

DOI: 10.17516/1999-494X-0392

УДК 621.396. 96

Characteristics of Strobeless Identification of Trajectories of Air Objects in Positioning and Radar Identification

Sergey B. Zhironkin*,
Andrey A. Pshenitsyn and Alexander A. Bliznyuk
*VKO Military Academy named after Marshal
of the Soviet Union Georgiy Zhukov
Tver, Russian Federation*

Received 25.01.2022, received in revised form 18.03.2022, accepted 24.04.2022

Abstract. The characteristics of identification of data of special (military) automatic dependent and radar observations of air objects during their coordinate-connected identification are presented. The characteristics are obtained as a result of statistical simulation of the algorithm for strobeless identification of trajectories, synthesized by a method based on the theory of optimal filtering of discrete-continuous Markov random processes. These characteristics are compared with the characteristics of strobeless and strobe identification in radar identification.

Keywords: strobeless identification, coordinate-connected identification, radar identification, optimal filtering, Kalman filter.

Citation: Zhironkin, S. B., Pshenitsyn, A. A. and Bliznyuk A. A. Characteristics of strobeless identification of trajectories of air objects in positioning and radar identification. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 294–307. DOI: 10.17516/1999-494X-0392

Характеристики бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов при координатно-связном и радиолокационном опознавании

С. Б. Жиронкин,

А. А. Пшеницын, А. А. Близнюк

Военная академия воздушно-космической обороны

им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова

Российская Федерация, Тверь

Аннотация. Представлены характеристики отождествления данных специального (военного) автоматического зависимого и радиолокационного наблюдений воздушных объектов при их координатно-связном опознавании. Характеристики получены в результате статистического имитационного моделирования алгоритма бесстробового отождествления траекторий, синтезированного по методу, основанному на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. Выполнено сравнение этих характеристик с характеристиками бесстробового и стробового отождествлений при радиолокационном опознавании.

Ключевые слова: бесстробовое отождествление, координатно-связное опознавание, радиолокационное опознавание, оптимальная фильтрация, фильтр Калмана.

Цитирование: Жиронкин, С. Б. Характеристики бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов при координатно-связном и радиолокационном опознавании / С. Б. Жиронкин, А. А. Пшеницын, А. А. Близнюк // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 294–307. DOI: 10.17516/1999-494X-0392.

Введение

Необходимой операцией при опознавании воздушных объектов является отождествление оценок координат опознаваемого объекта, сформированных потребителем информации опознавания (например, наземной РЛС), с оценками координат своего объекта, сформированными средством опознавания. Отождествление называют еще привязкой признака опознавания к информации обнаружения по опознаваемому объекту.

При координатно-связном опознавании (КСО) в качестве средства опознавания может выступать приемник сигналов специального (военного) вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В), например, приемник терминала объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания (ОСНОД) [1]. Вещательная технология АЗН-В признана международным сообществом для наблюдения за воздушными судами и эффективного управления воздушным движением. Суть технологии АЗН-В состоит в автоматическом определении на борту воздушного судна его координат и передачи их оценок, с некоторым периодом, по каналам радиосвязи в беззапросном режиме всем заинтересованным потребителям. Если с помощью помехоустойчивой аппаратуры навигации [2, 3] реализовать специальные (военные) режимы АЗН-В с передачей зашифрованных координат своих воздушных объектов по помехоустойчивым каналам радиосвязи [4–7], то можно говорить о реализации метода координатно-связного опознавания.

В методе радиолокационного опознавания (РЛО) оценки координат своих объектов формируются запросчиком системы государственного опознавания явным (в несопряженных запросчиках, функционирующих независимо от потребителя) или неявным (в сопряженных запросчиках, функционирующих синхронно с потребителем по запуску и обзору пространства) образом [8]. В запросчике реализуется радиолокационный принцип измерения координат.

Цель работы – получить сравнительные характеристики бесстробового отождествления траекторий, основанного на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов при координатно-связном и радиолокационном опознавании воздушных объектов.

При координатно-связном (навигационно-связном) опознавании воздушных объектов выполняется отождествление траекторий своих объектов, представляемых совокупностью оценок их навигационных данных (прямоугольных координат), полученных опознающим объектом по связным каналам специального (военного) АЗН-В, с траекториями опознаваемых объектов, представляемых совокупностью оценок их сферических координат, полученных от РЛС.

Обоснование характеристик отождествления

При анализе качества отождествления данных от потребителя информации опознавания и запросчика системы государственного радиолокационного опознавания часто говорят о том, что из-за низкой разрешающей способности запросчика по угловым координатам во многих тактических ситуациях чужой объект отождествляется со своим. Более правильно в данном случае говорить о низкой точности измерения угловых координат запросчиком, так как в нем задача разрешения своего и чужого объектов вообще не возникает: запросчик получает сигналы только от своего объекта.

Задача разрешения своего и чужого объектов должна рассматриваться применительно к системе, включающей потребитель информации опознавания и средство опознавания.

Под интервалом разрешения системы «потребитель информации опознавания – средство опознавания» будем понимать такое минимальное расстояние между своим и чужим объектами, при котором вероятность правильного отождествления чужого объекта со своим не меньше заданной величины при фиксированной вероятности правильного отождествления своего объекта, а в качестве характеристики отождествления рассматривать зависимость интервала разрешения от дальности до объектов.

Алгоритм бесстробового отождествления траекторий при координатно-связном опознавании

С использованием метода [9] синтеза оптимальных алгоритмов отождествления измерений векторов состояния подвижных объектов различными системами наблюдения на основе теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов [10] был получен алгоритм отождествления данных специального (военного) автоматического зависимого и радиолокационного наблюдений воздушных объектов при их координатно-связном опознавании в следующем виде:

$$\sum_k (\zeta_k - \tilde{\zeta}_k)^T \tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}^{-1}(k) (\zeta_k - \tilde{\zeta}_k) - \sum_{\mu} (\eta_{\mu} - \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}_{\eta\mu})^T \tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}^{-1}(\mu) (\eta_{\mu} - \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}_{\eta\mu}) -$$

чужой

$$- \sum_v (\xi_v - S(\tilde{X}_{\xi v}))^T \tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}^{-1}(v) (\xi_v - S(\tilde{X}_{\xi v})) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} h$$

свой

В алгоритме использованы обозначения:

h – порог принятия решения об отождествлении;

η_{μ} – вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра навигационных данных, поступающих в моменты времени t_{μ} (навигационные данные – оценки прямоугольных координат своего воздушного объекта (ВО), полученные от него по связному каналу);

ξ_v – вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра радиолокационных данных, поступающих в моменты времени t_v (радиолокационные данные – оценки сферических координат опознаваемого ВО, полученные от РЛС);

ζ_k – вектор наблюдаемых параметров на входе комплексного фильтра (при $t_k = t_{\mu}$ $\zeta_k = \eta_{\mu}$, при $t_k = t_v$ $\zeta_k = \xi_v$);

$\tilde{\zeta}_k$ – прогнозируемое наблюдение на входе комплексного фильтра, рассчитываемое следующим образом:

$\tilde{\zeta}_k = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}'_k$, если на вход фильтра поступают навигационные данные, где \tilde{X}'_k – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная комплексным фильтром, \mathbf{H}_{η} – матрица пересчета вектора состояния ВО в вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра навигационных данных;

$\tilde{\zeta}_k = S(\tilde{X}'_k)$, если на вход фильтра поступают радиолокационные данные, $S(\tilde{X}'_k)$ – нелинейная вектор-функция пересчета из прямоугольной системы координат в сферическую;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования наблюдения в комплексном фильтре, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}(k) = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\eta}(k) \mathbf{H}_{\eta}^T$, если на вход фильтра поступают навигационные данные, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора X состояния ВО в комплексном фильтре;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}(k) = \mathbf{H}_{\xi}(k) \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\eta}(k) \mathbf{H}_{\xi}^T(k)$, если на вход фильтра поступают радиолокационные данные, где $\mathbf{H}_{\xi}(k) = \partial S(\tilde{X}'_k) / \partial X^T$ – матрица пересчета вектора X состояния ВО в вектор наблюдаемых радиолокационных данных, полученная путем линеаризации нелинейной вектор-функции пересчета из прямоугольной системы координат в сферическую;

$\tilde{X}_{\eta\mu}$ – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная фильтром навигационных данных;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования навигационных данных в фильтре навигационных данных, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}(k) = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{\mathbf{R}}_{X\eta\eta}(k) \mathbf{H}_{\eta}^T$, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\eta\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора X состояния ВО в фильтре навигационных данных;

$\tilde{X}_{\xi v}$ – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная фильтром радиолокационных данных;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования сферических координат в фильтре радиолокационных данных, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}(k) = \mathbf{H}_{\xi}(k) \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\xi}(k) \mathbf{H}_{\xi}^T(k)$, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\xi}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора X состояния ВО в фильтре радиолокационных данных.

Реализация алгоритма бесстробового отождествления траекторий

В представленном выше алгоритме используются три фильтра: фильтр навигационных данных, фильтр радиолокационных данных и комплексный фильтр. Соответствующие уравнения фильтрации и в целом алгоритм были реализованы программно.

Исходными уравнениями фильтрации являются уравнение динамики вектора состояния воздушного объекта (априорное уравнение сообщения) и уравнение наблюдения [10].

В вектор состояния воздушного объекта для повышения точности фильтрации его прямоугольных координат целесообразно включить не только их, но и соответствующие параметры движения – проекции скорости и ускорения, представив вектор состояния в виде

$$\lambda = \|x \quad y \quad z \quad v_x \quad v_y \quad v_z \quad a_x \quad a_y \quad a_z\|^T.$$

Для одной координаты и соответствующих параметров движения была использована линейная модель [11], подтвержденная в [12] по результатам летных экспериментов:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_x, \\ \dot{v}_x = a_x, \\ \dot{a}_x = -\alpha a_x - \beta v_x + \sqrt{2\alpha\sigma_a^2} \cdot n_x(t), \end{cases}$$

где α – величина, обратная времени корреляции флуктуаций ускорения;

β – средний квадрат частоты собственных колебаний автокорреляционной функции флуктуаций ускорения;

σ_a^2 – дисперсия флуктуаций ускорения воздушного объекта;

$n_x(t)$ – стандартный (с единичной спектральной плотностью) белый гауссовский шум (БГШ).

С использованием данной модели уравнение динамики имеет следующий векторно-матричный вид:

$$\dot{\lambda}(t) = \mathbf{A}\lambda(t) + n_{\lambda}(t),$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha \end{pmatrix},$$

$$n_{\lambda}(t) = \left\| 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ n_x(t) \ n_y(t) \ n_z(t) \right\|^T,$$

где $n_x(t)$, $n_y(t)$, $n_z(t)$ – независимые стандартные БГШ.

Такому дифференциальному уравнению динамики соответствует следующее уравнение в дискретном времени:

$$\lambda_v = \mathbf{F}\lambda_{v-1} + \mathbf{\Gamma}_{\lambda}n_{\lambda v},$$

где

$$\lambda_v = \lambda(t_v), \quad \mathbf{F} = \exp(\mathbf{A} \cdot \Delta), \quad \Delta = t_v - t_{v-1},$$

$$n_{\lambda v} = \left\| 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ n_{xv} \ n_{yv} \ n_{zv} \right\|^T,$$

где n_{xv} , n_{yv} , n_{zv} – независимые стандартные (с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией) гауссовские случайные величины,

$$\mathbf{\Gamma}_{\lambda} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} \end{pmatrix},$$

где $D = 2\alpha\sigma_a^2\Delta$.

Были приняты следующие численные значения параметров: $\alpha = 0,2 \text{ 1/с}$; $\beta = 0,39 \text{ 1/с}^2$; $\sigma_V = 0,2 \text{ м/с}$; $\sigma_a^2 = 0,0172 \text{ м}^2/\text{с}^4$ [12] и $\Delta = 10 \text{ с}$.

Уравнение наблюдения для фильтра навигационных данных имеет линейный вид:

$$\xi_{\text{азн } v} = \mathbf{H}\lambda_v + \mathbf{\Gamma}_{\xi \text{ азн}} n_{\text{азн } v},$$

где

$$\xi_{\text{азн } v} = \left\| \xi_{xv} \ \xi_{yv} \ \xi_{zv} \ \xi_{Vxv} \ \xi_{Vyv} \right\|^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_{\xi \text{ азн}} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Vx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Vy} \end{pmatrix},$$

$$n_{\text{азн } v} = \left\| n_{\text{азн } xv} \ n_{\text{азн } yv} \ n_{\text{азн } zv} \ n_{\text{азн } Vxv} \ n_{\text{азн } Vyv} \right\|^T,$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{Vx}, \sigma_{Vy}$ – среднеквадратические ошибки измерения прямоугольных координат и горизонтальных составляющих скорости в бортовой навигационной аппаратуре воздушного объекта;

$n_{азн\ xv}, n_{азн\ yv}, n_{азн\ zv}, n_{азн\ Vxv}, n_{азн\ Vyv}$ – независимые стандартные гауссовские случайные величины.

Так как для фильтра навигационных данных оба уравнения – динамики и наблюдения – линейные, то оптимальным по критерию минимума $\sigma_{x\ азн}, \sigma_{y\ азн}, \sigma_{z\ азн}$ является алгоритм фильтрации Калмана, представляемый следующими уравнениями [10]:

$$\hat{\lambda}_v = \tilde{\lambda}_v + \mathbf{K}_v (\xi_{азн\ v} - \mathbf{H} \tilde{\lambda}_v),$$

$$\mathbf{K}_v = \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}^T + \Gamma_{\xi\ азн} \Gamma_{\xi\ азн}^T)^{-1},$$

где оценка прогноза (экстраполированная оценка) $\tilde{\lambda}_v$ и корреляционная матрица ошибок прогноза $\tilde{\mathbf{R}}_v$ были сформированы в конце предыдущего шага фильтрации по формулам:

$$\tilde{\lambda}_v = \mathbf{F} \hat{\lambda}_{v-1}, \quad \tilde{\mathbf{R}}_v = \mathbf{F} \mathbf{R}_{v-1} \mathbf{F}^T + \Gamma_{\lambda} \Gamma_{\lambda}^T.$$

В конце данного шага рассчитывается корреляционная матрица ошибок фильтрации

$$\mathbf{R}_v = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_v \mathbf{H}) \tilde{\mathbf{R}}_v,$$

где \mathbf{I} – единичная матрица 9×9 , и осуществляется прогноз на следующий $(v + 1)$ шаг: рассчитываются $\tilde{\lambda}_{v+1}$ и $\tilde{\mathbf{R}}_{v+1}$.

При фильтрации данных РЛС уравнение наблюдения имеет нелинейный вид

$$\xi_{рлс\ v} = S(\lambda_v) + \Gamma_{\xi\ рлс} n_{рлс\ v}, \quad \xi_{рлс\ v} = \left\| \begin{matrix} \xi_{Dv} & \xi_{\beta v} & \xi_{\varepsilon v} \end{matrix} \right\|^T,$$

$$S(\lambda_v) = \left\| \begin{matrix} D_v = \sqrt{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2} \\ \beta_v = \arctg\left(\frac{x_v}{y_v}\right) + \frac{\pi}{2} (2 - \text{sgn } x_v - \text{sgn } x_v \text{sgn } y_v) \\ \varepsilon_v = \arctg\left(\frac{x_v - z_v}{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}\right) \end{matrix} \right\|,$$

$$\Gamma_{\xi\ рлс} = \begin{pmatrix} \sigma_D & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\varepsilon} \end{pmatrix}, \quad n_{рлс\ v} = \left\| \begin{matrix} n_{Dv} & n_{\beta v} & n_{\varepsilon v} \end{matrix} \right\|^T,$$

где $\sigma_D, \sigma_{\beta}, \sigma_{\varepsilon}$ – среднеквадратические ошибки измерения сферических координат в РЛС;

$n_{Dv}, n_{\beta v}, n_{\varepsilon v}$ – независимые стандартные гауссовские случайные величины.

Так как в данном случае уравнение наблюдения нелинейно, то оптимальным по критерию минимума $\sigma_{x\ рлс}, \sigma_{y\ рлс}, \sigma_{z\ рлс}$ является алгоритм фильтрации Стратоновича [10], который практически реализовать тяжело. Поэтому применительно к решаемой задаче был реализован квази-оптимальный расширенный (линеаризованный) фильтр Калмана, отличающийся от линейного фильтра Калмана следующими уравнениями [10]:

$$\hat{\lambda}_v = \tilde{\lambda}_v + \mathbf{K}_v \left(\xi_{\text{рлс } v} - S(\tilde{\lambda}_v) \right),$$

где

$$\mathbf{K}_v = \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T \left(\mathbf{H}_v \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T + \Gamma_{\xi_{\text{рлс}}} \Gamma_{\xi_{\text{рлс}}}^T \right)^{-1},$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_v = \mathbf{F} \mathbf{R}_{v-1} \mathbf{F}^T + \Gamma_{\lambda} \Gamma_{\lambda}^T,$$

$$\mathbf{R}_v = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_v \mathbf{H}_v) \tilde{\mathbf{R}}_v,$$

а матрица пересчета изменений вектора состояния в изменения вектора наблюдения имеет вид [13]

$$\mathbf{H}_v = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{x}_v}{\tilde{D}_v} & \frac{\tilde{y}_v}{\tilde{D}_v} & \frac{\tilde{z}_v}{\tilde{D}_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_v}{\tilde{D}_{\Gamma v}^2} & -\frac{\tilde{x}_v}{\tilde{D}_{\Gamma v}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\tilde{x}_v \tilde{z}_v}{\tilde{D}_v^2 \tilde{D}_{\Gamma v}} & -\frac{\tilde{y}_v \tilde{z}_v}{\tilde{D}_v^2 \tilde{D}_{\Gamma v}} & \frac{\tilde{D}_{\Gamma v}}{\tilde{D}_v^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где $\tilde{D}_v = \sqrt{\tilde{x}_v^2 + \tilde{y}_v^2 + \tilde{z}_v^2}$ – прогнозируемое с предыдущего шага фильтрации значение наклонной дальности до воздушного объекта,

$\tilde{D}_{\Gamma v} = \sqrt{\tilde{x}_v^2 + \tilde{y}_v^2}$ – прогнозируемое с предыдущего шага фильтрации значение горизонтальной дальности до воздушного объекта.

Совокупность рассмотренных выше фильтра навигационных данных (фильтра Калмана) и фильтра радиолокационных данных (расширенного фильтра Калмана) является третьим фильтром, используемым в алгоритме отождествления, – комплексным фильтром (рис. 1).

Работу комплексного фильтра можно пояснить с помощью временной диаграммы (рис. 2).

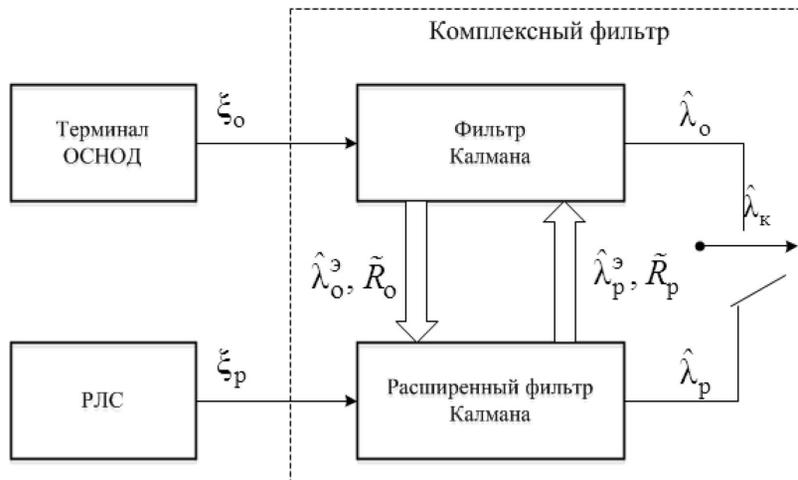


Рис. 1. Структурная схема комплексного фильтра

Fig. 1. Block diagram of a complex filter

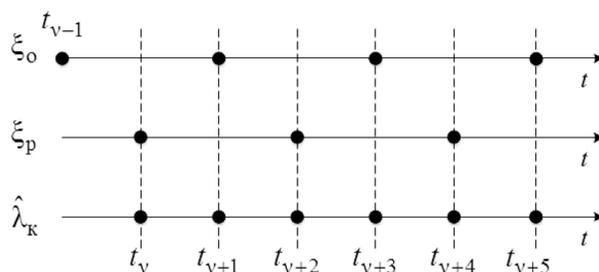


Рис. 2. Временная диаграмма работы комплексного фильтра

Fig. 2. Timing diagram of complex filter operation

В момент времени t_{v-1} из $v-1$ отсчета наблюдения ξ_0 в фильтре Калмана формируется экстраполированная оценка вектора состояния $\hat{\lambda}_0^3$, кроме этого рассчитывается корреляционная матрица ошибок прогноза \tilde{R}_0 . Полученные $\hat{\lambda}_0^3$ и \tilde{R}_0 передаются в расширенный фильтр Калмана.

В момент времени t_v на вход расширенного фильтра Калмана поступает v отсчет ξ_p от РЛС. На основе этого отсчета и $\hat{\lambda}_0^3$, \tilde{R}_0 расширенный фильтр Калмана формирует оценку вектора состояния $\hat{\lambda}_p^3$, которая подается на выход комплексного фильтра. Полученные $\hat{\lambda}_p^3$ и \tilde{R}_p передаются в фильтр Калмана для обработки $v+1$ отсчета наблюдения ξ_0 . В результате обработки сформируются $\hat{\lambda}_0^3$, $\hat{\lambda}_0^3$, \tilde{R}_0 .

Таким образом, на выход комплексного фильтра попеременно будут поступать оценки $\hat{\lambda}_p^3$ и $\hat{\lambda}_0^3$.

Характеристики алгоритма бесстробового отождествления траекторий

При использовании программной реализации алгоритма бесстробового отождествления траекторий получены в результате статистического имитационного моделирования значения интервала разрешения при координатно-связном опознавании в зависимости от дальности до опознаваемого объекта (табл. 1) при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 50$ м (измерения горизонтальных составляющих скорости не использовались); $\sigma_\beta = \sigma_\varepsilon = 0,02^\circ$; $\sigma_D = 5$ м; заданной вероятности правильного отождествления чужого объекта со своим 0,96 при фиксированной вероятности правильного отождествления своего объекта 0,97. В алгоритме отождествления использовались по три точки каждой из отождествляемых траекторий – всего шесть точек в комплексном фильтре (рис. 2).

Для сравнения приведены результаты моделирования аналогичного алгоритма отождествления при радиолокационном опознавании (отождествляются данные потребителя и данные радиолокационного запросчика с $\sigma_\beta = \sigma_\varepsilon = 0,2^\circ$; $\sigma_D = 300$ м).

Таблица 1. Характеристики бесстробового отождествления

Table 1. Characteristics of strobeless identification

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч\ КСО}$, м	154,1	158	161,8	164,9	170,9	174,6	177,9	183,8
$D_{сч\ РЛО}$, м	870,2	896,7	926,6	955,8	1007,8	1034,2	1048,1	1063,6

Как видно из данных табл. 1, в рассмотренном диапазоне дальностей способность системы по разрешению «своего» и «чужого» объектов с использованием алгоритма бесстробового отождествления при координатно-связном опознавании примерно в 6 раз выше, чем при радиолокационном опознавании.

В табл. 2 показан выигрыш бесстробового алгоритма отождествления при координатно-связном опознавании по сравнению с отождествлением в стробах, когда решение о «своем» объекте формируется при совместном (по всем отождествляемым координатам) попадании оценок координат своего объекта, сформированных средством опознавания, в стробы, центры которых выставлены по оценкам координат опознаваемого объекта, сформированным потребителем информации опознавания.

Из данных табл. 2 следует, что по разрешающей способности координатно-связное опознавание при использовании алгоритма отождествления траекторий обеспечивает выигрыш в 6–20 раз относительно радиолокационного опознавания с отождествлением в стробах.

В табл. 3 приведены значения интервала разрешения при бесстробовом отождествлении траекторий воздушных объектов, формируемых: при координатно-связном опознавании по данным от средства координатно-связного опознавания с $\sigma_x = \sigma_y = 10$ м, $\sigma_z = 100$ м, $\sigma_{V_x} = 0,5$ м/с, $\sigma_{V_y} = 0,5$ м/с и от РЛС радиотехнических войск (РТВ) типа 55Ж6МЕ с $\sigma_B = 10'$, $\sigma_e = 12'$ $\sigma_D = 90$ м [14], при радиолокационном опознавании – от средства радиолокационного опознавания с $\sigma_B = 2^\circ$, $\sigma_e = 30^\circ$ $\sigma_D = 500$ м и от РЛС типа 55Ж6МЕ.

Полученные результаты показывают, что при бесстробовом отождествлении с РЛС РТВ типа 55Ж6МЕ выигрыш координатно-связного опознавания по сравнению с радиолокационным составляет примерно 18 раз.

Представленные выше характеристики отождествления получены в предположении, что расстояние между своим и чужим объектами распределено равномерно по всем трем про-

Таблица 2. Характеристика бесстробового отождествления в сравнении с отождествлением в стробах
Table 2. Characteristics of strobeless identification in comparison with identification in strobes

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч}$ РЛО в стробах, м	943,6	1000	1074	1162,2	1730,6	2394,9	3093,9	3808,6
$D_{сч}$ КСО1 в стробах, м	260,7	262,77	265,65	269,3	298	340,49	392,33	450,3
$D_{сч}$ КСО2 при бесстробовом отождествлении, м	154,1	158	161,8	164,9	170,9	174,6	177,9	183,8

Таблица 3. Характеристики бесстробового отождествления с РЛС РТВ типа 55Ж6МЕ
Table 3. Characteristics of strobeless identification with RTV type 55Zh6ME radar

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч}$ КСО, м	286,4	315,6	353,1	399	675,5	973,5	1284	1601,5
$D_{сч}$ РЛО, м	23678	24258	24696	25181	26187	26820	27430	28970

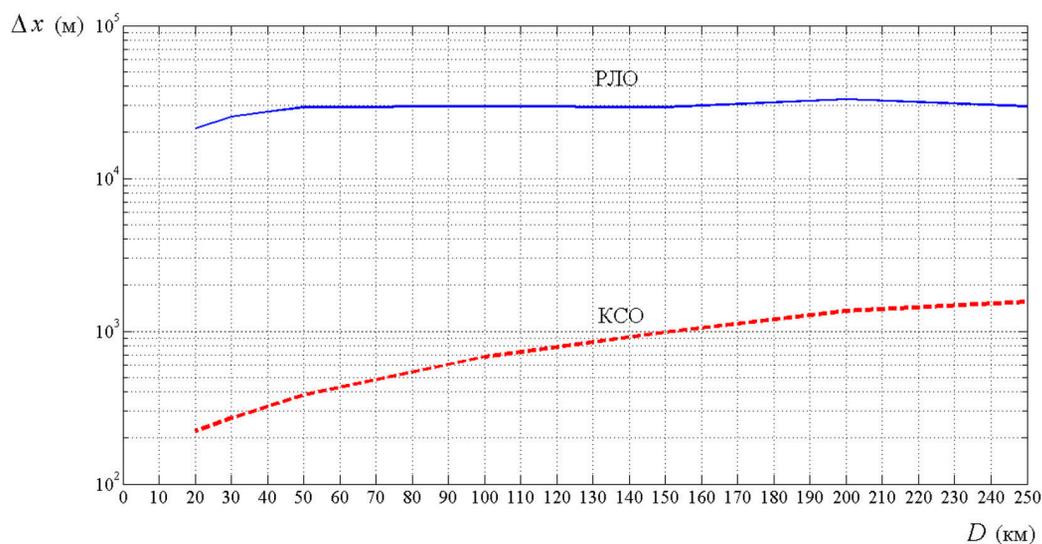


Рис. 3. Интервал разрешения по координате X при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания

Fig. 3. Resolution interval along the x coordinate for strobeless identification for coordinate-connected and radar identification

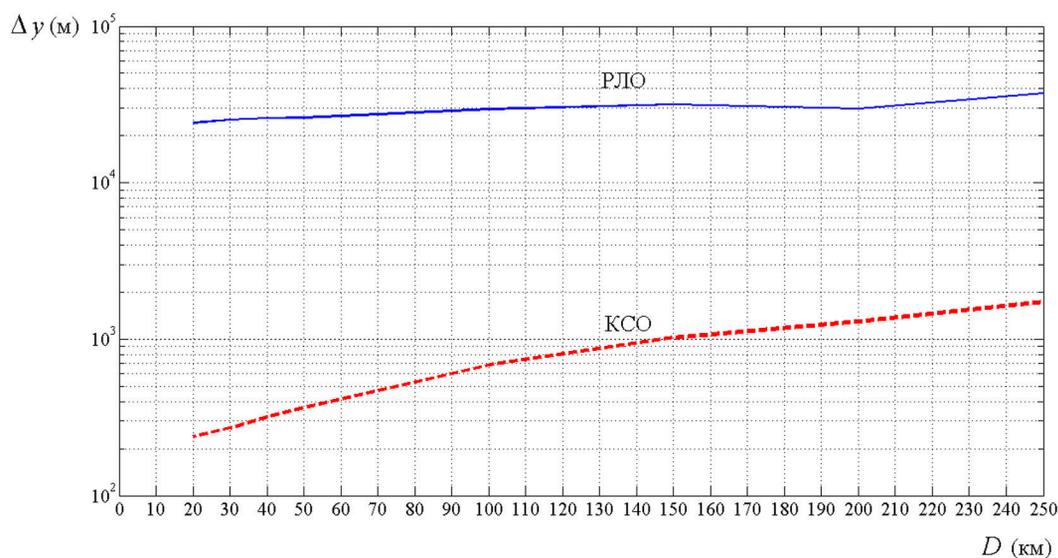


Рис. 4. Интервал разрешения по координате Y при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания

Fig. 4. Resolution interval along the y coordinate for strobeless identification for coordinate-connected and radar identification

странственным координатам. На графиках рис. 3, 4 представлены зависимости интервалов разрешения по отдельным координатам от дальности при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания. Характеристики отождествляемых средств такие же, как и для табл. 3.

Заключение

Таким образом, в работе получены характеристики алгоритма бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов, синтезированного по методу, основанному на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. Полученные характеристики отождествления при координатно-связном опознавании свидетельствуют о том, что по разрешающей способности координатно-связное опознавание обеспечивает выигрыш до 20 раз относительно радиолокационного опознавания с отождествлением в стробах. Если при радиолокационном опознавании также используется бесстробовое отождествление, то выигрыш координатно-связного опознавания составляет 6–18 раз в зависимости от дальности и характеристик потребителя информации опознавания (РЛС).

Список литературы / References

[1] Аврамов А. В., Жиронкин С. Б., Черваков В. О. Интегрированные системы опознавания: направления разработки на основе методов координатно-связного и комплексного опознавания. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2017, 1, 35–41. [Avramov A. V., Zhironkin S. B., Chervakov V. O. Integrated identification systems: directions of development based on coordinate-connected and complex identification methods. *Advances in modern radio electronics*, 2017, 1, 35–41 (in Russian)]

[2] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. *Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012, 260 с. [Tyapkin V. N., Garin E. N. *Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system: monograph*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2012, 260 p. (in Russian)]

[3] Тяпкин В. Н., Виноградов А. Д. Детерминированный подход к решению задачи определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования радиоориентиров. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 289–310. [Tyapkin V. N., Vinogradov A. D. Deterministic approach to solving the problem of determining the coordinates and angular orientation of the onboard direction-finding antenna based on the results of direction finding of radio landmarks. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2020, 13(3), 289–310 (in Russian)]

[4] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Кучин А. А. Помехоустойчивость запросного канала опознавания с широкополосными сигналами и корректирующими кодами в условиях импульсных шумовых и внутрисистемных помех. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(6), 673–682. [Zhironkin S. B., Bliznuk A. A., Kuchin A. A. A noise stability of the request channel of an identification with broadband signals and correcting codes in the conditions of pulse noise and intersystem hindrances. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2019, 12(6), 673–682 (in Russian)]

[5] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Пшеницын А. А., Лютиков И. В. Оценка параметров смеси сигнала с шумом по наблюдению выходов многоканального устройства различения ортогональных сигналов при когерентном приеме. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 361–369. [Zhironkin S. B., Bliznuk A. A., Pshenitsyn A. A.,

Lyutikov I. V. Estimation of the parameters of the signal-noise mixture by observing the outputs of a multichannel device for discriminating orthogonal signals with coherent reception. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2020, 13(3), 361–369 (in Russian)]

[6] Бердышев В. П., Близнюк А. А., Жиронкин С. Б., Пшеницын А. А. Помехоустойчивость канала передачи данных с ППРЧ при мягком декодировании с использованием оценок спектральной плотности мощности помехи. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 343–354. [Berdyshev V. P., Bliznyuk A. A., Zhironkin S. B., Pshenitsyn A. A. Noise immunity of a data transmission channel with frequency hopping during soft decoding using estimates of the spectral density of the interference power. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2020, 13(7), 343–354 (in Russian)]

[7] Жиронкин С. Б., Пшеницын А. А., Близнюк А. А. Оптимизация параметров каскадного кода по критерию максимума граничного значения полосы частот помехи и выбор алгоритма декодирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, 14(7), 820–829. [Zhironkin S. B., Pshenitsyn A. A., Bliznyuk A. A. Optimization of the cascade code parameters by the criterion of the boundary value of the interference band and the selection of the decoding algorithm. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2021, 14(7), 820–829 (in Russian)]

[8] Тяпкин В. Н., Фомин А. Н., Гарин Е. Н. и др. *Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Под ред. В. Н. Тяпкина*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011, 536 с. [Tyapkin V. N., Fomin A. N., Garin E. N. *Fundamentals of building radar stations of the radio engineering troops. Ed. by V. N. Tyapkin*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011, 536 p. (in Russian)]

[9] Жиронкин, С. Б., Богданов А. В., Черваков В. О. Метод синтеза оптимальных алгоритмов отождествления измерений векторов состояния подвижных объектов различными системами наблюдения на основе теории фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. *Сборник статей по материалам XXV Всероссийской НТК школы семинара: Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропотекающих процессах*. Сочи: РАН, 2014, 619 с. [Zhironkin S. B., Bogdanov A. V., Chervakov V. O. Synthesis method of optimal algorithms for identifying measurements of state vectors of moving objects by various observation systems based on the theory of filtering discrete-continuous Markov random processes. *Collection of articles based on materials of the XXV All-Russian Scientific and Technical Complex of the Seminar School: Transmission, reception, processing and display of information about fast processes*. Sochi, RAN, 2014, 619 p. (in Russian)]

[10] Тихонов В. И., Харисов В. Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. М.: Радио и связь, 1991, 320 с. [Tikhonov V. I., Harisov V. N. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moskva, Radio i svyaz, 1991, 320 p. (in Russian)]

[11] Ярлыков М. С. *Статистическая теория радионавигации*. М.: Радио и связь, 1985 [Yarlykov M. S. *Statistical theory of radio navigation*. Moskva, Radio i svyaz, 1985 (in Russian)]

[12] Богданов А. В., Голубенко В. А., Княжев А. И., Филонов А. А. Алгоритм совместного траекторного сопровождения-распознавания функционального назначения самолетов, летящих в сомкнутом боевом порядке. *Радиотехника*, 2008, 10, 4–13. [Bogdanov A. V., Golubenko V. A.,

Кныгев А.И., Филонov А.А. Algorithm for joint trajectory tracking-recognition of the functional purpose of aircraft flying in close combat formation. *Radio engineering*, 2008, 10, 4–13 (in Russian)]

[13] Ширман, Я.Д., Манжос В.И. *Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех*. М.: Радио и связь, 1981. [Shirman Ya.D., Manzhos V.I. *Theory and technique of processing radar information against the background of interference*. Moskva, Radio i svyaz, 1981 (in Russian)]

[14] 55Ж6МЕ «Небо-МЕ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-690/html4> – Заглавие с экрана. [55Zh6ME «Nebo-ME» [Electronic resources] – Access: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-690/html4>]