

УДК: 621.396.96

DOI: 10.53816/20753608_2021_4_79

**КОЛЛЕКТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И СОПРОВОЖДЕНИИ
ИНФОРМАЦИОННЫМИ СЕНСОРАМИ РАЗНОРОДНОЙ ГРУППИРОВКИ**
**COLLECTIVE IDENTIFICATION OF OBJECTS UPON DETECTION AND TRACKING
BY INFORMATION SENSORS OF A HETEROGENEOUS GROUP**

По представлению академика РАРАН А.А. Рахманова

В.Ю. Поздышев¹, А.В. Тимошенко², С.Н. Разиньков³, В.А. Горючкин⁴

¹АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей»,

²АО «Радиотехнический институт им. А.Л. Минца»,

³ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

⁴ПАО «МАК «Вымпел»

V.Yu. Pozdyshev, A.V. Timoshenko, S.N. Razinkov, V.A. Goryuchkin

В статье рассмотрена процедура коллективной идентификации объектов, демаскирующие признаки которых выявляются различными информационными сенсорами разнородной группировки. В соответствии с критерием минимума среднего риска построены алгоритмы идентификации объектов в системе контроля воздушного пространства, базирующиеся на группировании оценок угловых координат с наибольшими значениями условных вероятностей ситуаций отождествления. Исследованы вероятностные показатели эффективности коллективной идентификации объектов в режимах обнаружения и сопровождения информационными сенсорами.

Ключевые слова: структурно-системный мониторинг обстановки, коллективная идентификация объектов, критерий минимума среднего риска, линейная фильтрация параметров трасс, корректирующее шумовое ускорение.

The article considers the procedure of collective identification of objects, demasking features of which are detected by different information sensors of heterogeneous grouping. In accordance with the criterion of minimum average risk, algorithms for identifying objects in the airspace control system, based on grouping estimates of angular coordinates with the highest values of conditional probabilities of identification situations. The probabilistic performance of collective identification of objects in the modes of detection and tracking information sensors were investigated.

Keywords: structural and system monitoring of the situation, collective identification of objects, criterion of minimum average risk, linear filtering of trace parameters, correcting noise acceleration.

Введение

Требования по повышению достоверности и устойчивости анализа обстановки при неуклонном развитии технологий маскировки и обеспе-

чения скрытности функционирования объектов определяют важность совершенствовании комплексной обработке информации, поступающей от информационных сенсоров разнородной группировки. Мониторинг обстановки выполняется в

соответствии со структурно-системным подходом [1] с применением разнородной группировки информационных сенсоров, различающихся принципами функционирования, дальностью действия и набором демаскирующих признаков объектов [2, 3]. За счет комплексирования информационных датчиков расширяется перечень выявляемых характеристик объектов, позволяющий проводить более детальную классификацию их типов (экземпляров) и динамических состояний [4, 5].

Для организации совместного функционирования разнородных информационных сенсоров реализуются процедуры сопровождения объектов на основе фильтрации потоков регистрируемых параметров с минимальной апостериорной дисперсией и идентификации наблюдений в общих зонах контроля [5, 6]. Коллективное распознавание заключается в установлении принадлежности независимых параметров идентификации определенному объекту путем группирования однотипных признаков, инвариантных к изменениям обстановки. В качестве таких признаков выступают характеристики пространственного положения (оценки угловых координат и местоположения) объектов, зафиксированных информационными сенсорами разнородной группировки. При комплексном анализе взаимодополняющих признаков [4, 5] парируются пропуски и ложные проявления объектов в отдельных каналах поиска (наблюдения) [1, 5].

В предлагаемой работе с использованием критерия минимума среднего риска [7] построены алгоритмы коллективной идентификации объектов в системе контроля воздушного пространства, содержащей разнородную группировку информационных сенсоров, при фильтрации параметров трасс и установлении приоритета применения средств мониторинга в текущий момент времени.

Решающее правило о коллективной идентификации объектов принимается для ситуации, характеризуемой максимальной апостериорной вероятностью отождествления признаков [4, 5]. Априорная неопределенность однотипных признаков, обусловленная ошибками обнаружения и измерения их значений в средствах мониторинга, снижается за счет нахождения оценок максимального правдоподобия с дисперсиями, установленными эксплуатационными характе-

ристиками приемно-измерительной аппаратуры [4, 8].

По результатам анализа вероятностей правильного отождествления объектов и ложной тревоги при достижимых значениях среднеквадратических ошибок (СКО) измерений угловых координат объектов обоснованы пути повышения эффективности идентификации за счет рационального выбора алгоритмов их фильтрации при трассовом сопровождении [6, 8].

Отождествление объектов при обнаружении и сопровождении

Коллективная идентификация при обнаружении объектов выполняется в момент времени t_n , $n = 1, 2, \dots$, путем сопоставления массивов их $I_n^{(m)}$ признаков, $n = 1, 2, \dots$, зафиксированных в m -м средстве мониторинга, $m = 1, \dots, M$, и $J_n^{(p)}$ признаками, $n = 1, 2, \dots$, выявленными p -м средством мониторинга, $p = 1, \dots, M$, $p \neq m$.

В типовых условиях контроля воздушного пространства маршруты объектов содержат прямолинейные участки, в некоторой плоскости XOY декартовой системы координат, на которых перемещение осуществляется с неизменной скоростью и участки, где выполняются повороты [3, 9]. Выбор системы координат не является принципиальным для построения процедуры фильтрации измеренных значений координат и скоростей движения объектов. За счет преобразования базисов для представления компонентов траекторий текущие положения и скорости движения объектов могут быть найдены для любой другой системы координат. Оценивание параметров трасс выполняется независимо по координатам x и y при представлении вектора скорости $\mathbf{V}^{i(j)}$ компонентами $V_x^{i(j)}$ и $V_y^{i(j)}$, $i = 1, \dots, I_n^{(m)}$, $j = 1, \dots, J_n^{(p)}$, что эквивалентно выполнению фильтрации в одномерном пространстве, $p \neq m$, $m, p = 1, \dots, M$. Значения координат объектов $(x_n^{i(j)}; y_n^{i(j)})$, измеренные в моменты времени t_n , $i = 1, \dots, I_n^{(m)}$, $j = 1, \dots, J_n^{(p)}$, $p \neq m$, $m, p = 1, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots$, обозначим $(\hat{x}_n^{i(j)}; \hat{y}_n^{i(j)})$; точность пеленгования будем характеризовать СКО $\sigma_1^{(n)} = \sigma_{i1}^{(n)}$, $i = 1, \dots, I_n$, и $\sigma_2^{(n)} = \sigma_{2j}^{(n)}$, $j = 1, \dots, J_n$, ($n = 1, 2, \dots$).

В качестве параметров отождествления используются векторы оценок угловых координат объектов $\tilde{\alpha}^{(n)} = \tilde{\alpha}_i^{(n)}$ и $\tilde{\alpha}^{(n)} = \tilde{\alpha}_j^{(n)}$, полученные

путем фильтрации пеленгов; они характеризуются векторами СКО $\tilde{\sigma}^{(n)} = \tilde{\sigma}_i^{(n)}$ и $\hat{\sigma}^{(n)} = \hat{\sigma}_j^{(n)}$, $i = 1, \dots, I_n$, $j = 1, \dots, J_n$ ($n = 1, 2, \dots$). Ввиду возможных пропусков сигналов $I_n \neq J_n$, вектор $\tilde{\alpha}^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots$, может содержать элементы, не отождествляемые ни с одним из компонентов вектора $\hat{\alpha}^{(n)}$.

Суть отождествления объектов в момент времени t_n , $n = 1, 2, \dots$, заключается в нахождении матрицы соответствий $\mathbf{S}^{(n)} = \|S_{ik}^{(n)}\|$, $i = 1, \dots, I_n$, $k = 1, \dots, K_n$, $n = 1, 2, \dots$, между I_n компонентами вектора $\tilde{\alpha}^{(n)}$ и $K_n = I_n + J_n$ угловыми координатами J_n выявленных и I_n пропущенных объектов $\hat{\Psi}^{(n)} = \hat{\Psi}_k^{(n)}$, $k = 1, \dots, K_n$ ($n = 1, 2, \dots$).

В соответствии с критерием минимума среднего риска информационные потери при правильно принятых решениях об отождествлении признаков отсутствуют, все ошибочные решения характеризуются одинаковыми рисками, а априорные вероятности условия идентификации объектов равны [10]. Поэтому правило установления соответствия между признаками идентификации объектов имеет вид

$$\hat{S}_{ik}^{(n)} = \arg \min_{\substack{i=1, \dots, I_n, \\ k=1, \dots, K_n}} \Phi(S_{ik}^{(n)}), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где

$$\Phi(S_{ik}^{(n)}) \equiv \Phi(S^{(n)}) = \left[\tilde{\alpha}^{(n)} - \mathbf{S}^{(n)} \hat{\Psi}^{(n)} \right]^T \left(D^{(n)} \right)^{-1} \left[\tilde{\alpha}^{(n)} - \mathbf{S}^{(n)} \hat{\Psi}^{(n)} \right]; \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, I_n, \quad k = 1, \dots, K_n, \quad n = 1, 2, \dots;$$

$\mathbf{D}^{(n)} \equiv \|D_{mp}^{(n)}\|$ — корреляционная матрица ошибок оценивания угловых координат объектов, элементы которой при статистически независимых измерениях вычисляются по правилу:

$$D_{mp}^{(n)} = \left(\left(\tilde{\sigma}_m^{(n)} \right)^2 + \sum_{j=1}^{J_n} S_{mj}^{(n)} \left(\hat{\sigma}_j^{(n)} \right)^2 \right) \delta_{mp}, \quad m, p = 1, \dots, I_n, \quad (3)$$

T — знак транспонирования, « -1 » — знак обращения матрицы, δ_{mp} — символ Кронекера, $m, p = 1, \dots, I_n$.

Входящие в (2) оценки угловых координат объектов, содержащиеся в векторе $\hat{\Psi}^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots$, определяются выражением

$$\hat{\Psi}_k^{(n)} = \begin{cases} \frac{\tilde{\alpha}_k^{(n)} \left(\tilde{\sigma}_k^{(n)} \right)^{-2} + \sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\alpha}_i^{(n)} \left(\tilde{\sigma}_i^{(n)} \right)^{-2}}{\left(\tilde{\sigma}_k^{(n)} \right)^{-2} + \sum_{i=1}^{I_n} \left(\tilde{\sigma}_i^{(n)} \right)^{-2}}, & \text{при } k = 1, \dots, J_n; \\ \frac{\sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\alpha}_i^{(n)} \left(\tilde{\sigma}_i^{(n)} \right)^{-2}}{\sum_{i=1}^{I_n} \left(\tilde{\sigma}_i^{(n)} \right)^{-2}}, & \text{при } k = J_n + 1, \dots, K_n. \end{cases} \quad (4)$$

Из правила отождествления объектов (1) следует, что на момент времени t_n , $n = 1, 2, \dots$, может быть выполнена идентификация пары признаков (i, k) , $i = 1, \dots, I_n$, $k = 1, \dots, K_n$, $n = 1, 2, \dots$, при условии, что значение k -го признака, $k = 1, \dots, K_n$ принадлежит области значений i -го признака, $i = 1, \dots, I_n$, $n = 1, 2, \dots$ в границах, установленных величинами СКО их оценок. При этом значения каждого p -го признака, $p \neq k$, $p = 1, \dots, K_n$ выходят за пределы определенной области. Наличие дисперсий оценок угловых координат в (4) ограничивает возможности группирования параметров идентификации, определенных с низкой точностью.

На основе (1) осуществляется оптимальный по критерию идеального наблюдателя выбор гипотезы об отождествлении объектов с максимальной условной вероятностью ситуации отождествления. В отличие от квазиоптимальных алгоритмов идентификации, базирующихся на исключении из перечня соответствий отождествленных признаков (i, p) , $i = 1, \dots, I_n$, $p = 1, \dots, K_n$, правило (1) позволяет идентифицировать объекты, характеризуемые параметрами (i, k) и (l, p) , $i, l = 1, \dots, I_n$, $k, p = 1, \dots, K_n$, при однократном ошибочном отождествлении признаков с порядковыми номерами i , $i = 1, \dots, I_n$ и p , $p = 1, \dots, K_n$, в сопоставляемых массивах. В результате сокращается число ложно идентифицируемых целей, что способствует повышению устойчивости и надежности контроля воздушного пространства.

При сопровождении объектов, когда решение об идентификации принимается на основе оценок однотипных параметров, полученных в текущий и предыдущие моменты времени,

правило установления соответствия между идентификационными признаками имеет вид (1), где

$$\Phi(S_{ik}^{(n)}) = \sum_{l=1}^n [\tilde{\alpha}^{(l)} - S^{(l)} \hat{\Psi}^{(l)}]^T (D^{(l)})^{-1} [\tilde{\alpha}^{(l)} - S^{(l)} \hat{\Psi}^{(l)}], \quad (5)$$

$i = 1, \dots, I_l, k = 1, \dots, K_l, l = 1, \dots, n, n = 1, 2, \dots$

В соответствии с принципом максимального правдоподобия при равной вероятности гипотез в качестве решения об идентификации принимается гипотеза, максимизирующая (1). При этом в результате работы алгоритма совмещения на каждом такте необходимо получить список пар демаскирующих признаков, который с наибольшей вероятностью соединяет номера, относящиеся к определенным объектам. Решение на основе алгоритма (1), (5) принимаются при наличии большего объема информации, чем при пошаговой обработке, поэтому этот алгоритм является потенциально более эффективным по сравнению с алгоритмом (1), (2).

Фильтрация параметров трасс при сопровождении объектов с корректирующим шумовым ускорением

Для нахождения параметров идентификации объектов в момент времени $t_n, n = 1, 2, \dots$, выполняется фильтрация текущих координат и составляющих скоростей движения на трассах. При движении объектов по прямолинейным участкам данная процедура осуществляется с применением фильтра Калмана. При выполнении поворотов, когда рекуррентная линейная фильтрация приводит к возрастанию СКО оценивания параметров, обуславливающих существенное отклонение траекторий движения от истинной формы, в структуре фильтра включается оператор, учитывающий корректирующее шумовое ускорение цели.

Уравнение для экстраполяции координат $(x_{n|n-1}^{i(k)}; y_{n|n-1}^{i(k)})$ и составляющих скоростей движения объектов $V_{x(n|n-1)}^{i(k)}$ и $V_{y(n|n-1)}^{i(k)}, i = 1, \dots, I_n, k = 1, \dots, K_n$, на момент времени $t_n, n = 1, 2, \dots$, применительно к координатной оси Ox имеет вид

$$\mathbf{R}_{n|n-1} = \mathbf{W}_{n|n-1} \mathbf{R}_{n-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}_{n|n-1} \equiv R_{n|n-1}^{i(k)} = [x_{n|n-1}^{i(k)}; V_{x(n|n-1)}^{i(k)}]^T$ — параметры траектории объекта, экстраполированные на момент времени t_n ; $\mathbf{R}_{n-1} \equiv R_{n-1}^{i(k)}$ — их значения в предшествующий момент времени;

$\mathbf{W}_{n|n-1} \equiv \|W_{n|n-1}^{i(k)}\| = \begin{bmatrix} 1 & t_n - t_{n-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ — оператор экстраполяции, ($n = 1, 2, \dots$).

Используя определение экстраполированной ковариационной матрицы параметров трассы

$$\mathbf{K}_{n|n-1} = \mathbf{W}_{n|n-1} \mathbf{K}_{n-1} \mathbf{W}_{n|n-1}^T + \sigma_a^2 \mathbf{G}_{n|n-1} \mathbf{G}_{n|n-1}^T, \quad (7)$$

где $\mathbf{K}_{n-1} \equiv \|K_{n-1}^{i(k)}\|$ — ковариационная матрица для момента времени t_{n-1} ;

σ_a^2 — дисперсия корректирующего ускорения;

$$\mathbf{G}_{n|n-1} \equiv \mathbf{G}_{n|n-1}^{i(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0,5(t_n - t_{n-1}) \\ t_n - t_{n-1} & 1 \end{bmatrix} —$$

матрица коэффициентов усиления ($n = 1, 2, \dots$). Установим правило фильтрации экстраполированного вектора параметров трассы

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_{n-1} + \gamma_n \bar{\mathbf{K}}_n, \quad (8)$$

где

$$\gamma_n = \hat{x}_n - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \mathbf{R}_{n|n-1}, \quad (9)$$

γ_n — коэффициент невязки измеренных \hat{x}_n и экстраполированных значений координат $x_n^i, i = 1, \dots, I_n, n = 1, 2, \dots$,

$$\bar{\mathbf{K}}_n = \bar{\mathbf{K}}_{n|n-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \bar{\mathbf{K}}_{n|n-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_{xn}^2 \right)^{-1}, \quad (10)$$

$\bar{\mathbf{K}}_n$ — коэффициент усиления фильтра Калмана; σ_{xn}^2 — СКО оценок координат $x_n^i, i = 1, \dots, I_n, (n = 1, 2, \dots)$.

Из (7)–(10) следует выражение для расчета элементов отфильтрованной ковариационной матрицы в момент времени $t_n, n = 1, 2, \dots$,

$$\mathbf{K}_{n-1} = \mathbf{K}_{n|n-1} - \bar{\mathbf{K}}_n^T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{K}_{n|n-1}. \quad (11)$$

Фильтрация оценок \hat{y}_n^i координат $y_n^i, i = 1, \dots, I_n, n = 1, 2, \dots$, выполняется аналогичным образом при замене в (9) значений \hat{x}_n на \hat{y}_n , а в (10) — дисперсии σ_{xn}^2 на дисперсию результатов

измерений σ_{yn}^2 , $i=1, \dots, I_n$, $n=1, 2, \dots$, координаты y_n^i в момент времени t_n , ($n=1, 2, \dots$).

В комбинированном алгоритме № 1 при разнице значений отфильтрованных и измеренных координат более $h\sigma_{x,y}$ проводится замена отфильтрованных координат на измеренные значения.

В комбинированном алгоритме № 2 в такой ситуации для замены используются оценки, полученные алгоритмом с добавочным шумовым ускорением при $\sigma_a \neq 0$.

Значения СКО оценок угловых координат объектов, полученные при фильтрации пеленгов с учетом добавочного шумового ускорения, при углах поворота 10° и 90° приведены в табл. 1. Аналогичные результаты, полученные с использованием комбинированных алгоритмов № 1 и № 2, представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Из таблиц следует, что при малых (менее $1,1^\circ$) ошибках пеленгования комбинированный алгоритм № 2, базирующийся на пересчете параметров трасс с учетом добавочного шумового ускорения, оказывается более эффективным; алгоритм с добавочным шумовым ускорением и комбинированный алгоритм № 1, построенный

на замене оценок координат объектов на их измеренные значения, позволяют получить примерно одинаковые СКО отфильтрованных пеленгов при ошибках пеленгования менее $0,6^\circ$. При увеличении ошибки измерения пеленгов (свыше $1,1^\circ$) алгоритм с добавочным шумовым ускорением оказывается более эффективным.

Анализ идентификации объектов при обнаружении и сопровождении

Для анализа эффективности алгоритма (7)–(11) в программной среде Qt Creator на языке C++ разработана имитационная модель, воспроизводящая процессы фильтрации параметров траекторий движения и идентификации объектов.

По результатам статистических испытаний модели найдены: математическое ожидание вероятности правильного отождествления объектов P_0 , определяемое как усредненное отношение числа правильно идентифицированных целей к общему количеству выполненных идентификаций; оценка вероятности ложной тревоги P_1 , представляющая собой отношение математического ожидания

Таблица 1

Значения СКО оценок угловых координат объектов, полученные при фильтрации пеленгов с учетом добавочного шумового ускорения

| Угол поворота объекта, град. | СКО измеренных значений угловых координат объектов, град. | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 10 | 0,20 | 0,26 | 0,35 | 0,40 | 0,42 | 0,46 | 0,52 | 0,65 | 0,76 |
| 90 | 0,22 | 0,30 | 0,38 | 0,44 | 0,48 | 0,54 | 0,62 | 0,71 | 0,78 |

Таблица 2

Значения СКО оценок угловых координат объектов, полученные при фильтрации пеленгов с использованием комбинированного алгоритма № 1

| Угол поворота объекта, град. | СКО измеренных значений угловых координат объектов, град. | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,48 | 0,56 | 0,64 | 0,76 | 0,82 | 0,98 |
| 90 | 0,24 | 0,34 | 0,42 | 0,52 | 0,62 | 0,72 | 0,86 | 0,96 | 1,14 |

Таблица 3

Значения СКО оценок угловых координат объектов, полученные при фильтрации пеленгов с использованием комбинированного алгоритма № 2

| Угол поворота объекта, град. | СКО измеренных значений угловых координат объектов, град. | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 10 | 0,18 | 0,24 | 0,34 | 0,40 | 0,46 | 0,54 | 0,64 | 0,72 | 0,80 |
| 90 | 0,18 | 0,26 | 0,37 | 0,43 | 0,47 | 0,58 | 0,70 | 0,82 | 0,96 |

ложно выполненных к общему количеству возможных ошибочных отождествлений.

Ввиду априорной неопределенности параметров трасс сопровождение целей на начальном этапе выполнялась с использованием рекуррентной линейной фильтрации, реализуемой при сохранении приоритета прямолинейного равномерного движения. Распознавание маневра осуществлялось путем сравнения измеренных и отфильтрованных координат цели; при их различии более чем на $\eta\sigma_{x^{(y)}}n$, $n=1, 2, \dots$, где η — пороговое значение невязки местоположения, принималось решение о наличии маневра, и для экстраполяции и фильтрации параметров трасс использовались выражения (7)–(11) при $\sigma_a \neq 0$.

Исследованы изменения СКО оценок угловых координат и показателей эффективности отождествления объектов с заменой результатов фильтрации координат при отсутствии ($\sigma_a = 0$) и наличии корректирующего шумового ускорения в процедуре фильтрации на измеренные значения, когда различие измеренных и отфильтрованных оценок местоположения превышает величину, определенную пороговым значением невязки.

Фильтрация выполнялась при обеспечивающих наименьшие СКО пеленгования значениях $\sigma_a = 6 \text{ м/с}^2$ и $\eta = 2,8$, обоснованных по результатам статистического моделирования ансамбля траекторий маневрирующих объектов при движении по прямолинейным участкам с углами поворотов 10° и 20° .

Установлено, что в ситуации, когда при маневрировании сохраняется приоритет прямолинейного равномерного движения оценки угловых координат объектов на выходах рекуррентного линейного фильтра и фильтра с шумовым ускорением близки по значениям. При точности измерения угловых координат целей не более $0,5^\circ$ СКО отфильтрованных пеленгов не превышает $0,2^\circ$.

При СКО пеленгования $(0,5 \dots 2)^\circ$ объектов, совершающих движение с поворотами на 10° , фильтрация параметров трасс с учетом корректирующего шумового ускорения позволяет достичь точности оценки угловых координат $(0,2 \dots 0,7)^\circ$. Если углы поворота целей достигают 20° , СКО отфильтрованных оценок угловых координат объектов при указанной точности пеленгования не превышает $0,6^\circ$.

В результате замены отфильтрованных параметров трасс, содержащих участки с поворотами 10° и 20° , измеренными значениями при СКО пеленгования $(1 \dots 2)^\circ$ максимальная погрешность определения направлений на объекты достигает $0,8^\circ$ и $0,9^\circ$, соответственно. При замене оценок параметров трасс, полученных с применением рекуррентного линейного фильтра без учета шумового ускорения, значениями $(\hat{x}_n^{i(k)}; \hat{y}_n^{i(k)})$, $i=1, \dots, I_n$, $k=1, \dots, K_n$, $n=1, 2, \dots$, измеренными при погрешности пеленгования $(0,5 \dots 2)^\circ$, СКО отфильтрованных пеленгов целей при углах поворотов 10° составляет $(0,2 \dots 1)^\circ$; при маневрировании с поворотами на 20° ее наибольшее значение возрастает до $1,2^\circ$.

При ошибках пеленгования $(0,5 \dots 0,6)^\circ$ наиболее высокой точностью сопровождения воздушных целей характеризуется алгоритм фильтрации, базирующийся на пересчете параметров трасс с учетом шумового ускорения. За счет выполнения фильтрации с шумовым ускорением и фильтрации с заменой оценок координат объектов, полученных при использовании фильтра Калмана, на их измеренные значения, при СКО пеленгования $(0,5 \dots 0,6)^\circ$ достигаются близкие по значениям ошибки отфильтрованных пеленгов (не более $0,2^\circ$). Наименьшие ошибки отфильтрованных угловых координат объектов характерны для алгоритма с шумовым ускорением.

Получены вероятности правильного отождествления P_0 от СКО пеленгования $I_n = 15$ объектов, $n=1, 2, \dots$, σ_1 при фиксированных значениях погрешностей σ_2 оценок угловых координат $J_n = 10$ объектов ($n=1, 2, \dots$). Значения вероятности правильного отождествления при вероятности ложной тревоги $P_1 = 0,01$ представлены в табл. 4.

Согласно полученным результатам, за счет увеличения σ_2 с $0,5^\circ$ до $1,5^\circ$ при $\sigma_1 = 0,5^\circ$ вероятность правильного отождествления объектов в режиме обнаружения при использовании фильтров, построенных с учетом шумового ускорения, убывает с $0,9 \dots 0,95$ до $0,7 \dots 0,75$. Если при этом σ_1 возрастает до $1,5^\circ$, то величина P_0 снижается до $0,25 \dots 0,5$. При замене оценок параметров трасс, отфильтрованных с учетом шумового ускорения, результатами измерений, вероятность правильного отождествления объектов при $\sigma_1 = 0,5^\circ$ и $\sigma_2 = 0,5^\circ$ снижается с $0,9$ до $0,85$. По мере возрастания СКО пеленгования до $\sigma_1 = 2^\circ$

Таблица 4

Значения вероятности правильного отождествления объектов при обнаружении σ_r , град.

| | | | | | | |
|--------------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| σ_1 , град. | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| σ_2 , град. | 1,5 | 1,5 | 1 | 1,5 | 1 | 0,5 |
| P_0 | 0,45...0,5 | 0,5...0,6 | 0,6...0,7 | 0,7...0,75 | 0,8...0,85 | 0,9...0,95 |

наблюдается уменьшение P_0 до 0,3. В результате замены параметров траекторий движения, оцененных с использованием фильтра Калмана, на измеренные значения при $\sigma_1 = 0,5^\circ$ и $\sigma_2 = 0,5^\circ$ вероятность правильной идентификации объектов составляет 0,85; при увеличении СКО пеленгования σ_1 до 2° ее величина снижается до 0,25.

С увеличением числа объектов до $I_n = 22$ и $J_n = 18$, $n = 1, 2, \dots$, вероятность их правильной идентификации при $\sigma_2 = 1,5^\circ$ и $\sigma_1 = (1,5 \dots 2)^\circ$ не превышает 0,2, а вероятность ложной тревоги P_1 лежит в пределах 0,01...0,02.

В таблице 5 представлены результаты расчета вероятности правильного отождествления $I_n = 15$ и $J_n = 10$ объектов, $n = 1, 2, \dots$, при различных СКО измерений их параметров в режиме сопровождения.

Из сравнения результатов, представленных в табл. 4 и 5 можно сделать вывод, что в режиме сопровождения целей вероятность правильного отождествления разнородной информации возрастает за счет накопления результатов наблюдений по времени.

При совместной обработке траекторных и сигнальных признаков [6] маневрирующих объектов снижается время запаздывания при распознавании маневра по сравнению с методом невязки параметров движения, характеризующемся инерционностью проявления признаков начала и окончания маневра. В результате фильтрация угловых координат с учетом корректирующего шумового ускорения приводит к большему повышению точности их оценок по сравнению

с показателями, достижимыми при распознавании маневра только по траекторным признакам. За счет снижения СКО пеленгования с 1° до $0,5^\circ$ вероятность правильного отождествления объектов возрастает с 0,7 до 0,95.

Заключение

Потребности повышения достоверности и устойчивости мониторинга обстановки при неуклонном развитии технологий маскировки и обеспечения скрытности функционирования объектов определяют важность совершенствования мер по комплексной обработке информации, поступающей от различных источников. За счет комплексирования информационных датчиков расширяется перечень выявляемых демаскирующих признаков объектов, позволяющий проводить более детальную классификацию их типов (экземпляров) и динамических состояний.

Суть коллективной идентификации заключается в установлении принадлежности независимых идентификационных параметров определенному объекту путем группирования однотипных признаков, инвариантных к изменениям обстановки. В качестве таких признаков выступают характеристики пространственного положения (оценки угловых координат и местоположения) объектов в различных каналах мониторинга. При комплексном анализе взаимодополняющих признаков парируются пропуски и ложные проявления объектов в отдельных каналах поиска (наблюдения).

Таблица 5

Значения вероятности правильного отождествления объектов при различных СКО измерений их параметров в режиме сопровождения

| | | | | | | |
|--------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| σ_1 , град. | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| σ_2 , град. | 1,5 | 1,5 | 1 | 1,5 | 1 | 0,5 |
| P_0 | 0,55...0,65 | 0,6...0,75 | 0,7...0,85 | 0,85...0,9 | 0,9...0,95 | 0,95...0,99 |

Решающее правило о коллективной идентификации объектов принимается для ситуации, характеризуемой максимальной апостериорной вероятностью отождествления признаков. Для минимизации СКО оценок угловых координат, текущего местоположения и скоростей движения объектов разработаны алгоритмы экстраполяции параметров траекторий путем задания корректирующего шумового ускорения и замены результатов фильтрации оценок координат на измеренные значения при распознавании маневра. Обоснованы параметры фильтрации с шумовым ускорением в зависимости от точности измерений пространственных характеристик и идентификации при группировании однотипных признаков с наибольшими значениями условных вероятностей ситуаций отождествления.

Найдены статистические оценки вероятностей правильной идентификации маневрирующих воздушных целей и ложной тревоги. Исследованы изменения СКО отфильтрованных пеленгов и показателей эффективности идентификации целей за счет замены оценок их координат, полученных при использовании рекуррентного линейного фильтра и фильтра с шумовым ускорением, на измеренные значения. Показано, что при наличии поворотов маршрутов наименьшие ошибки отфильтрованных угловых координат объектов характерны для алгоритма с шумовым ускорением.

Дальнейший прирост эффективности трассового сопровождения и идентификации маневрирующих объектов по результатам пеленгования достигается за счет совместной обработки траекторных и сигнальных признаков [6] вследствие снижения инерционности проявления условий начала и окончания маневра, что сокращает время запаздывания при его распознавании.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481».

Литература

1. Кочкаров А.А., Тимошенко А.В., Шевцов В.А. и др. Комплексный метод управления информационными ресурсами при обеспечении безопасности телекоммуникационных систем авиационных комплексов мониторинга //

Известия вузов. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 158–166.

2. Разиньков С.Н., Решетняк Е.А., Жидко Е.А. Измерение координат источников радиоизлучения на высоких частотах угломерным и угломерно-дальномерным методами // Метрология. 2019. № 4. С. 33–50.

3. Жидко Е.А., Разиньков С.Н. Методики определения угловых координат и местоположения источников радиоизлучения в беспилотных комплексах мониторинга и экспериментальные оценки точности этих параметров // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 41–46.

4. Разиньков С.Н., Жидко Е.А. Эффективность коллективной идентификации объектов при неточно заданных значениях однотипных параметров // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 8. С. 64–68.

5. Кочкаров А.А., Тимошенко А.В., Шевцов В.А. и др. Идентификация объектов при структурно-системном мониторинге обстановки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 5. С. 23–28.

6. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. — М.: Радиотехника. 2003. 400 с.

7. Машков Г.М. Статистические критерии и показатели качества отождествления локационных объектов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2001. Т. 44. № 9. С. 40–48.

8. Гуров Г.Б., Поздышев В.Ю., Тимошенко А.В., Разинькова О.Э. Идентификация маневрирующих объектов при структурно-системном контроле воздушного пространства // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 4. С. 16–26.

9. Попов В.Г., Решетняк Е.А. и др. Оценка эффективности трассового сопровождения маневрирующих источников радиоизлучения // Воздушно-космические силы: теория и практика. 2019. № 9. С. 42–47.

10. Литикова А.С., Разиньков С.Н. Имитационная модель отождествления объектов при структурно-системном мониторинге обстановки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 1. С. 14–18.