

УДК 623.5

Т.Н. Масленникова, А.А. Мурашов, А.Н. Пифтанкин

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ ПАССИВНЫХ СРЕДСТВ ЛОКАЦИИ КОРАБЛЕЙ СОЕДИНЕНИЯ

Масленникова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, окончила радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Начальник научно-исследовательской лаборатории ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области информационного обеспечения автоматизированных систем специального назначения. [e-mail: mars@mv.ru].

Мурашов Алексей Александрович, окончил факультет математики и информационных технологий Ульяновского государственного университета. Математик ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области информационного обеспечения автоматизированных систем. [e-mail: mars@mv.ru].

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

Аннотация

В данной работе представлена математическая модель задачи отождествления данных от пассивных средств локации и формирования метрической функции, позволяющей оценивать степень тождественности различных объектов на основании опыта работы оператора и алгоритмов автоматического отождествления радиолокационной и радиотехнической информации. При формировании метрической функции использовались методы машинного обучения, в частности метод опорных векторов. Представлены способ и математическая модель решения проблемы неоднозначности отождествления радиотехнической информации на основании полученной метрической функции оценивания степени тождественности различных объектов. Данная математическая модель сведена к математической модели задач линейного программирования и решена стандартными методами. С использованием среды Matlab поставлен вычислительный эксперимент, в рамках которого разработан алгоритм отождествления радиотехнических объектов. По данным, полученным в вычислительном эксперименте, произведены уточнения алгоритма и получен положительный результат использования модели.

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

IDENTIFICATION OF INFORMATION RECEIVED FROM PASSIVE RADAR MEANS OF TASK FORCE SHIPS

Tatiana Nikolaevna Maslennikova, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Head of the Research-and-Development laboratory at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of publications in the field of information support of special-purpose computer-aided systems. e-mail: mars@mv.ru.

Aleksei Aleksandrovich Murashov, graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies of Ulyanovsk State University; Mathematician at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of software for automated systems. e-mail: mars@mv.ru.

Aleksandr Nikolaevich Piftankin, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Mathematics and Mechanics of Ulyanovsk State University; Chief Specialist at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of publications in the field of fighter aviation planning and control. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article considers the mathematical model for identification of information received from passive radar means and construction of a metric form allowing to estimate the degree of different objects identity on the basis of an operator's experience and algorithms of automatic identification of radar and radio-radar information. While constructing the metric form, machine-learning methods were used, particularly support vector machine. The method and the mathematical model for solving the ambiguity problem of radio-radar information identification based on the obtained mathematical function

estimating degree of different objects identity are given. This mathematical model is reduced to the linear programming mathematical model and presented on the basis of standard methods. The computational experiment was performed in Matlab. In the context of the experiment, the algorithm of radio-radar objects identification was developed. With the use of data obtained in the computational experiment, the algorithm specification was hold and the positive result of the model usage was obtained.

Key words: passive radar means, identification of information, objects identity measure, machine-learning method.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач противовоздушной обороны и управления движением возникает необходимость сопровождения воздушных и надводных объектов в режиме радиомолчания. Этот режим, как правило, характеризуется использованием пассивных средств локации (ПСЛ) и, в обеспечение скрытности, исключением применения активных средств локации (АСЛ). В результате использования ПСЛ в автоматизированной системе управления (АСУ) формируется следующий состав данных по сопровождаемым объектам: пеленг на объект, несущая частота, частота повторения сигнала, длительность импульса сигнала, период вращения антенны, ширина диаграммы направленности антенны и т. д. В дальнейшем информацию по воздушным и надводным объектам, полученную по результатам работы ПСЛ, будем называть формулярами радиотехнических объектов (ФРТО).

Для обеспечения сопровождения воздушных и надводных объектов тактической обстановки в интересах потребителя требуется выработать данные по местоположению и элементам движения объектов [1]. Для этого используют метод триангуляции – получение информации направлений на объекты с различных точек и расчет позиции объекта как точки пересечения этих направлений (пеленгов на объекты). Одна из проблем, которая возникает при решении данной задачи, – это выявление тождественности информации об одном и том же объекте, полученной от различных кораблей соединения. Только после отождествления ФРТО возможно решить задачу триангуляции и рассчитать местоположения объектов.

Существует ряд различных методик отождествления РТО. Большинство из них основывается на проверке пересечения пеленгов в окрестности заданной точки [2–4]. Для реализации данного способа при работе по надводным объектам требуется, как минимум, три точки приема (корабля соединения). При работе по воздушным объектам достаточно двух кораблей соединения, так как в данном случае производится проверка на принадлежность прямых, проведенных в направлении сопровождаемых объектов одной плоскости. Однако и в том, и в другом случае при определенном местоположении объектов и выработке порогов окрестности пересечения пеленгов объектов приходится учитывать ошибки по взаимной ориентации кораблей соединения и ошибки выработки пеленга на объект ПСЛ, что при близком расположении объектов может привести к ошибочному отождествлению и пропуску цели. К тому же имеют место быть вырожденные случаи расположения целей, когда задачу решить нельзя. Существуют ме-

тодики, являющиеся математическими моделями задачи поддержки оператора при принятии решения об отождествлении. Однако в данных методиках не рассматриваются комплексные алгоритмы автоматического отождествления, учитывающие предыдущий опыт работы операторов, а также результаты работы средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) по отождествлению РТО с радиолокационными. Для автоматического обучения алгоритма отождествления (без участия оператора) необходима одновременная работа средств АСЛ и ПСЛ. Пространство освещения обстановки предлагается разбить на 2 зоны (см. рис. 1). Зона «А» – зона работы активных и пассивных средств освещения обстановки. Зона «В» – зона работы пассивных средств освещения обстановки. Пассивные средства производят отождествление данных от активных и пассивных средств освещения обстановки. Используя эти данные, формируем обучающую выборку тождественных и нетождественных объектов в зависимости от разности характеристических параметров объектов.

Таким образом, предлагается новый метод отождествления ФРТО, учитывающий вышеперечисленные недостатки.

- Зона А – Зона объектов обучающей выборки (зона действия АСЛ и ПСЛ кораблей)
- Зона В – Зона объектов, требующих решения на предмет тождественности (зона действия ПСЛ)

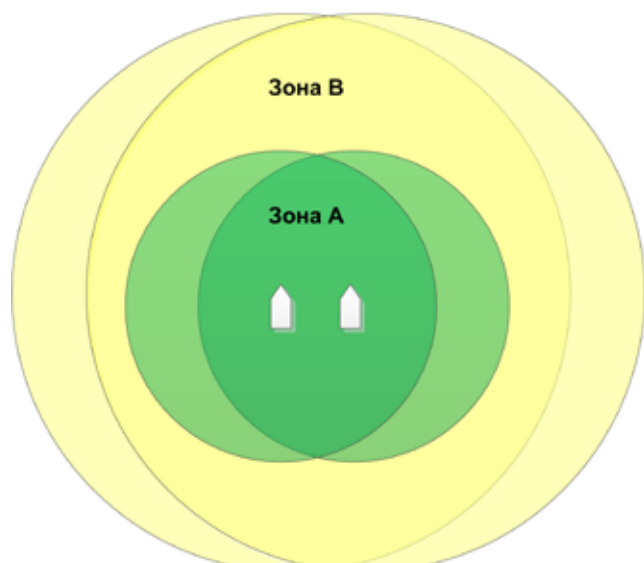


Рис. 1. Разбиение пространства зондирования на зоны действия АСЛ и ПСЛ

Постановка задачи исследования

Для рассмотрения способов и возможностей отождествления ФРТО кораблей соединения необходимо сформировать набор признаков, посредством анализа которых можно принимать решение о тождественности либо нетождественности данных объектов. Для примера предлагается следующий состав параметров:

- пеленг на объект;
- несущая частота;
- частота повторения сигнала;
- длительность импульса сигнала;
- период вращения антенны;
- ширина диаграммы направленности антенны и т. д.

Информация по ФРТО передается с привязкой к кораблю – источнику информации. По данной информации формируется оценка тождественности РТО (см. рис. 2). Для формирования данной оценки выбирается функция $f(v, w)$, которая на основании сравнения векторов характеристик излучающих объектов на разных кораблях формирует числовое значение. Данное значение характеризует степень схожести информации радиотехнических формуляров на различных кораблях. На основании оценок степени схожести характеристик излучения объектов необходимо решить задачу оптимизации, критерием которой является максимизация суммарной схожести радиотехнических формуляров с различных кораблей. Также необходимо получить функцию схожести ФРТО $f(v, w)$. Основой для получения данной функции предлагается опыт работы оператора по установке параметров значимости и отождествлению объектов с различными признаками.

Задача формирования пар отождествленных объектов

Введем следующие обозначения:

$W = \{w^1, w^2, \dots, w^n\}$ – множество формуляров пассивных объектов (ФПО) от 1-го корабля соединения;

$V = \{v^1, v^2, \dots, v^m\}$ – множество ФПО от 2-го корабля соединения;

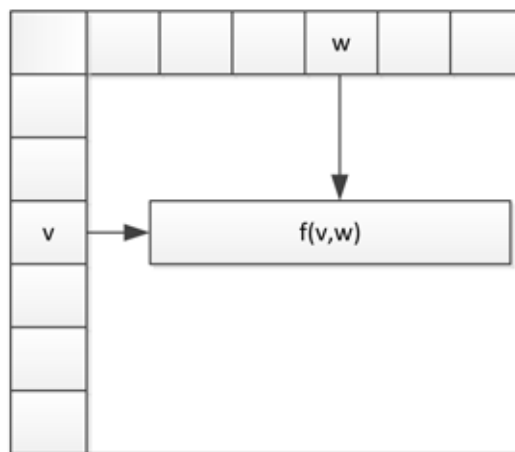
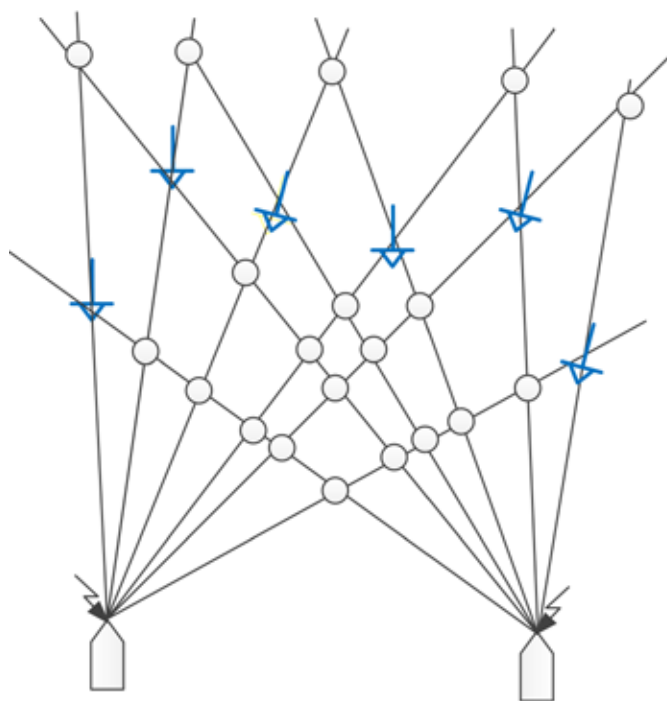
$S = \{f(v^i, w^j)\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ – матрица оценок тождественности объектов, дополненная до квадратной $c_{ij} = \begin{cases} f(v^i, w^j) & \text{при } j = 1 \dots m, i = 1 \dots n, \\ 0 & \text{при } j = m + 1 \dots n, i = 1 \dots n. \end{cases}$

Необходимо решить задачу оптимизации $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ при следующих ограничениях:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1: i = 1 \dots N, \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1: j = 1 \dots N, x_{ij} = \{0, 1\}.$$

Для решения данной задачи приводим матрицу $C = \{c_{ij}\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$ к целочисленному виду: $c_{ij}^1 = \text{int}(c_{ij}k + 0,5), 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$, и решаем задачу о назначениях с помощью алгоритма Флада [5]. Коэффициент k рассчитывается исходя из требуемой точности каждого из параметров.

По результатам решения задачи оптимизации формируются пары отождествленных объектов, после чего рассчитываются параметры обобщенных формуляров, полученных в результате отождествления ФРТО.



V – вектор радиотехнической информации по объекту от 1-го корабля

W – вектор радиотехнической информации по объекту от 2-го корабля

- Возможное расположение объекта
- ➔ Реальное местоположение объекта

Рис. 2. Иллюстрация графического представления возможных решений и матрицы оценок отождествления объектов

ЗАДАЧА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ВАЖНОСТИ ПАРАМЕТРОВ (ЗАДАЧА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ФРТО)

Пусть имеются 2 ФРТО (измерения), полученные от различных кораблей. Обозначим $v = (v_1, \dots, v_n)$ – вектор измерения параметров 1-го объекта, $w = (w_1, \dots, w_n)$ – вектор измерения параметров 2-го объекта.

Очевидно, что при сопоставлении 2-х объектов достаточно информации о модуле разности их параметров: $f(v, w) = f(x)$, где $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x_i = abs(w_i - v_i)$. Для формирования математической модели функции предлагается сделать допущение о ее линейности:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i. \tag{1}$$

Естественно, возникает задача автоматического расчета коэффициентов значимости параметров, при этом хотелось бы учитывать не сами коэффициенты, устанавливаемые оператором, а результаты ручного отождествления оператором конкретных объектов, а также результаты автоматического отождествления радиолокационных и радиотехнических объектов средствами РЭБ.

В контексте формулировки задачи классификации имеем следующую постановку задачи.

Пусть $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор нормированных параметров пары объектов (x_1 – разность несущих частот, x_2 – разность частот повторения импульсов, и т. д.). По результатам опытов имеем обучающую выборку α , $y^j = \{-1, 1\}$ – результат j -го опыта, где j – номер опыта. При $y^j = -1$ – объекты не тождественны, а при $y^j = 1$ – объекты тождественны, $x^j = (x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j)$ – вектор нормированных параметров пары объектов, полученных по результатам j -го опыта.

Необходимо построить алгоритм $a(x, \alpha) = sign(f(x, \alpha))$, который будет выдавать значения 1 в случае тождественности пары объектов и -1 – в случае нетождественности.

Зададим функцию $g(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$, определяющую меру тождественности пары объектов, где $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ – вектор коэффициентов важности каждого параметра. Тогда $f(x, \alpha) = g(x, \alpha) - \alpha_0$, где α_0 – неизвестное пороговое значение функции $g(x, \alpha)$. При $g(x, \alpha) > \alpha_0$ принимается решение о тождественности пары объектов, при $g(x, \alpha) < \alpha_0$ принимается решение о нетождественности пары объектов. Как можно заметить $(g(x, \alpha) > \alpha_0) \approx (f(x, \alpha) > 0)$, а $(g(x, \alpha) < \alpha_0) \approx (f(x, \alpha) < 0)$, таким образом, уравнение $f(x, \alpha) = 0$ определяет разделяющую поверхность пространства объектов. Задача заключается в том, чтобы, имея опыт работы задачи отождествления радиолокационных объектов и средств РЭБ (в зоне А – зоне совместного действия радиолокационных и радиотехнических средств) по отождествлению ФРТО $X^l = \{x^j, y^j\}$, а именно обучающую выборку,

рассчитать вектор значимости параметров $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, а также пороговое значение α_0 функции $g(x, \alpha)$, определяющей меру тождественности пары объектов. Вообще говоря, значение α_0 не будет использоваться при окончательном принятии решения на отождествление, так как данный подход не устраняет проблему неоднозначности решения, однако для обучающей выборки это значение будет «легитимным», т. е. при сравнении $g(x^j, \alpha)$ с α_0 будет получен правильный ответ y^j .

Назовем функцию $M^j(\alpha) = y^j f(x^j, \alpha)$ отступом опыта $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$ относительно алгоритма классификации $a(x, \alpha) = sign(f(x, \alpha))$ [6–8].

Если $M^j(\alpha) < 0$, то алгоритм $a(x, \alpha) = sign(f(x, \alpha))$ допускает ошибку на опыте $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$. Чем больше значение отступа, тем правильнее и надежнее классификация объекта $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$.

Определим функцию потерь $L(M^j(\alpha)) = (1 - M^j(\alpha))^2$ и определим логическую функцию $s(M) = \begin{cases} 1, M < 0; \\ 0, M > 0. \end{cases}$ Тогда $L(M^j(\alpha))$ –

монотонно невозрастающая функция отступа, мажорирующая пороговую функцию потерь $s(M)$. То есть $L(M) \geq s(M)$. Тогда минимизацию суммарных потерь можно рассматривать как приближенный метод минимизации эмпирического риска числа ошибок на обучающей выборке:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(\alpha, X^l) &= \sum_{j=1}^l s(M^j(\alpha)) \leq Q(\alpha, X^l) = \\ &= \sum_{j=1}^l L(M^j(\alpha)) \rightarrow \min_{\alpha}. \end{aligned} \tag{2}$$

Поэтому в дальнейшем будем минимизировать данный функционал:

$$\begin{aligned} Q(\alpha, X^l) &= \sum_{j=1}^l L(M^j(\alpha)) = \\ &= \sum_{j=1}^l (1 - M^j(\alpha))^2 \rightarrow \min_{\alpha}. \end{aligned} \tag{3}$$

Сформулируем задачу минимизации в терминах начальных обозначений:

$$\begin{aligned} Q(\alpha, X^l) &= \sum_{j=1}^l (1 - M^j(\alpha))^2 = \\ &= \sum_{j=1}^l (1 - y^j f(x^j, \alpha))^2 = \\ &= \sum_{j=1}^l (1 - y^j (g(x^j, \alpha) - \alpha_0))^2 = \\ &= \sum_{j=1}^l \left(1 - y^j \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^j - \alpha_0\right)\right)^2 \rightarrow \min_{\alpha}, \end{aligned} \tag{4}$$

где x_i^j – значение i -го параметра для j -го опыта; y^j – результат j -го опыта.

Для решения задачи минимизации введем обозначения:

$\bar{\alpha}_0 = -\alpha_0, \bar{x}_i^j = x_i^j y^j, \bar{y}^j = 1, i = 1, \dots, n, 1 \leq j \leq l$
и новую переменную $\bar{x}_0^j = 1, j = 1, \dots, l$.

Тогда $Q(\alpha, X^l) = \sum_{j=1}^l (\bar{y}^j - \sum_{i=0}^n \bar{\alpha}_i \bar{x}_i^j)^2 \rightarrow \min$.

Преобразуем запись в векторную форму:

$$\bar{y} = (\bar{y}^1, \bar{y}^2, \dots, \bar{y}^l), \quad (5)$$

$$\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \dots, \bar{\alpha}_n), \quad (6)$$

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & \bar{x}_1^1 & \dots & \bar{x}_n^1 \\ 1 & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \bar{x}_1^l & \dots & \bar{x}_n^l \end{pmatrix}, \quad (7)$$

тогда $Q(\bar{\alpha}, \bar{X}) = (\bar{y} - \bar{X}\bar{\alpha})^T (\bar{y} - \bar{X}\bar{\alpha}) \rightarrow \min$ – квадратичная функция от $(n+1)$ неизвестных параметров. Дифференцируя функцию, находим:

$$\frac{\partial Q(\alpha, \bar{X})}{\partial \alpha} = -2\bar{X}^T (\bar{y} - \bar{X}\alpha), \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 Q(\bar{\alpha}, \bar{X})}{\partial \bar{\alpha} \partial \bar{\alpha}^T} = 2\bar{X}^T \bar{X}. \quad (9)$$

Матрица $\bar{X}^T \bar{X}$ – невырожденная и положительно определена, поэтому минимум функции $Q(\bar{\alpha}, \bar{X})$ достигается, когда первая производная по $\bar{\alpha}$ обращается в ноль. Поэтому необходимо решить уравнение $\bar{X}^T (\bar{y} - \bar{X}\alpha) = 0$ относительно $\bar{\alpha}$:

$$\bar{X}^T (\bar{y} - \bar{X}\bar{\alpha}) = 0, \quad (10)$$

$$\bar{X}^T \bar{y} = \bar{X}^T \bar{X} \bar{\alpha}, \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T \bar{y}. \quad (12)$$

Таким образом, рассчитан вектор коэффициентов важности $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, $\alpha_i = \bar{\alpha}_i, 1 \leq i \leq n$, а также пороговое значение $\alpha_0 = -\bar{\alpha}_0$ функции $g(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$, определяющей меру схожести различных объектов.

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

Для вычислительного эксперимента возьмем следующий состав объектов обстановки:

- 2 корабля тактической группы;
- 12 объектов противника;
- 10 видов радиолокационных станций (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 кораблями в зоне А;

5) Расчет матрицы характеристик объектов M_p размером $(N_p = 5) \times N_B^2$, где N_p – количество параметров (характеристик) объектов, по которым проводится оценивание, $N_B^2 = N_B \times N_B$ – количество пар объектов от первого и второго кораблей, по которым проводим оценивание;

6) Расчет параметров разделяющей гиперплоскости $(\alpha_1, \dots, \alpha_5)$ и порогового значения метрики тождественности α_0 методом опорных векторов с использованием критерия минимизации эмпирического риска;

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 кораблями в зоне В;

10) Формирование обобщенной матрицы оценок тождественности излучений с использованием вектора нормали разделяющей гиперплоскости α :



Рис. 3. Графическая иллюстрация принятия решения на основе построения разделяющей гиперплоскости

$$M = \alpha_1 M_{B1} + \alpha_2 M_{B2} + \alpha_3 M_{B3} + \alpha_4 M_{B4} + \alpha_5 M_{B5};$$

Таблица 1

Матрица результатов отождествления по пороговому признаку

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

11) Оценка отождествленных объектов в соответствии с рассчитанным пороговым значением;

12) Решение задачи оптимизации для разрешения неоднозначности отождествления объектов на основе матрицы оценок тождественности излучений от объектов;

13) Накопление статистики тождественных объектов по результатам решения задачи;

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

Для оценки алгоритма предлагается сгенерировать обстановки различной сложности. Первый вариант наиболее простой, когда у каждого объекта имеется по одной РЛС различного типа.

При оценке тождественности объектов в соответствии с рассчитанным пороговым значением (п. 11 предлагаемого алгоритма) принимается решение по отождествлению по 41 паре объектов от различных источников, из них по 29 парам решение принято неверно (см. табл. 1, где 1 – обозначены верные ответы, -1 – неверные ответы, см. рис. 3). Таким образом, из 144 вариантов 29 ответов ошибочны, что составляет приблизительно 20%.

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. Дополнительная обработка заключается в использовании функции оценивания тождественности $f(x) = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5$ в качестве показателя критерия оптимизации и решении задачи оптимизации как максимизации суммарного показателя тождественности объектов.

После данной обработки полученный процент ошибок существенно уменьшается и составляет приблизительно 0,83%. Для сведения процента ошибок к нулю используем накопление статистики по результатам решения задачи оптимизации, использующей в качестве критерия суммарный показатель функции тождественности $f(x) = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5$ [9]. По результатам 10 экспериментов имеем следующую матрицу (см. табл. 2).

После накопления вновь решаем задачу оптимизации. Показателем критерия является количество отождествлений каждой пары объектов (символом * в таблице 2 обозначены индексы ненулевых элементов решения).

Таблица 2

Матрица статистики (количества) отождествлений каждой пары объектов для первого варианта обстановки (простого)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
D1	10*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
D2	0	8*	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
D3	0	0	9*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	0	0	0	8*	0	0	0	2	0	0	0	0
D5	0	0	0	0	10*	0	0	0	0	0	0	0
D6	0	0	0	0	0	9*	0	1	0	0	0	0
D7	0	1	0	0	0	0	9*	0	0	0	0	0
D8	0	0	0	2	0	1	0	7*	0	0	0	0
D9	0	1	0	0	0	0	0	0	8*	1	0	0
D10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9*	0	0
D11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10*	0
D12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9*

Таблица 3

Матрица статистики (количества) отождествлений каждой пары объектов для второго варианта обстановки (сложного)

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

Матрица зависимости процентов ошибок от количества излучающих средств и этапа обработки

Этап обработки	Количество РЛС					
	1	2	4	6	8	10
Формирование отождествленных объектов в соответствии с пороговым значением функции тождественности	20%	42%	61%	63%	64,2%	63,9%
Формирование отождествлений объектов на основе максимизации суммарного показателя функции тождественности	0,84%	23%	45%	46%	46,9%	46,7%
Формирование отождествлений объектов на основе максимизации показателя количества отождествлений	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Второй вариант обстановки возьмем более сложным. Предположим, у каждого объекта есть несколько различных РЛС, причем типы РЛС могут совпадать и моменты их включения выбираются случайным образом. После пороговой обработки процент ошибочных отождествлений составляет приблизительно 63,9%. После обработки, основанной на максимизации суммарного показателя функции тождественности, процент ошибочных отождествлений составит 46,7%. Соответствующая матрица статистики отождествлений каждой пары объектов выглядит следующим образом (см. табл. 3).

После обработки, основанной на максимизации количества отождествлений, процент ошибочных отождествлений сводится к нулю.

Таким образом, представлены и проанализированы два крайних случая размещения РЛС различных (10) типов на кораблях. В первом случае на каждом объекте размещено по 1 РЛС различных типов, на 4-х объектах типы РЛС совпадают (так как объектов 12, а типов РЛС – 10). Во втором случае на каждом объекте размещено по 10 типов РЛС, в каждый момент времени случайно выбирается один из типов РЛС, который дает излучение. Результаты обработки промежуточных случаев представлены в таблице 4. Постановка вычислительного эксперимента осуществлялась с использованием среды моделирования Matlab.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены математическая модель и алгоритм задачи отождествления данных пассивной локализации, полученных с различных кораблей соединения. Проведен обзор существующих подходов и методик решения данной задачи, приведены их недостатки. Предложена математическая модель формирования функции, определяющей меру тождественности различных объектов (задача расчета коэффициентов важности параметров) на основании существующего опыта отождествления и использования расширенного состава параметров отождествляемых объектов. Данная математическая модель входит в класс современных и стремительно развивающихся методов машинного обучения. С учетом сформированной функции представлена математическая модель отождествления ФРТО, позволяющая свести поставленную задачу к задаче о назначениях и решить ее с помощью алгоритма Флада. Представленный алгоритм обработки

сформирован на основании результатов вычислительного эксперимента и анализа ошибок на каждом из этапов обработки данных.

Таким образом, корректность и полезность предложенной в статье математической модели подтверждается вычислительными экспериментами и позволяет минимизировать ошибки в решении задачи отождествления от ПСЛ кораблей соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САПР. Учебник для вузов. / А.А. Дуров [и др.]. – Изд. 2-е перераб. и испр. – П.-Камчатский : КамчатГТУ, 2005. – 280 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман [и др.] / под ред. проф. Я.Д. Ширмана. – М. : ЗАО «Маквис», 1998.
3. Теоретические основы радиолокации / под ред. проф. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М. : Радио и связь, 1993.
5. Черчмен У., Акоф Р., Арноф Л. Введение в исследование операций. – М. : Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 488 с.
6. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М. : Наука, 1979.
7. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. / С.А. Айвазян [и др.]. – М. : Финансы и статистика, 1989.
8. Мгеладзе А., Гоциридзе Г. Кластер-анализ в исследовании организационных систем. – Тбилиси, 2009.
9. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М. : Физматлит, 2002. – 496 с.

REFERENCES

1. Durov A.A. et al. *Sudovaya radiolokatsiya. Sudovye radiolokatsionnye sistemy i SAPR. Uchebnik dlia vuzov. Izd. 2-e pererab. i ispr.* [Ship Radar. Shipborne Radar and CAD-Systems. University-and-College Textbook. the 2nd revised and corrected Edition]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatSTU Publ., 2005. 280 p.
2. Shirman Ya.D. et al. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniia i teoriia. Spravochnik pod red. prof. Ya.D.*

Shirmana [Radioelectronic Systems. Fundamentals and Theory. Guide ed. by Prof. Ya.D. Shirman]. Moscow, ZAO Makvis Publ., 1998.

3. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii pod red. prof. Ya.D. Shirmana* [Theoretical Fundamentals of Radar. Edited by Prof. Ya.D. Shirman]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970.

4. Chernyak V.C. *Mnogopozitsionnaia radiolokatsiia* [Multisite Radar System]. Moscow, Radio i sviaz Publ, 1993

5. Churchman W., Ackoff R., Arnoff L. *Vvedenie v issledovanie operatsii* [Introduction to Operations Research]. Moscow, Chief Editorial Board of Physical and Mathematical Literature at Nauka Publ., 1967. 488 p.

6. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimostei po empiricheskim dannym* [Recovery of Dependencies with Empirical Data]. Moscow, Nauka Publ., 1979.

7. Ayvazyan S.A. et al. *Prikladnaia statistika: klassifikatsiia i snizhenie razmernosti* [Applied Statistics. Classification and Dimensionality Reduction]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989.

8. Mgeladze A., Gotsiridze G. *Klaster-analiz v issledovanii organizatsionnykh sistem* [Cluster Analysis in the Study of Organizational Systems]. Tbilisi, 2009.

9. Pugachev V.S. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 496 p.