принадлежности измерения излучения радиолокационных средств (РЛС) одному и тому же объекту.

Одним из приоритетных путей повышения эффективности системы освещения обстановки тактической группы (ТГ) кораблей является увеличение дальности обнаружения объектов. В случае недостаточной энергетической мощности корабельных РЛС, а также их неработоспособности существует возможность ведения дальнейшей воздушной и надводной обстановки. Дополнительно при решении некоторых задач возникает необходимость сопровождения воздушных и надводных объектов в режиме радиомолчания. Этот режим, как правило, характеризуется использованием пассивных средств локации, в результате чего в автоматизированной системе управления (АСУ) формируются данные о радиоизлучающих объектах. Эти данные характеризуются известным направлением излучения (пеленг и угол места точки расположения объекта – геометрические характеристики), а также несущей частотой, частотой повторения импульса, его длительностью, шириной диаграммы направленности антенны (частотные, или сигнальные, характеристики). Эти данные могут быть получены с различных точек наблюдения (кораблей ТГ). После выявления факта того, что излучения, полученные с различных точек наблюдения, принадлежат одному и тому же объекту, с использованием метода триангуляции можно рассчитать данные по местоположению этих объектов. Однозначность пересечения направлений в общем случае по надводным целям определяется по данным, полученным от трех кораблей ТГ, а по воздушным – по информации, полученной от двух кораблей ТГ. Частотные признаки при этом могут расходиться, так как сигналы, принятые разными кораблями, могут принадлежать различным РЛС, расположенным на одном объекте слежения.

Существует несколько методик отождествления радиотехнических объектов. Большинство из них основывается на проверке пересечения пеленгов в окрестности заданной точки [1–3]. В работе [4] рассматривается метод отождествления принимаемых отметок цели пространственно-разнесенными пассивными

радиоэлектронными станциями. В качестве математической модели использован t -критерий Стьюдента для проверки статистических гипотез о средних значениях. Проведено имитационное моделирование алгоритма, рассмотрен пример его реализации. В работе [5] предложен метод решения задачи отождествления воздушных объектов при их многоцелевом сопровождении в РЛС воздушного базирования, позволяющий применять единый подход к обработке координатных и некоординатных параметров измерений за счет использования положений теории нечеткой логики. В работе [6] рассматривается метод комбинаторной оптимизации для решения задачи отождествления объектов в системе измерителей. Адаптивный алгоритм позволяет идентифицировать объекты измерения в условиях их высокой пространственной плотности. В статье [7] предложен метод решения задачи комплексной обработки информации о воздушной обстановке в АСУ ТГ надводных кораблей. Благодаря разделению всех средств обработки информации на иерархии, объединению результатов вторичной и третичной обработок информации, поступающей от разнотипных источников, полученные с помощью предлагаемого метода данные повышают полноту информации о воздушных объектах и могут использоваться для решения задач распознавания и прогнозирования развития тактической ситуации в контролируемом районе. В работе [8] рассмотрен алгоритм однозначного определения координат в многопозиционной РЛС. Предложены алгоритм расчета размера строки, учитывающего коррелированность первичных измерений, а также способ уменьшения вычислительной сложности алгоритма идентификации отметок при вычислении координат аналитическими методами в многоцелевой обстановке. В работе [9] предложена математическая модель построения функции оценки тождественности по сигнальным признакам.

Однако в предлагаемых методиках не рассматривается общий случай отождествления радиоизлучающих целей от трех и более объектов. Также не охарактеризованы подходы к оценке меры тождественности радиоизлучающих объектов, данные о которых поступают от различных источников. В предлагаемых методиках не рассматриваются комплексные алгоритмы автоматического отождествления, учитывающие результаты работы средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) по отождествлению радиоизлучающих объектов с радиолокационными, для последующей оценки зависимости сигнальных признаков объектов друг от друга.

Постановка задачи исследования

В первую очередь необходимо декомпозировать задачу на более мелкие составляющие и определить данные взаимодействия этих составляющих.

В общем случае задача отождествления радиоизлучающих целей включает в себя следующие подзадачи:

- формирование статистики по заранее известным тождественным и нетождественным объектам тактической обстановки;
- расчет меры тождественности объектов по геометрическим признакам;
- расчет меры тождественности объектов по сигнальным признакам;
- принятие решения об отождествлении объектов;
- формирование обобщенных данных о местоположении и области возможного местоположения цели (ОВМЦ) на основании отождествления радиоизлучающих формуляров от различных кораблей ТГ.

Под обобщенными данными будем понимать данные по объекту, полученные в результате обработки различных измерений по объекту, в том числе от различных источников. Алгоритм отождествления в качестве входных данных будет использовать сформированные данные по заранее известным тождественным и нетождественным объектам тактической обстановки.

Архитектура алгоритма отождествления радиоизлучающих объектов представлена на рисунке 1.

Ввиду неопределенности возможного количества источников (кораблей, на которых располагаются источники, формирующие измерения по излучающим объектам) алгоритм формируется рекурсивным способом, подразумевающим следующую последовательность действий:

1. формирование источника обобщенных объектов по данным радиоизлучающих формуляров от одного из кораблей ТГ;
2. отождествление источника обобщенных объектов с данными радиоизлучающих формуляров от одного из кораблей ТГ;
3. добавление неотожествившихся радиоизлучающих формуляров в источник обобщенных объектов;

4. повторение 2-го и 3-го пунктов для всех источников радиоизлучающих формуляров;

5. повторение 2-го, 3-го, 4-го пунктов в новом цикле решения задачи.

При постановке задачи примем следующие допущения и ограничения:

- предположим, что данные по радиоизлучающим объектам (данные, собранные в результате измерения излучения объектов), полученные от кораблей соединения, не изменяют своего номера, то есть номер формуляра одного и того же объекта, относящийся к одному и тому же РЛС, со временем не должен меняться;
- в задаче при расчете меры тождественности по геометрическим признакам явно не учитываются вырожденные случаи расположения объектов, когда объекты находятся на одной прямой относительно корабля – источника радиоизлучающих целей; данные случаи учитываются посредством дополнительной оценки тождественности по сигнальным признакам.

Ввиду большого количества факторов, которые анализируются в процессе решения задачи, необходимо расставить их в приоритетном порядке. Предлагается приоритеты задачи отождествления объектов сформировать в следующем порядке:

- отождествление радиоизлучающих объектов на основании отождествления радиоизлучающего и радиолокационного формуляров корабельной аппаратурой РЭБ;
- отождествление радиоизлучающих объектов на основании геометрических признаков;
- отождествление радиоизлучающих объектов на основании сигнальных признаков.

Метод решения

Согласно сформированным предложениям по декомпозиции задачи, подходу к формированию алгоритма функционирования, а также выбранным приоритетам предлагается сформировать следующий алгоритм ее решения. Перед описанием алгоритма приведем данные, используемые в нем: данные по радиоизлучающему объекту, данные по обобщенному объекту.



Рис. 1. Архитектура алгоритма отождествления радиоизлучающих объектов

В состав данных радиоизлучающего объекта входят следующие:

- $R[j].No$ – номер объекта,
- $R[j].Ns$ – номер источника объекта,
- $R[j].P.P_{obj}$ – пеленг объекта,
- $R[j].P.D_{obj}$ – дальность объекта (имеет значение при $q_d = 1$)
- $R[j].P.M_{obj}$ – угол места объекта
- $R[j].q_d = \{0, 1, 2\}$ – признак наличия дальности.

В состав данных отождествленного объекта входят данные радиоизлучающего объекта и дополнительно следующие компоненты: $O[i].Kd$ – количество возможных дальностей объекта (если ($q_d = 1$), тогда ($K_d = 1$)); по каждой дальности формируются значения: $O[i].Dv[k]$ – возможная дальность до объекта; $O[i].qv[k]$ – признак возможной дальности до объекта (1 – дальность получена по результатам отождествления радиолокационной и радиотехнической целей корабельной аппаратурой РЭБ, 2 – дальность получена в результате решения задачи триангуляции по геометрическим признакам, 3 – дальность получена в результате решения задачи триангуляции по частотным признакам).

Далее, используя состав данных радиоизлучающего и обобщенного объектов, приведем обобщенный алгоритм:

- 1) формирование источника обобщенных объектов по данным радиоизлучающих формуляров от одного из кораблей ТГ;
- 2) отождествление источника обобщенных объектов с данными радиоизлучающих формуляров от одного из кораблей ТГ;
- 3) добавление неотожествившихся радиоизлучающих формуляров в источник обобщенных объектов;
- 4) повторение пунктов 2 и 3 для всех источников радиоизлучающих формуляров;
- 5) повторение пунктов 2–4 в новом цикле решения задачи.

Наибольший интерес представляет 2 пункт данного алгоритма. Рассмотрим его более подробно:

1. Организация цикла просмотра объектов обобщенного источника $O[i], i = 1 .. N_i$.

1.1. Организация цикла просмотра объектов реального источника $R[j], j = 1 .. N_j$ (здесь под реальным источником будем понимать источник данных, полученных в результате одного измерения излучения объекта).

1.1.1. Расчет параметра матрицы тождественности $\mathcal{E}_{ij} WP_{ij} = f(O[i], R[j])$.

1.2. Конец цикла просмотра объектов реального источника.

2. Конец цикла просмотра объектов обобщенного источника.

3. Формирование списка распределений обобщенных и реальных радиоизлучающих объектов:

$$L = f(\mathcal{E}, WP, O, R), \text{ где } \mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{ij}\}, WP = \{WP_{ij}\}, O = \{O_i\}, R = \{R_j\}, i = 1 .. N_i, j = 1 .. N_j.$$

4. Формирование списка неотожествившихся объектов реальных радиоизлучающих объектов $L1 = f(L, R)$.

5. Добавление списка неотожествившихся объектов реальных радиоизлучающих объектов в список обобщенных объектов.

Очевидно, что в приведенном алгоритме наиболее интересными представляются расчет матрицы тождественности на основании данных радиоизлучающего и обобщенного объектов (п. 1.1.1), а также формирование списка соответствия обобщенных и реальных радиоизлучающих объектов на основании решения задачи оптимизации, максимизирующей суммарную меру тождественности всех объектов (п. 3).

Фактически алгоритм оценки меры тождественности сводится к рассмотрению четырех случаев, сформированных на основании признаков наличия дальности у обобщенного и реального объектов. В трех случаях из четырех дальность присутствует хотя бы у одного из двух объектов, мера отождествления которых оценивается. В этих случаях решение об отождествлении принимается на основании геометрических параметров объектов: пеленга, угла места, предполагаемых дальностей, дальности одного из объектов. В четвертом случае решение об отождествлении принимается по данным сигнальных признаков объектов: несущей частоте, частоте повторения импульса и т. д. В [9] рассматривался метод решения данной задачи именно для четвертого случая и там было сделано предположение о линейности функции оценки меры тождественности. В настоящей статье предлагается исключить данное ограничение и представить новый метод оценки тождественности радиоизлучающих объектов.

Для рассмотрения метода введем следующие обозначения.

Вектор параметров обобщенного объекта обстановки обозначим как $f_i^o = \{f_{1i}^o, \dots, f_{5i}^o\}$, где $i = 1 .. N$ – индекс множества отождествленных объектов обстановки.

Вектор параметров реального объекта обстановки обозначим как $f_i^r = \{f_{1i}^r, \dots, f_{5i}^r\}$, где f_{1i}^r – несущая частота, f_{2i}^r – частота повторения сигнала, f_{3i}^r – длительность импульса сигнала, f_{4i}^r – период вращения антенны, f_{5i}^r – ширина диаграммы направленности антенны i -го объекта.

Для принятия решения о тождественности либо нетождественности объектов составим матрицу ковариации, расчет которой необходим для определения зависимости сигнальных параметров $f_1^o, f_2^o, \dots, f_k^o$ радиоизлучающих объектов друг от друга.

Для расчета матрицы ковариации на основании выборочных значений тождественных пар объектов приведем определение выборочной ковариации двух переменных x и y :

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}, \quad (1)$$

где (x_1, \dots, x_N) – выборка переменной x
 (y_1, \dots, y_N) – выборка переменной y ,

$\bar{x} = 1/N \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = 1/N \sum_{i=1}^N y_i$ – выборочные средние.

В данном случае количество переменных будет равно количеству параметров радиоизлучающих объектов. Рассчитывая значения зависимости параметров, получаем матрицу ковариации:

$$M = \{M_{ij}\},$$

$$M_{ij} = \text{cov}(x^i, x^j) = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k^i - \bar{x}^i)(x_k^j - \bar{x}^j)}{N}, \quad (2)$$

где $x_k^i = \Delta f_{ik} = |f_{ik}^o - f_{ik}^r|$ – разность k -го элемента выборки i -го параметра;

$\bar{x}^i = 1/N \sum_{k=1}^N x_k^i$ – выборочное среднее i -го параметра.

На основании рассчитанной матрицы ковариации объектов можно сформировать функцию, определяющую меру тождественности двух радиоизлучающих объектов, а на основании данной функции выработать пороговое значение меры тождественности, исходя из которого принимать решение о тождественности либо нетождественности радиоизлучающих объектов.

Также на основании матрицы ковариации возможно рассчитать меру тождественности каждой пары объектов.

В данном случае за меру тождественности между парой объектов принимается расстояние Махаланобиса, рассчитываемое на основе матрицы ковариации:

$$R_j = \sqrt{(\Delta f_i)^T M^{-1} (\Delta f_i)}, \quad i = 1..N + O, \quad (3)$$

где Δf_i – вектор разности параметров пары объектов.

Пример матрицы ковариации из вычислительного эксперимента:

$$\begin{pmatrix} 33514,49583 & -155,12752 & 0,40686 & 0,28785 & -0,20787 \\ -155,12752 & 95,56128 & -0,00849 & 0,00057 & -0,02275 \\ 0,40686 & -0,00849 & 2,55111 \cdot 10^{-5} & 4,48876 \cdot 10^{-6} & -8,60123 \cdot 10^{-6} \\ 0,28785 & 0,00057 & 4,48876 \cdot 10^{-6} & 5,68693 \cdot 10^{-6} & -7,58706 \cdot 10^{-6} \\ -0,20787 & -0,02275 & -8,60123 \cdot 10^{-6} & -7,58706 \cdot 10^{-6} & 3,30275 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Пусть $A = (A_1, \dots, A_N) = \{R_j\}, j = 1..N$ – массив мер тождественности для отождествленных объектов.

Обозначим $B = (B_1, \dots, B_M) = \{R_j\}, j = N..N + O$ – массив мер тождественности для неоттождествленных объектов.

Затем сделаем предположение, что сформированные выборки подчиняются закону нормального распределения.

Далее произведем расчет среднеквадратического отклонения каждой из выборок:

$$m_1 = 1/N \sum_{i=1}^N A_i, \quad s_1 = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (A_i - m_1)^2}, \quad (4)$$

$$m_2 = 1/O \sum_{i=1}^O B_i, \quad s_2 = \sqrt{1/O \sum_{i=1}^O (B_i - m_2)^2}. \quad (5)$$

Необходимо рассчитать пороговое значение меры тождественности объектов, чтобы оно минимизировало сумму вероятности ложного отождествления и вероятности пропуска цели (рис. 2).

Для расчета требуется решить уравнение:

$$\frac{1}{s_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_1)^2}{2s_1^2}} = \frac{1}{s_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_2)^2}{2s_2^2}}.$$

Плотность распределения случайной величины

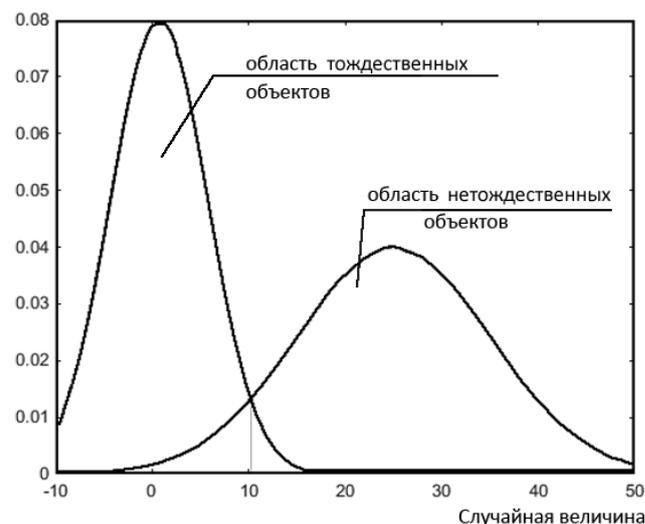


Рис. 2. Иллюстрация расчета порогового значения

Данное уравнение будет иметь два решения:

$$1) x_1 = \frac{m_1 s_2^2 - m_2 s_1^2 + s_1 s_2 \sqrt{2 s_2^2 \ln\left(\frac{s_2}{s_1}\right) - 2 s_1^2 \ln\left(\frac{s_2}{s_1}\right) - 2 m_1 m_2 + m_1^2 + m_2^2}}{s_1^2 - s_2^2};$$

$$2) x_2 = \frac{m_2 s_1^2 - m_1 s_2^2 + s_1 s_2 \sqrt{2 s_2^2 \ln\left(\frac{s_2}{s_1}\right) - 2 s_1^2 \ln\left(\frac{s_2}{s_1}\right) - 2 m_1 m_2 + m_1^2 + m_2^2}}{s_1^2 - s_2^2}.$$

Если $(m_1 < m_2)$, тогда $R_{nop} = x_1$, иначе $R_{nop} = x_2$.

Порог тождественности также можно рассчитать следующим образом.

Пусть R_1, \dots, R_m – расстояния Махаланобиса отожествленных пар объектов,

R_{m+1}, \dots, R_n – расстояния Махаланобиса неотожествленных пар объектов.

Рассмотрим $X^n = \{x^j, y^j\}$ – обучающую выборку, где $x^j = R_j$

$$y^j = \begin{cases} 1, j \in [1, m], \\ -1, j \in [m+1, n]. \end{cases} \quad (6)$$

Зададим функцию отступа $P^j(\alpha_0) = y^j f(x^j, \alpha_0)$, $f(x^j, \alpha_0) = (\alpha_0 - x^j)$, $P^j(\alpha_0) = y^j(\alpha_0 - x^j)$.

$P^j(\alpha_0) < 0$ – алгоритм допускает ошибку;

$P^j(\alpha_0) > 0$ – алгоритм дает правильный ответ.

Определим функцию потерь $L(P^j(\alpha_0)) = (1 - P^j(\alpha_0))^2$

и определим логическую функцию $S(P) = \begin{cases} 1, P < 0 \\ 0, P > 0 \end{cases}$,

тогда $L(P^j(\alpha_0))$ – монотонно невозрастающая функция отступа, мажорирующая пороговую функцию потерь $S(P)$, то есть $L(P) \geq S(P)$. Тогда минимизацию суммарных потерь можно рассматривать как приближенный метод минимизации эмпирического риска числа ошибок по обучающей выборке:

$$\tilde{Q}(\alpha_0, x^l) = \sum_{j=1}^n S(P^j(\alpha)) \leq Q(\alpha_0, x^l) = \sum_{j=1}^n L(P^j(\alpha)) \rightarrow \min(\alpha_0);$$

$$Q(\alpha_0, x^l) = \sum_{j=1}^n L(P^j(\alpha)) = \sum_{j=1}^n (1 - P^j(\alpha_0))^2 = \sum_{j=1}^n (1 - y^j(\alpha_0 - x^j))^2 \rightarrow \min(\alpha_0);$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha_0} = \frac{\partial \sum_{j=1}^n (y^j(\alpha_0 - x^j)^2 - 2y_j(\alpha_0 - x^j))}{\partial \alpha_0} =$$

$$= \sum_{j=1}^n (y^j(\alpha_0 - x^j) - y^j) = 0;$$

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{j=1}^n x_j y_j - \sum_{j=1}^n y_j}{\sum_{j=1}^n y_j}.$$

ПОСТАНОВКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для вычислительного эксперимента возьмем следующий состав объектов обстановки:

- 2 своих корабля ТГ;
- 12 объектов противника;
- 10 видов РЛС, случайно распределенных по кораблям.

Каждый свой объект имеет радиус радиолокационной наблюдаемости, объединение зон кораблей образует зону А.

Для вычислительного эксперимента будем использовать следующий алгоритм:

1. Инициализация данных по объектам;
2. Формирование измерений излучений первым кораблем в зоне А – L_{Asour1} ;
3. Формирование измерений излучений вторым кораблем в зоне А – L_{Asour2} ;
4. Формирование матриц оценок обучающей выборки по каждому параметру $M_{A1}, M_{A2}, M_{A3}, M_{A4}, M_{A5}$ размером $N_A \times N_A$, где N_A – количество излучений, одновременно наблюдаемых первым и вторым кораблём в зоне А;
5. Расчет матрицы ковариации по тождественным объектам;
6. Расчет порогового значения для оценки тождественности радиоизлучающих объектов;
7. Формирование измерений излучений первым кораблем в зоне В – L_{Bsour1} ;
8. Формирование измерений излучений вторым кораблем в зоне В – L_{Bsour2} ;
9. Формирование матриц оценок тестовой выборки по каждому параметру $M_{B1}, M_{B2}, M_{B3}, M_{B4}, M_{B5}$ размером $N_B \times N_B$, где N_B – количество излучений, одновременно наблюдаемых первым и вторым кораблём в зоне В;
10. Формирование обобщенной матрицы оценок тождественности радиоизлучающих целей;

11. Решение задачи оптимизации для отождествления объектов на основе матрицы оценок тождественности излучений от объектов;

12. Оценка отождествленных объектов в соответствии с рассчитанным пороговым значением;

13. Накопление статистики тождественных объектов по результатам решения задачи;

14. Решение задачи оптимизации для уточнения решения задачи отождествления на основе матрицы статистики отождествлений объектов.

При оценке тождественности объектов в соответствии с рассчитанным пороговым значением (п. 11 предлагаемого алгоритма), предполагая, что сформированные выборки подчиняются закону нормального распределения, принимается решение об отождествлении 144 пар объектов от различных источников. Из

них по 10 парам решение принято неверно (см. табл. 1, где «1» – тождественные объекты; «-1» – неверно принятые решения). Таким образом, из 12 вариантов 5 ответов ошибочны, что составляет приблизительно 42 %.

Очевидно, что даже в простой ситуации требуется решение задачи оптимизации для разрешения неоднозначности. Это обуславливается небольшим разбросом параметров РЛС по сравнению с ошибками их измерения и малым размером обучающей выборки. Таким образом, необходима дополнительная обработка, которая заключается в решении задачи оптимизации оценочной функции.

По результатам 10 экспериментов получили следующую матрицу (см. табл. 2, где «*» – индексы ненулевых элементов решения).

Таблица 1

Матрица результатов отождествления по пороговому признаку

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
D1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
D4	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0
D5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
D6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
D7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
D8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0
D9	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
D10	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
D11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
D12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 2

Матрица статистики (количества) отождествлений каждой пары объектов

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
D1	5*	0	0	0	0	0	0	2	1	0	2	0
D2	0	8*	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
D3	0	0	9*	0	1	0	0	0	0	0	0	0
D4	1	0	0	4*	0	1	0	0	1	2	0	1
D5	0	0	0	1	6*	1	1	0	1	0	0	0
D6	0	0	0	1	1	3*	0	1	0	2	2	0
D7	0	0	0	0	1	1	6*	0	1	0	0	1
D8	2	0	0	0	0	2	1	4*	1	0	0	0
D9	0	0	0	3	1	0	1	1	4*	0	0	0
D10	0	0	1	0	0	1	0	1	1	6*	0	0
D11	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	5*	0
D12	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	7*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье представлены концептуальная и математическая модели задачи отождествления радиоизлучающих целей. Произведена декомпозиция задачи на составляющие, приведены подробные описания математических моделей и алгоритмов наиболее сложных (в теоретическом и алгоритмическом плане) ее частей. В дополнение к работе [9] представлены математическая модель и алгоритм отождествления радиоизлучающих объектов по геометрическим признакам, а также новая математическая модель формирования меры тождественности радиоизлучающих объектов по сигнальным признакам с использованием методов машинного обучения. В представленных моделях и алгоритмах рассматривается общий случай отождествления радиоизлучающих целей от трех и более объектов, приведены подходы к оценке меры тождественности радиоизлучающих объектов, данные о которых поступают от различных источников. Кроме того, предлагаемый алгоритм автоматического отождествления учитывает результаты работы средств РЭБ по отождествлению радиоизлучающих объектов с радиолокационными, для последующей оценки зависимости сигнальных признаков объектов друг от друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман [и др.] / под ред. проф. Я.Д. Ширмана. – М. : ЗАО «Маквис», 1998.
2. Теоретические основы радиолокации / под ред. проф. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М. : Радио и связь, 1993.
4. Кваснов А.В. Метод отождествления радиоизлучающих целей пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями на основе t-критерия Стьюдента // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2016. – № 5. – С. 35–41.
5. Белов С.Г. Использование нечеткой логики при отождествлении воздушных радиолокационных объектов в процессе их многоцелевого сопровождения // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/5/text.pdf>.
6. Щудро И.А. Дискретный выбор решающих правил отождествления методом комбинаторной оптимизации // Cloud of Science. – 2015. – № 1 (2). – С. 147–153.
7. Буров С.А. Метод комплексной обработки информации о воздушной обстановке // Сб. ст. Молодеж. науч.-практ. конф. «Направления совершенствования АСУ», Ульяновск, 19–20 марта 2014 г. Секция 1. – Ульяновск : ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», 2014. – С. 44–54.
8. Шишанов С.В. Способ устранения неоднозначности измерения координат в многоцелевой обстановке для многопозиционной сверхширокополосной РЛС // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2016. – № 5. – С. 30–35.
9. Масленникова Т.Н., Мурашов А.А., Пифтанкин А.Н. Отождествление информации от пассивных

средств локации кораблей соединения // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 2 (44). – С. 10–17.

REFERENCES

1. Shirman Ia.D. et al. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniia i teoriia. Spravochnik. Pod red. prof. Ia.D. Shirmana* [Radioelectronic Systems: Fundamentals and Theory of Constructing. Tutorial edited by Prof. Ia.D. Shirman]. Moscow, ZAO Makvis Publ., 1998.
2. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii. Pod red. prof. Ia.D. Shirmana* [Fundamentals of Radar Theory. Tutorial edited by Prof. Ia.D. Shirman]. Moscow, Sov. radio Publ., 1970.
3. Cherniak B.C. *Mnogopozitsionnaia radiolokatsiia* [Multipositional Radar-Location]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1993.
4. Kvasnov A.V. Metod otzhdestvleniia radioizluchaiushchikh tselei prostranstvenno-raznesennymi passivnymi radioelektronnymi stantsiiami na osnove t-kriteriia Studenta [Method of Radio-Emitting Target Identification from Passive Spatial Diversity Radio-Electronic Stations on the Basis of Student's t-Test]. *Izvestiia vuzov Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities: Radioelectronics], 2016, no. 5, pp. 35–41.
5. Belov S.G. Ispolzovanie nechetkoi logiki pri otzhdestvlenii vozdushnykh radiolokatsionnykh obektov v protsesse ikh mnogotselevogo soprovozhdeniia [The Use of Fuzzy Logic for the Identification of Airborne Radar Objects during their Multi-Purpose Tracking]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, no. 5. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/5/text.pdf>.
6. Shchudro I.A. Diskretnyi vybor reshaiushchikh pravil otzhdestvleniia metodom kombinatornoi optimizatsii [The Decisive Rules of Identification Discrete Choice by the Method of Combinatorial Optimization]. *Cloud of Science*, 2015, no. 1 (2), pp. 147–153.
7. Burov S.A. Metod kompleksnoi obrabotki informatsii o vozdushnoi obstanovke [Method of Processing the Complex Information on Air Situation]. *Sb. st. Molodezh. nauch.-prakt. konf. "Napravleniia sovershenstvovaniia ASU", Ulyanovsk, 19–20 marta 2014 g. Sektsiia 1* [Proc. of Youth Sci. Conf. and Workshop on Methods of Automation Control Systems Improvement. Section 1]. Ulyanovsk, FRPC JSC 'RPA 'Mars' Publ., 2014, pp. 44–54.
8. Shishanov S.V. Sposob ustraneniia neodnoznachnosti izmereniia koordinat v mnogotselevoi obstanovke dlia mnogopozitsionnoi sverkhshirokopolosnoi RLS [The Technique of Cancellation Ambiguity Coordinates Measurement in the Multi-Target Environment for Ultra-Wideband Radar]. *Izvestiia vuzov Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities: Radioelectronics], 2016, no. 5, pp. 30–35.
9. Maslennikova T.N., Murashov A.A., Piftankin A.N. Otzhdestvlenie informatsii ot passivnykh sredstv lokatsii korablei soedineniia [Identification of Information Received from Passive Radar Means of Task Force Ships]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2016, no. 2 (44), pp. 10–17.