

Идентификация маневрирующих объектов при структурно-системном контроле воздушного пространства

Г. Б. ГУРОВ¹, В. Ю. ПОЗДЫШЕВ², А. В. ТИМОШЕНКО^{3,*}, О. Э. РАЗИТЬКОВА⁴

¹Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца, 127083, Москва, Россия

²Концерн воздушно-космической обороны “Алмаз — Антей”, 121471, Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”, 124498, Зеленоград, Россия

⁴Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, 394064, Воронеж, Россия

*Контактный автор: Тимошенко Александр Васильевич, e-mail: u567ku78@gmail.com

Поступила 5 апреля 2021 г., доработана 25 мая 2021 г., принята в печать 1 июня 2021 г.

Работа посвящена построению процедуры идентификации маневрирующих объектов с использованием критерия идеального наблюдателя и фильтрации параметров трасс при сопровождении средствами мониторинга в интересах структурно-системного контроля воздушного пространства. Для минимизации среднеквадратических ошибок оценок координат 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 объектов.

Ключевые слова: идентификация объектов, критерий идеального наблюдателя, трассовое сопровождение объектов, фильтрация параметров, шумовое ускорение.

Цитирование: Гуров Г.Б., Поздышев В.Ю., Тимошенко А.В., Разицькова О.Э. Идентификация маневрирующих объектов при структурно-системном контроле воздушного пространства. Вычислительные технологии. 2021; 26(4):16–26. DOI:10.25743/ICT.2021.26.4.003.

Введение

Потребности повышения устойчивости и надежности контроля воздушного пространства при неуклонном совершенствовании технологий маскировки и снижения заметности летательных аппаратов определяют важность реализации мероприятий структурно-системного мониторинга [1, 2]. Их суть заключается в совместном анализе демаскирующих признаков, оцениваемых разнородными источниками, при установлении принадлежности независимых параметров идентификации одному объекту, а также оценке динамических состояний целей по сигнально-траекторным параметрам [1–3].

В качестве разнородных средств контроля воздушного пространства, функционирующих в едином контуре управления системы активно-пассивной радиолокации, выступают радиолокационные станции, выполняющие обнаружение и распознавание летательных аппаратов, и комплексы радиотехнической разведки, предназначенные для обнаружения и распознавания бортовых источников радиоизлучения по результатам приема, пеленгования и измерения параметров сигналов [3, 4]. Идентификация объектов, как правило, осуществляется путем установления соответствий между показателями их пространственного положения (пеленгами или координатами), инвариантными к интенсивности проявления демаскирующих признаков в каждый момент времени [4, 5].

За счет комплексного анализа взаимодополняющих данных парируются пропуски и ложные проявления целей в отдельных средствах мониторинга; выявленные закономерности изменения состояний позволяют распознавать и прогнозировать действия объектов [2, 3].

В предлагаемой работе в соответствии с критерием идеального наблюдателя [5] проведена идентификация маневрирующих воздушных объектов в средствах мониторинга при фильтрации параметров движения с минимизацией погрешностей их текущих оценок за счет применения рекуррентного линейного фильтра [6] с корректирующим шумовым ускорением [7].

Цель работы — анализ зависимостей вероятностей правильной идентификации объектов и ложной тревоги от среднеквадратических ошибок (СКО) измерений угловых координат и исследование путей повышения эффективности выполняемых отождествлений за счет выбора вариантов фильтрации при трассовом сопровождении.

1. Методика идентификации объектов при сопровождении на траекториях движения

Будем полагать, что идентификация выполняется в момент времени t_n , $n = 1, 2, \dots$, между объектами I_n и J_n , $n = 1, 2, \dots$, выявленными первым и вторым средствами мониторинга соответственно. Движение объектов осуществляется в горизонтальной плоскости XOY без изменения высоты. Маршруты объектов содержат прямолинейные участки, на которых перемещение осуществляется с неизменной скоростью, и участки, где выполняются повороты. Оценивание параметров трасс выполняется независимо по координатам x и y при представлении вектора скорости компонентами $V_x^{i(j)}$ и $V_y^{i(j)}$, $i = 1, \dots, I_n$, $j = 1, \dots, J_n$, что эквивалентно выполнению фильтрации в одномерном пространстве. Результаты измерения координат объектов $(x_n^{i(j)}; y_n^{i(j)})$ средствами мониторинга в момент времени t_n обозначим $(\hat{x}_n^{i(j)}; \hat{y}_n^{i(j)})$, а СКО пеленгования — $\sigma_i^{(1)}$ и $\sigma_j^{(2)}$, $i = 1, \dots, I_n$, $j = 1, \dots, J_n$. Индексы i и j означают, что измерения параметров трасс объектов выполняются первым и вторым средствами мониторинга соответственно.

В качестве параметров идентификации используются отфильтрованные оценки угловых координат объектов $\tilde{\alpha}_i^{(n)}$ и $\hat{\alpha}_j^{(n)}$, характеризующиеся дисперсиями $\tilde{\sigma}_i^2$ и $\hat{\sigma}_j^2$. Ввиду возможных пропусков целей средствами мониторинга, в общем случае, $I_n \neq J_n$ и каждый из вектор-столбцов $\tilde{\alpha}_i^{(n)}$, $i = 1, \dots, I_n$, и $\hat{\alpha}_j^{(n)}$, $j = 1, \dots, J_n$, может содержать элементы, не отождествляемые ни с одним из компонентов другого массива [4, 8].

Суть идентификации данных от различных средств мониторинга в момент времени t_n заключается в нахождении матрицы соответствий $\left\| S_{ik}^{(n)} \right\|$, $i = 1, \dots, I_n$,

$k = 1, \dots, K_n$, $n = 1, 2, \dots, I_n$, компонентами вектор-столбца $\tilde{\Theta}_i$, $i = 1, \dots, I_n$, и $K_n = I_n + J_n$ угловыми координатами J_n выявленных и I_n пропущенных вторым средством мониторинга объектов $\tilde{\Psi}_k^{(n)}$, $k = 1, \dots, K_n$. Согласно определению [8], единичные элементы матрицы $\|S_{ik}^{(n)}\|$ определяют порядковые номера объектов, подлежащих идентификации; в позициях, характеризующих признаки целей, не подлежащие отождествлению, располагаются нулевые элементы.

В соответствии с критерием идеального наблюдателя информационные потери при правильно принятых решениях об отождествлении признаков отсутствуют, все ошибочные решения характеризуются одинаковыми рисками, а априорные вероятности условия идентификации объектов равны [5]. Поэтому правило установления соответствия между признаками идентификации объектов имеет вид [8, 9]

$$\|\hat{S}_{ik}^{(n)}\| = \arg \min \Phi \left(\|S_{ik}^{(n)}\| \right), \quad (1)$$

$$\Phi \left(\|S_{ik}^{(n)}\| \right) = \left[\tilde{\alpha}_i^{(n)} \right] - \|S_{im}^{(n)}\| \hat{\Psi}_m^{(n)} \left[D_{mp}^{(n)} \right]^{-1} \left[\tilde{\alpha}_p^{(n)} \right] - \|S_{pk}^{(n)}\| \hat{\Psi}_k^{(n)}, \quad (2)$$

где $\|D_{mp}^{(n)}\|$ — корреляционная матрица ошибок оценивания угловых координат объектов, имеющая при статистически независимых измерениях диагональную структуру [4, 10],

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

\top — знак транспонирования, “ -1 ” — знак обращения матрицы, δ_{is} — символ Кронекера. Оценки угловых координат $\hat{\Psi}_k^{(n)}$, отфильтрованных во втором средстве мониторинга, в (2) определяются выражением [8, 9]

$$\hat{\Psi}_k^{(n)} = \begin{cases} \frac{\hat{\alpha}_k^{(n)} \hat{\sigma}_k^{-2} + \sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\alpha}_i^{(n)} \tilde{\sigma}_i^{-2}}{\tilde{\sigma}_k^{-2} + \sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\sigma}_i^{-2}} \hat{\sigma}_k^{-2} + \sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\sigma}_i^{-2} & \text{при } k = 1, \dots, J_n, \\ \frac{\sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\alpha}_i^{(n)} \tilde{\sigma}_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{I_n} \tilde{\sigma}_i^{-2}} & \text{при } k = J_n + 1, \dots, K_n. \end{cases} \quad (3)$$

Из правила идентификации объектов (1) следует, что на момент времени t_n может быть выполнено отождествление пары признаков (i, k) , $i = 1, \dots, K_n$, при условии, что значение k -го признака $k = 1, \dots, K_n$ принадлежит области значений i -го признака $i = 1, \dots, I_n$ 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 (3) ограничивает возможности группирования параметров идентификации, определенных с низкой точностью.

На основе (1) осуществляется оптимальный по критерию идеального наблюдателя выбор гипотезы об идентификации объектов с максимальной условной вероятностью ситуации отождествления [10]. В отличие от представленных в [8, 9, 11] 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) , $i, l = 1, \dots, I_n$, $p = 1, \dots, K_n$, при однократном ошибочном отождествлении признаков с порядковыми номерами i и p в сопоставляемых массивах. В результате сокращается число ложно идентифицируемых целей, что способствует повышению устойчивости и надежности контроля воздушного пространства.

2. Фильтрация параметров трасс при сопровождении маневрирующих объектов с корректирующим шумовым ускорением

Для нахождения параметров идентификации объектов в момент времени t_n выполняется фильтрация текущих координат и составляющих скоростей движения на трассах. При движении объектов по прямолинейным участкам данная процедура осуществляется с применением фильтра Калмана [6]. При выполнении поворотов, когда рекуррентная линейная фильтрация приводит к возрастанию СКО оценивания параметров, обуславливающих существенное отклонение траекторий движения от истинной формы [6, 7], в структуре фильтра включается оператор, учитывающий корректирующее шумовое ускорение цели [7].

Обнаружение – распознавание маневров целей в системах радиолокации осуществляется при совместной и раздельной обработке их траекторных и сигнальных признаков [12]. Для обработки траекторных признаков применяются параметрические методы, основанные на анализе априори известных признаков начала и окончания маневра, таких как невязка координат и абсолютная величина ускорения движения, а также непараметрические методы, базирующиеся на вычислении показателей рассогласования процесса трассового сопровождения и не требующие знания признаков маневрирования [13, 14]. Обнаружение – распознавание маневров объектов по сигнальным признакам базируется на анализе частотно-временных портретов; факт маневрирования устанавливается по изменению ширины спектра вторичной модуляции отраженного сигнала, а также смещению частот Доплера его модуляционных компонентов, характеризующих ракурсной зависимостью, по сравнению с планерной составляющей [12, 15].

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 применительно к координатной оси OX имеет вид [6]

$$R_{n|n-1}^{i(k)} \rangle = \left\| W_{n|n-1}^{i(k)} \right\| R_{n|n-1}^{i(k)} \rangle,$$

где $R_{n|n-1}^{i(k)} \rangle = [x_{n|n-1}^{i(k)}; V_{x(n|n-1)}^{i(k)}]^\top$ – параметры траектории, экстраполированные на момент времени t_n ; $R_{n-1}^{i(k)} \rangle$ – вектор-столбец их значений в предшествующий момент времени; $\left\| W_{n|n-1}^{i(k)} \right\| = \left\| \begin{matrix} 1 & t_n - t_{n-1} \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\|$ – оператор экстраполяции [6]. В дальнейшем во избежание громоздкости выражений ограничимся только индексом i , полагая, что во втором средстве мониторинга реализуются аналогичные процедуры.

Используя определение экстраполированной ковариационной матрицы параметров трассы [6, 7]

$$\|K_{n|n-1}^i\| = \|W_{n|n-1}^i\| \cdot \|K_{n-1}^i\| \cdot \|W_{n|n-1}^i\|^\top + \sigma_a^2 \|G_{n|n-1}^i\| \cdot \|G_{n|n-1}^i\|^\top, \quad (4)$$

где $\|K_{n-1}^i\|$ — ковариационная матрица для момента времени t_{n-1} ; σ_a^2 — дисперсия шумового ускорения; $G_{n|n-1}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0.5(t_n - t_{n-1}) \\ t_n - t_{n-1} & 1 \end{bmatrix}$ — матрица коэффициентов усиления шума движения цели [6], установим правило фильтрации экстраполированного вектора параметров трассы

$$R_n^i = R_{n|n-1}^i + \gamma_n^i \bar{K}_n^i, \quad (5)$$

где

$$\gamma_n^i = \hat{x}_n^i - \langle \mathbf{1} \rangle^\top R_{n|n-1}^i \quad (6)$$

— коэффициент невязки измеренных \hat{x}_n^i и экстраполированных значений координат x_n^i ;

$$\langle \bar{K}_n^i = \|K_{n|n-1}^i\| \langle \mathbf{1} \rangle \left(\langle \mathbf{1} \rangle^\top \|K_{n|n-1}^i\| \langle \mathbf{1} \rangle + \sigma_{(i)xn}^2 \right)^{-1} \quad (7)$$

— коэффициент усиления фильтра Калмана; $\sigma_{(i)xn}$ — СКО оценок координат x_n^i .

Из (4)–(7) следует выражение для расчета элементов отфильтрованной ковариационной матрицы [6, 7] в момент времени t_n

$$\|K_n^i\| = \|K_{n|n-1}^i\| - \langle \bar{K}_n^i \langle \mathbf{1} \rangle \|K_{n|n-1}^i\|, \quad i = 1, \dots, I_n. \quad (8)$$

Фильтрация оценок \hat{y}_n^i координат y_n^i , $i = 1, \dots, I_n$, выполняется аналогичным образом при замене в (6) значений \hat{x}_n^i на \hat{y}_n^i , а в (7) — дисперсии $\sigma_{(i)xn}^2$ на дисперсию результатов измерений $\sigma_{(i)yn}^2$, $i = 1, \dots, I_n$, координаты y_n^i в момент времени t_n .

3. Анализ статистических показателей эффективности идентификации маневрирующих объектов при сопровождении траекторий движения

Для анализа эффективности алгоритма (4)–(8) в программной среде Qt Creator на языке C++ разработана имитационная модель, воспроизводящая процессы фильтрации параметров траекторий движения объектов и идентификации их признаков, оцененных радиолокационной станцией и комплексом радиотехнической разведки при совместном функционировании, на основе формирования списка соответствий угловых координат в моменты времени t_n . Выражения, устанавливающие взаимосвязи между значениями пеленгов и местоположением целей в системах контроля воздушного пространства, а также их СКО представлены в [16].

По результатам статистических испытаний модели найдены математическое ожидание вероятности правильной идентификации 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 ложно выполненных к общему количеству возможных ошибочных отождествлений [11]. Ввиду априорной неопределенности

параметров трасс сопровождение целей на начальном этапе выполнялось 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 $\eta\sigma_{(i)x(y)n}$, $i = 1, \dots, I_n$, где η — пороговое значение невязки местоположения, принималось решение о наличии маневра [7] и для экстраполяции и фильтрации параметров трасс использовались выражения (4)–(8) при $\sigma_a \neq 0$.

Исследованы изменения СКО оценок угловых координат и показателей эффективности идентификации объектов при использовании разработанных в [7] комбинированных алгоритмов, базирующихся на замене результатов фильтрации координат при отсутствии $\sigma_a = 0$ и наличии корректирующего шумового ускорения в процедуре фильтрации на \hat{x}_n^i и \hat{y}_n^i , $i = 1, \dots, I_n$, 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 в [7] по результатам статистического моделирования ансамбля траекторий маневрирующих объектов при движении по прямолинейным участкам с углами поворотов 10 и 20°.

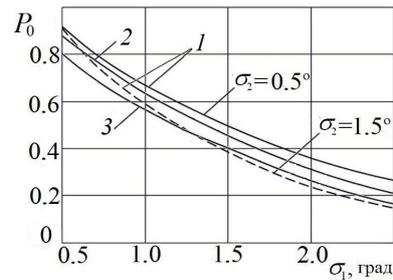
Эффективность идентификации определялась при “звездном налете” воздушных объектов на наземную цель, характеризующемся наиболее сложными условиями контроля воздушного пространства ввиду того, что летательные аппараты или образованные ими группы совершают движение с различных направлений в круговом секторе углов.

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° СКО отфильтрованных пеленгов не превышает 0.2°.

При СКО пеленгования объектов, совершающих движение с поворотами на 10°, $\sigma_i^{(1)} \equiv \sigma_1 = (0.5 \dots 2)^\circ$ и $\sigma_j^{(2)} \equiv \sigma_2 = (0.5 \dots 2)^\circ$, фильтрация параметров трасс с учетом корректирующего шумового ускорения позволяет достичь точности оценки угловых координат $(0.2 \dots 0.7)^\circ$. При углах поворота целей на маршрутах движения 20° указанная точность пеленгования позволяет получить отфильтрованные оценки угловых координат с максимальной СКО не более 0.6°.

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 и 0.9° соответственно. При замене оценок параметров трасс, полученных с применением рекуррентного линейного фильтра без учета шумового ускорения, значениями $\left(\hat{x}_n^{i(k)}; \hat{y}_n^{i(k)}\right)$, $i = 1, \dots, I_n$, $k = 1, \dots, K_n$, 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°.

При ошибках пеленгования $(0.5 \dots 0.6)^\circ$ наиболее высокой точностью сопровождения воздушных целей характеризуется алгоритм фильтрации [7], 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 пеленгова-



Зависимости вероятности правильной идентификации P_0 от СКО пеленгования
Dependencies of probability of correct identification on mean quadratic errors of objects bearing

ния $(0.5 \dots 0.6)^\circ$ достигаются близкие по значениям ошибки отфильтрованных пеленгов (не более 0.2°). Наименьшие ошибки отфильтрованных угловых координат объектов характерны для алгоритма с шумовым ускорением.

На рисунке приведены зависимости вероятности правильной идентификации P_0 от СКО пеленгования $I_n = 20$ объектов первым средством мониторинга σ_1 при фиксированных значениях погрешностей оценок угловых координат $J_n = 15$ объектов и вторым средством мониторинга σ_2 . Вероятность ложной тревоги при идентификации объектов $P_1 = 0.01$. Зависимости 1 получены при фильтрации параметров трасс с учетом шумового ускорения; кривые 2 и 3 соответственно отображают результаты, полученные при замене оценок угловых координат на выходы фильтра с шумовым ускорением и рекуррентного линейного фильтра их измеренными значениями. Сплошными линиями представлены результаты, полученные при $\sigma_2 = 0.5^\circ$, штриховой линией — при $\sigma_2 = 1.5^\circ$.

Согласно полученным результатам, за счет увеличения σ_1 от 0.5 до 2° при $\sigma_2 = 0.5^\circ$ вероятность правильной идентификации объектов в средствах мониторинга, содержащих фильтры, построенные с учетом шумового ускорения, убывает с 0.9 до 0.35 . Если при этом σ_2 возрастает до 1.5° , то величина P_0 снижается до 0.25 . При замене оценок параметров трасс, отфильтрованных с учетом шумового ускорения, результатами измерений вероятность правильной идентификации 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 в первом средстве мониторинга до $\sigma_1 = 2^\circ$ 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 $J_n = 18$ 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 $0.01 \dots 0.02$. Согласно [12], в случае совместной обработки траекторных и сигнальных признаков маневрирующих объектов снижается время запаздывания при распознавании маневра по сравнению с методом невязки параметров движения, характеризующимся 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. Показано, что при снижении СКО пеленгования в каждом из средств мониторинга с 1 до 0.5° вероятность правильной идентификации объектов возрастает от 0.7 до 0.95 .

Заключение

Таким образом, на основе критерия идеального наблюдателя с использованием фильтрации параметров трасс выполнена идентификация маневрирующих воздушных объектов при структурно-системном контроле воздушного пространства. Идентификация объектов, выявленных различными средствами мониторинга, осуществлялась путем установления соответствий между отфильтрованными оценками их угловых координат при возможных пропусках элементов в массивах отождествляемых признаков. В соответствии с выбранным критерием идентификации решение о принадлежности различных признаков одному объекту принимается по максимальной условной вероятности ситуации отождествления.

Для минимизации погрешностей оценок координат и скоростей движения объектов реализована процедура фильтрации параметров траекторий при экстраполяции с корректирующим шумовым ускорением. Ввиду априорной неопределенности параметров трасс сопровождение целей на начальном этапе выполнялось с использованием рекуррентной линейной фильтрации, применяемой при сохранении приоритета прямолинейного равномерного движения. Распознавание маневра осуществляется при превышении различия измеренных и отфильтрованных координат цели величины, определяемой произведением СКО и порогового значения невязки местоположения.

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 в горизонтальной плоскости 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 [12] вследствие снижения инерционности проявления условий начала и окончания маневра, что сокращает время запаздывания при его распознавании.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 21-19-00481).

Список литературы

- [1] **Кочкаров А.А., Рахманов А.А., Тимошенко А.В., Путято С.А.** Структурно-пространственная модель распределения средств системы мониторинга специального назначения по объектам наблюдения. Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020; (13):124–132.
- [2] **Рахманов А.А.** Принципы и подходы к концептуальному проектированию сетевых систем. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2010; 12(113):125–134.
- [3] **Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С.** Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения. Системы управления, связи и безопасности. 2020; (1):109–146.

- [4] **Попова О.Э., Разиньков С.Н.** Отождествление объектов в системах активно-пассивной радиолокации. Измерительная техника. 2008; (6):50–54.
- [5] **Машков Г.М.** Статистические критерии и показатели качества отождествления локационных объектов. Известия вузов. Радиоэлектроника. 2001; (9):40–48.
- [6] **Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника; 2003: 400.
- [7] **Попов В.Г., Разиньков С.Н., Решетняк Е.А.** Оценка эффективности трассового сопровождения маневрирующих источников радиоизлучения. Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019; (9):42–47.
- [8] **Разиньков С.Н., Решетняк Е.А.** Идентификация объектов мониторинга с оценкой максимального правдоподобия угловых координат в системах с многолучевыми апертурными антеннами. Антенны. 2016; 6(226):50–54.
- [9] **Разиньков С.Н., Жидко Е.А.** Эффективность коллективной идентификации объектов при неточно заданных значениях однотипных параметров. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018; 16(8):64–68.
- [10] **Барабаш Ю.Л., Варский Б.В., Зиновьев В.Т.** Вопросы статистической теории распознавания. М.: Советское радио; 1967: 400.
- [11] **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):14–18.
- [12] **Крикливый М.В., Горшков С.А., Солонар А.С.** Совместный учет сигнальных и траекторных признаков для решения задачи обнаружения-распознавания маневра воздушного объекта. Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2012; 3(36):90–95.
- [13] **Кузьмин С.З.** Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: Квіц; 2000: 428.
- [14] **Жиглянский А.А., Крассовский А.Е.** Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники. Л.: Издательство Ленинградского университета; 1988: 224.
- [15] **Слюсарь Н.М.** Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов. Минск: Военная академия Республики Беларусь; 2005: 71.
- [16] **Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н.** Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь; 1986: 264.

Identification of maneuvering objects during structural and system control of airspace

GUROV GEORGII B.¹, POZDYSHEV VALERII YU.², TIMOSHENKO ALEXANDER V.^{3,*},
RAZINKOVA OLGA E.⁴

¹Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, 127083, Moscow, Russia

²“Almaz — Antey” Air and Space Defence Corporation, 121471, Moscow, Russia

³National Research University of Electronic Technology, 124498, Zelenograd, Russia

⁴Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, 396064, Voronezh, Russia

*Corresponding author: Timoshenko, Alexander V., e-mail: u567ku78@gmail.com

Abstract

Purpose. This work addresses construction of the procedure for identifying maneuvering air objects in the process of tracking their routes. Monitoring tools during structural and system air space control are employed. The study is aimed to establish the abilities of correct identification of objects and false alarm at various standard errors of measurements of angular coordinates and to determine ways to increase efficiency of identifications performed due to selection of filtering options during trace tracking.

Methodology. Identification of objects was performed according to the ideal observer criterion by comparing estimates of angular coordinates of objects subjected to linear filtering with corrective noise acceleration. In order to minimize root-mean-square errors of coordinates and motion velocity estimates of objects, route parameter extrapolation algorithms are obtained by setting correcting noise acceleration and replacing the results of filtering coordinate estimates with measured values during manoeuvre recognition. Due to a priori uncertainty of route parameters, target tracking was initially performed using recurring linear filtering while maintaining the priority of straight uniform movement. The recognition of the maneuver was carried out as a result of exceeding the difference between the measured and filtered values of the target coordinates of the threshold value.

Findings. Filtering parameters with noise acceleration are justified depending on the accuracy of measurements of spatial characteristics and identification when grouping identification features with the highest values of conditional probabilities of situations for the objects under identification. As a result of replacing filtered parameters of alignments containing areas with rotations of 10 and 20°, measured values for standard bearing errors (1...2)°, the maximum error in determining directions for objects reaches 0.8 and 0.9°, respectively. When replacing the estimates of the parameters of the alignments obtained using a recurring linear filter without taking into account noise acceleration, the coordinate values measured at the bearing error (0.5...2)°, the errors of the filtered bearing of the targets at the angles of rotation of 10° are (0.2...1)°. When maneuvering objects with turns by 20°, the largest value of the standard bearing error increases to 1.2°. By increasing the accuracy of the diaper from 2 to 0.5°, the probability of correct identification of objects in monitoring tools performing noise correction acceleration filtering increases by about 3 times and reaches a value of 0.9. As a result of replacing the estimates of the parameters of the alignments filtered taking into account the corrective noise acceleration with the results of measurements, the probability of correct identification of objects with standard bearing errors of not more than 0.5° decreases from 0.9 to 0.85.

Originality/value. The identification of maneuvering air objects is performed using filtering of route parameters calculated with the help of the ideal observer criterion. For the most efficient identification, the identification features belonging to the same object must be established according to the highest conditional probability of the identification situation. To minimize errors in estimation of the angular coordinates of objects, a procedure for filtering motion parameters with corrective noise acceleration is implemented.

Keywords: object identification, ideal observer criterion, route tracking, filtering of parameters, noise acceleration.

Citation: Gurov G.B., Pozdyshev V.Yu., Timoshenko A.V., Razinkova O.E. Identification of maneuvering objects during structural and system control of airspace. Computational Technologies. 2021; 26(4):16–26. DOI:10.25743/ICT.2021.26.4.003. (In Russ.)

Acknowledgements. This work is supported by the Russian Science Foundation (grant No 21-19-00481).

References

1. **Kochkarov A.A., Rakhmanov A.A., Timoshenko A.V., Putyato S.A.** Structural and spatial model of the special purpose monitoring system means distribution by observation objects. *Vozdushno-kosmicheskie Sily. Teoriya i Praktika*. 2020; (13):124–132. (In Russ.)

2. **Rakhmanov A.A.** Principles and methods of approach to conceptual designing of network-centric. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2010; 12(113):125–134. (In Russ.)
3. **Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasilchenko A.S.** Counter unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020; (1):109–146. (In Russ.)
4. **Popova O.E., Razinkov S.N., Razin'kov S.N.** Identification of objects according to coordinates in systems active-passive radar systems. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2008; (1):50–54. (In Russ.)
5. **Mashkov G.M.** Statistical criteria and indicators of the quality for identification of location objects. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics (Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika)*. 2001; (9):40–48. (In Russ.)
6. **Perov A.I.** *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem [Statistical theory of systems for radio engineering]*. Moscow: Radiotekhnika; 2003: 400. (In Russ.)
7. **Popov V.G., Razinkov S.N., Reshetok E.A.** Assessment of the effectiveness of track tracking of maneuvering radio sources. *Vozdushno-kosmicheskie Sily. Teoriya i Praktika*. 2019; (9):90–95. (In Russ.)
8. **Razinkov S.N., Reshetnyak E.A.** Identification of monitoring objects with estimation of maximum likelihood of angular coordinates in the systems with multi-beam aperture antennas. *Antennas*. 2016; 6(226):50–54. (In Russ.)
9. **Razinkov S.N., Zhitko E.A.** Efficiency of collective identification of objects with inexact preset values of the same parameters. *Informatsionno-izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy*. 2018; 16(8):64–68. (In Russ.)
10. **Barabash Yu.L., Varsky B.V., Zinovjev V.T.** *Voprosy statisticheskoy teorii raspoznavaniya [Problems of statistical theory of recognition]*. Moscow: Sovetskoe radio; 1967: 400. (In Russ.)
11. **Litikova A.S., Razinkov S.N.** Imitating model of identification of objects at structural and system monitoring of the situation. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2018; (1):14–18. (In Russ.)
12. **Kriklivyy M.V., Gorshkov S.A., Solonar A.S.** Joint accounting of signal and tracer features for solving the problem of detecting and recognizing the maneuver of an air object. *Vestnik Voennoy Akademii Respubliki Belarus'*. 2012; 3(36):90–95. (In Russ.)
13. **Kuzmin S.Z.** *Cifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu [Digital radar. Introduction to theory]*. Kiev: Kvits; 2000: 428. (In Russ.)
14. **Zhiglyanskiy A.A., Krassovskiy A.E.** *Obnaruzhenie razladki sluchaynykh protsessov v zadachakh radiotekhniki [Detection of the decomposition of random processes in radio engineering problems]*. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo Universiteta; 1988: 224. (In Russ.)
15. **Slusar N.M.** *Effekt vtorichnoy modulyatsii radiolokatsionnykh signalov [Effect secondary modulation of radar signals]*. Minsk: Military Academy of the Republic of Belarus; 2005: 71. (In Russ.)
16. **Kondratyev V.S., Kotov A.V., Markov L.N.** *Mnogopozitsionnye radiotekhnicheskie sistemy [Multi-position radio engineering systems]*. Moscow: Radio i svyaz'; 1986: 264. (In Russ.)