

Стробирование радиолокационных отметок при траекторной фильтрации в связанных координатах

К. К. Васильев¹, А. В. Маттис², О. В. Саверкин^{1✉}

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

²АО «НПО "Марс"», Ульяновск, Россия

✉ saverkin-oleg@mail.ru

Аннотация

Введение. Современные воздушные цели, в особенности беспилотные, становятся менее заметными, а их маневренные возможности продолжают совершенствоваться. Для обеспечения эффективного сопровождения высокоманевренных целей актуализируются и алгоритмы траекторной обработки. Поскольку точность фильтрации траекторных параметров во многом определяется достоверностью радиолокационной информации, возрастает роль алгоритмов стробирования. В связи с этим возникает задача повышения эффективности стробирования радиолокационных отметок.

Цель работы. Разработка и исследование эффективности алгоритма траекторного стробирования, основанного на модели движения в скоростной связанной с направлением движения цели системе координат и предполагающего формирование строга в форме усеченного эллипсоидного сектора.

Методы и материалы. Рассмотрены модели движения целей в связанных координатах, которые положены в основу новых алгоритмов траекторного сопровождения, базирующихся на калмановской фильтрации. Рассмотрены существующие методы стробирования радиолокационных отметок от цели и предложен новый подход на основе фильтрации в связанных координатах. Новый алгоритм предполагает формирование строга в форме усеченного эллипсоидного сектора. Такая форма соответствует наиболее вероятному местоположению отметок от сопровождаемой цели. Эффективность предложенных решений подтверждается результатами математического моделирования, выполненного в среде MATLAB.

Результаты. Приведены аналитические выражения для модели движения, рекуррентной фильтрации и алгоритма стробирования в связанных координатах. Проведен сравнительный анализ эффективности сопровождения при одинаковых размерах эллиптического и предложенного строга. Установлено, что для скоростных и высокоманевренных целей алгоритм с построением строга в форме усеченного эллипсоидного сектора обеспечивает до 30 % более длительное сопровождение до первой потери отметки от цели, чем алгоритм с эллиптическим стробированием. Кроме того, средняя продолжительность сопровождения для секторного строга практически не зависит от начальной скорости движения цели, а при значениях погрешностей измерения координат менее 50 м имеет большее значение, чем для эллиптического.

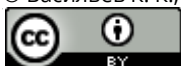
Заключение. Достигнутый результат обеспечивается способностью строга в связанных координатах подстраиваться под направление движения и маневрирование цели, что позволяет осуществлять качественное сопровождение объектов в большем диапазоне скоростей. Построение такого строга также позволит снизить вероятность пропуска радиолокационных отметок от сопровождаемой цели и обеспечит уменьшение числа ложных отметок и отметок, принадлежащих другим траекториям, внутри строга.

Ключевые слова: путевая скорость; курс; угол наклона траектории; связанная система координат; траекторная фильтрация; расширенный фильтр Калмана; стробирование

Для цитирования: Васильев К. К., Маттис А. В., Саверкин О. В. Стробирование радиолокационных отметок при траекторной фильтрации в связанных координатах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 71–79. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-71-79

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019; принята к публикации после рецензирования 16.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019



Strobing of Radar Marks for Trajectory Filtration in a Body-Fixed Frame

Konstantin K. Vasiliev¹, Alexey V. Mattis², Oleg V. Saverkin^{1✉}

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²JSC «RPA "Mars"», Ulyanovsk, Russia

✉saverkin-oleg@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern air targets, particularly drones, are becoming less noticeable, while their manoeuvrability continues to improve. Trajectory processing algorithms have also been improved in order to provide for effective tracking of highly manoeuvring targets. The accuracy of filtering trajectory parameters is largely determined by the reliability of radar information. This has also required an enhanced role for strobe algorithms and the need to increase the effectiveness of strobe radar marks.

Aim. To develop and investigate the efficiency of a trajectory strobe algorithm based on the target motion model in a high-speed coordinate system associated with the direction of the target motion and involving the formation of a strobe in the form of a truncated elliptical sector.

Materials and methods. The study considered the target motion model in the body-fixed frame. This model was taken as the basis for new trajectory filtering algorithms based on Kalman filtering. Existing methods for strobing radar marks of the target were considered and a new approach based on filtering in the body-fixed frame proposed. The new algorithm assumes the formation of a strobe in the form of a truncated elliptical sector. This form corresponds to the most probable location of the marks of the tracked target. The effectiveness of the proposed solutions is confirmed by the results of mathematical modelling carried out using MATLAB.

Results. The study produced analytical expressions for the motion model, recurrent filtering and strobe algorithm in the body-fixed frame. A comparative analysis of tracking effectiveness with the same volumes of the elliptical and proposed strobes was performed. It was established that the algorithm with strobe formation in the shape of a truncated elliptical sector provides for longer target tracking up to the time of the first loss of the mark for speed and highly manoeuvring targets, when compared to the elliptical strobe algorithm. In addition, the average duration of sector strobe tracking does not in practice depend on the initial speed of the target and provides greater accuracy for small measurement error values (less than 50 m) of the coordinates than in comparison with the elliptical one.

Conclusion. The described results were achieved by the ability of the strobe in the body-fixed frame to adapt to the direction of motion and target manoeuvring, allowing high-quality target tracking within a larger speed range. Such strobe formation will also reduce the likelihood of skip-ping radar marks from the tracked target and will reduce the number of false marks belonging to other trajectories inside the strobe.

Key words: ground speed; course; climb angle; body-fixed frame; trajectory filtration; extended Kalman filter; strobing

For citation: Vasiliev K. K., Mattis A. V., Saverkin O. V. Strobing of Radar Marks for Trajectory Filtration in a Body-Fixed Frame. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 71–79. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-71-79

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 08.07.2019; accepted 16.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Создание алгоритмов траекторного сопровождения [1–12] основано на использовании математических моделей, с помощью которых можно с достаточной точностью аппроксимировать реальное движение цели и процесс ее наблюдения. Описание траекторий движения должно отражать динамические свойства различных типов движу-

щихся объектов и обеспечивать возможность построения алгоритмов обработки наблюдений в реальном масштабе времени. Этим условиям удовлетворяет общепризнанное представление траекторий с помощью широкого класса векторных марковских последовательностей. Вместе с тем, недостатком известных моделей является привяз-

ка ускорений объекта наблюдения к базовой прямоугольной системе координат $Oxyz$. Понятно, что направление движения реальной цели и ее возможные маневры, как правило, никак не соотносятся с искусственно введенными координатами.

В связи с этим в работах [13, 14] предложено использовать для описания траекторий связанную с движением цели систему координат. Анализ показал, что при этом может быть повышена эффективность траекторной фильтрации маневрирующих целей [14, 15]. Вместе с тем, при фильтрации в связанных координатах классическая форма эллиптического строга может быть заменена на более соответствующий таким координатам эллипсоидный сектор. В связи с этим цель настоящей статьи – решение задачи построения строга в форме усеченного эллипсоидного сектора. К задачам исследования также относится сравнительный анализ эффективности применения строгов различной формы.

Особенности фильтрации в связанных координатах. Пусть скорость изменения положения объекта определяется в связанной системе координат. В этом случае на i -м измерении необходимо задать (рис. 1) возможное изменение значения путевой скорости v_i и двух углов – курса θ_i , отсчитываемого от оси x по часовой стрелке, и угла наклона траектории (угла набора высоты) $\varphi_i \in (-0.5\pi; 0.5\pi)$, отсчитываемого от проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость Oxy : $\varphi_i > 0$, если $v_{zi} > 0$ ($i = 1, 2, \dots$ – номер измерения).

Изменение этих параметров зададим следующими уравнениями авторегрессии:

$$\begin{aligned} v_i &= v_{i-1} + \sigma_v t_i \xi_{vi}; \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \sigma_\theta t_i \xi_{\theta i}; \\ \varphi_i &= \varphi_{i-1} + \sigma_\varphi t_i \xi_{\varphi i}, \end{aligned}$$

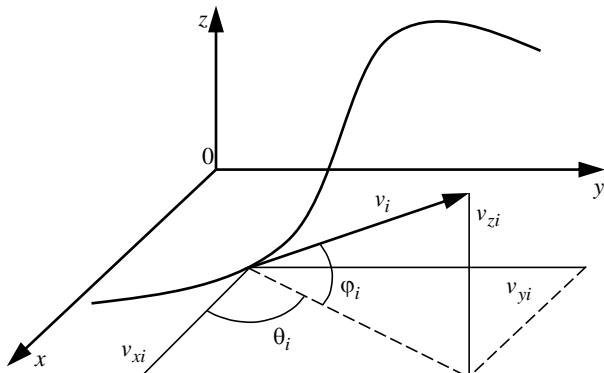


Рис. 1. Задание скорости в связанной системе координат
Fig. 1. The specifying of velocity in the body-fixed frame

где σ_v , σ_θ , σ_φ – среднеквадратические отклонения (СКО) ускорения, скорости изменения курса и скорости изменения угла наклона траектории рассматриваемого класса целей соответственно; t_i – интервал времени между соседними измерениями; ξ_{vi} , $\xi_{\theta i}$, $\xi_{\varphi i}$ – стандартные гауссовские независимые случайные величины. Эти уравнения можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{v}_{cbi} = \mathbf{v}_{cb(i-1)} + \mathbf{\Theta}_{vi} \xi_i,$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{cbi} &= (v_i, \theta_i, \varphi_i)^T; \\ \mathbf{\Theta}_{vi} &= \text{diag}(\sigma_v t_i, \sigma_\theta t_i, \sigma_\varphi t_i); \\ \xi_i &= (\xi_{vi}, \xi_{\theta i}, \xi_{\varphi i})^T. \end{aligned}$$

После задания вектора скорости возможны 2 подхода к полному определению моделей движения целей для решения задач имитации траекторий, прогнозирования и фильтрации.

Первый подход состоит в прямом введении скоростей и углов в связанных с движением цели координатах в вектор состояния:

$$\mathbf{S}_{cbi} = (x_i, y_i, z_i, v_i, \theta_i, \varphi_i)^T,$$

где

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + t_i v_{xi}; \\ y_i &= y_{i-1} + t_i v_{yi}; \\ z_i &= z_{i-1} + t_i v_{zi}; \\ v_i &= v_{i-1} + \sigma_v t_i \xi_{vi}; \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \sigma_\theta t_i \xi_{\theta i}; \\ \varphi_i &= \varphi_{i-1} + \sigma_\varphi t_i \xi_{\varphi i}, \end{aligned} \quad (1)$$

причем $v_{xi} = v_i \cos \theta_i \cos \varphi_i$; $v_{yi} = v_i \sin \theta_i \cos \varphi_i$; $v_{zi} = v_i \sin \varphi_i$ – проекции вектора скорости движения на координатные оси.

На рис. 2 представлены характерные реализации, полученные с помощью связанной модели при двух наборах параметров. Анализ многих реализаций показывает лучшее сходство с реальными траекториями движения маневрирующих воздушных целей. Очень важно, что для рассматриваемых связанных моделей необходимо задавать параметры σ_v , σ_θ , σ_φ , не зависящие от направления координатных осей и определяемые только типом цели.

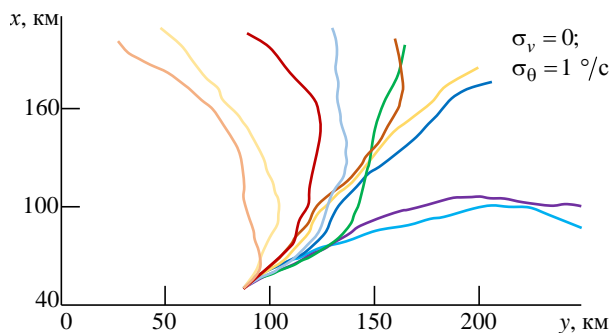
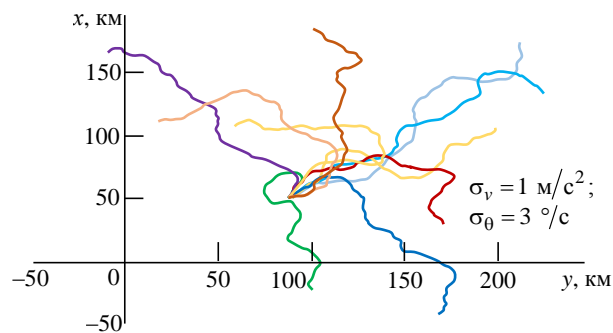


Рис. 2. Характерные траектории движения целей на плоскости

Fig. 2. Characteristic trajectories of the targets motion on the plane



Предложенная модель имеет 2 существенных отличия от классической линейной модели. Прежде всего, выражения (1) относятся к классу векторных нелинейных стохастических разностных уравнений:

$$\mathbf{S}_{\text{CB}i} = \phi_i[\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)}] + \mathfrak{g}_{\mathbf{v}i}\bar{\xi}_i; \quad i = 1, 2, \dots,$$

где $\phi_i[\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)}]$ – нелинейная векторная функция вектора состояния $\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)}$, определяемая (1). Поэтому прогноз (экстраполяция) вектора состояния на i -м шаге наблюдения определяется по формуле

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{CB},\mathfrak{z}i} = \phi_i[\hat{\mathbf{S}}_{\text{CB}(i-1)}],$$

а ковариационная матрица ошибок – как

$$P_{\mathfrak{z}i} = \phi_i'[\hat{\mathbf{S}}_{\text{CB}(i-1)}]P_{i-1}\phi_i'^T[\hat{\mathbf{S}}_{\text{CB}(i-1)}] + \mathfrak{g}_{\mathbf{v}i}Q_i\mathfrak{g}_{\mathbf{v}i}^T, \quad (2)$$

где

$$\phi_i'[\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)}] = d\phi_i[\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)}]/d\mathbf{S}_{\text{CB}(i-1)};$$

$P_{i-1} = P_{\mathfrak{z}(i-1)}[E + C^T B_{i-1}^{-1} C P_{\mathfrak{z}(i-1)}]^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценивания; $Q_i = M\{\xi_i \xi_i^T\}$, причем E – единичная матрица; C – матрица преобразования наблюдений; M – символ математического ожидания; символом ${}^\wedge$ здесь и далее отмечены результаты оценивания соответствующих величин.

Оценивание выполняется согласно известному выражению для фильтра Калмана [14, 15]:

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{CB}i} = \hat{\mathbf{S}}_{\text{CB},\mathfrak{z}i} + P_i C^T B_i^{-1} (\mathbf{z}_i - C \hat{\mathbf{S}}_{\text{CB},\mathfrak{z}i}),$$

где \mathbf{z}_i – модель наблюдений.

При этом предполагается, что наблюдения производятся в декартовой системе. В этом случае модель наблюдений имеет вид $\mathbf{z}_i = C \mathbf{S}_{\text{CB}i} + \mathbf{n}_i$,

где $\mathbf{n}_i = (n_{xi} \ n_{yi} \ n_{zi})^T$ – аддитивный шум с нулевым средним и ковариационной матрицей

$$B_i = \begin{pmatrix} \sigma_{nxi}^2 & b_{xyi} & b_{xzi} \\ b_{xyi} & \sigma_{nyi}^2 & b_{yzi} \\ b_{xzi} & b_{yzi} & \sigma_{nzi}^2 \end{pmatrix},$$

причем σ_{nxi} , σ_{nyi} , σ_{nzi} – СКО наблюдений координат x , y , z соответственно; b_{xyi} , b_{yzi} , b_{xzi} – ковариации соответствующих наблюдений [15].

Матрица преобразований в декартовой системе имеет вид

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Поскольку при работе радиолокационной станции (РЛС) позиция цели обычно фиксируется в сферических координатах, перед началом траекторной обработки необходимо выполнить соответствующие преобразования [15].

На основе предложенной модели описания движения с учетом модели наблюдений, зависящей от типа РЛС, могут быть построены разнообразные алгоритмы квазилинейного рекуррентного оценивания изменяющихся координат цели. Примеры таких алгоритмов и результаты их сравнительного анализа приведены в [14, 15]. При этом установлено, что фильтрация в связанной системе координат приводит к выигрышу по точности оценивания параметров движения цели.

Алгоритмы стробирования. В декартовой системе координат строб представляет собой эллипсоид, определяемый ковариационными матрицами ошибок наблюдения и ошибок прогнозирования положения цели [5, 7].

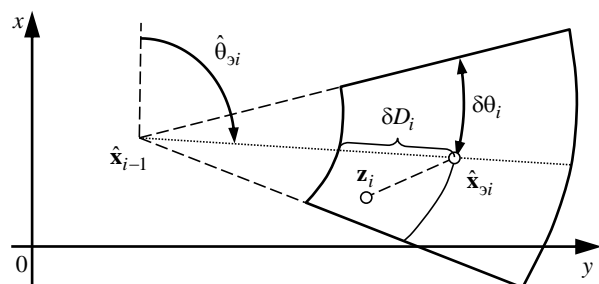


Рис. 3. Вид строба в связанных координатах на плоскости
Fig. 3. Shape of the strobe in the body-fixed frame on the plane

Фильтрация в связанных координатах [14, 15] предполагает создание строба в виде усеченного эллиптического сектора (рис. 3, для случая двух измерений). Размеры строба определяются уровнем допустимых отклонений $\Delta \mathbf{S}_{\text{св}i} = (\Delta D_i, \Delta \theta_i, \Delta \varphi_i)^T$ по дальности, курсу и по углу наклона траектории соответственно.

Указанные отклонения рассчитываются при определении ковариационной матрицы ошибок прогнозирования (2). Для получения необходимых отклонений из состава полученной матрицы выделяют ковариации ошибок прогнозирования координат:

$$P_{\vartheta i} = \begin{pmatrix} P_{\vartheta 11i} & P_{\vartheta 12i} & P_{\vartheta 13i} \\ P_{\vartheta 21i} & P_{\vartheta 22i} & P_{\vartheta 23i} \\ P_{\vartheta 31i} & P_{\vartheta 32i} & P_{\vartheta 33i} \end{pmatrix} = C P_{\vartheta i} C^T.$$

Ковариационная матрица отклонений радиолокационных отметок от экстраполированных координат цели в связанной системе координат определяется как

$$\begin{aligned} M\{\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{св}i} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{св}i}^T\} &= \\ &= M\{T_i (z_i - C \hat{\mathbf{S}}_{\text{св}i}) (z_i - C \hat{\mathbf{S}}_{\text{св}i})^T T_i^T\} = \\ &= T_i (P_{\vartheta i} + B_i) T_i^T, \end{aligned}$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{св}i} = (\varepsilon_{D_i}, \varepsilon_{\theta_i}, \varepsilon_{\varphi_i})^T$ – отклонения на связанных осях;

$$T_i = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \sin \hat{\varphi}_{\vartheta i} \\ \sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & \cos \hat{\theta}_{\vartheta i} \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} & -\sin \hat{\theta}_{\vartheta i} \sin \hat{\varphi}_{\vartheta i} \\ \sin \varphi_{\vartheta i} & 0 & \cos \hat{\varphi}_{\vartheta i} \end{pmatrix}$$

– матрица поворота координат.

Поскольку взаимная ковариация наблюдений в алгоритме не учитывается, ковариационная матрица шума наблюдений имеет вид

$$B_i = \begin{pmatrix} \sigma_{\text{nx}i} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{ny}i} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{nz}i} \end{pmatrix}.$$

Полученные значения ошибок прогнозирования в связанных координатах $(\sigma_{D_i}, \sigma_{\theta_i}, \sigma_{\varphi_i})$ определяют линейные размеры строба:

$$\delta_{D_i} = \gamma \sigma_{D_i}; \quad \delta_{\theta_i} = \gamma \sigma_{\theta_i}; \quad \delta_{\varphi_i} = \gamma \sigma_{\varphi_i},$$

которые связаны с допустимыми отклонениями следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_{D_i} &= \Delta D_i; \\ \delta_{\theta_i} &= \left| \left(\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}i} - \hat{\mathbf{S}}_{\text{св}(i-1)} \right) \right| \Delta \theta_i; \\ \delta_{\varphi_i} &= \left| \left(\hat{\mathbf{S}}_{\text{св}i} - \hat{\mathbf{S}}_{\text{св}(i-1)} \right) \right| \Delta \varphi_i, \end{aligned}$$

причем параметр γ выбирается по заданной вероятности пропуска отметки от цели, как правило, в интервале 2...3.

В результате полученные форма и размеры строба соответствуют наиболее вероятному местоположению цели в следующий момент времени наблюдения.

Сравнительный анализ эффективности стробирования. Исследование предложенного алгоритма стробирования (ПАС) выполнялось математическим моделированием на ЭВМ и проводилось для случая двух измерений. Исследовалась эффективность ПАС в сравнении с известным алгоритмом стробирования (ИАС) при одинаковых площадях секторного и эллиптического стробов, что обеспечивает равные вероятности попадания в них ложных отметок.

Для оценки эффективности применения ИАС и ПАС в среде MATLAB была построена математическая модель, позволяющая:

- имитировать различные траектории движения воздушных объектов;
- имитировать наблюдения от РЛС с заданными точностными характеристиками;
- выполнять траекторную фильтрацию полученных наблюдений с применением простого линейного фильтра Калмана и линейного фильтра Калмана с подстройкой в связанных координатах;
- формировать стробы в форме эллипса и усеченного сектора и оценивать положение отметки от цели относительно границ стробов;
- отображать исходную траекторию цели, наблюдения, полученные от имитируемой РЛС, и результаты обработки радиолокационной информации;

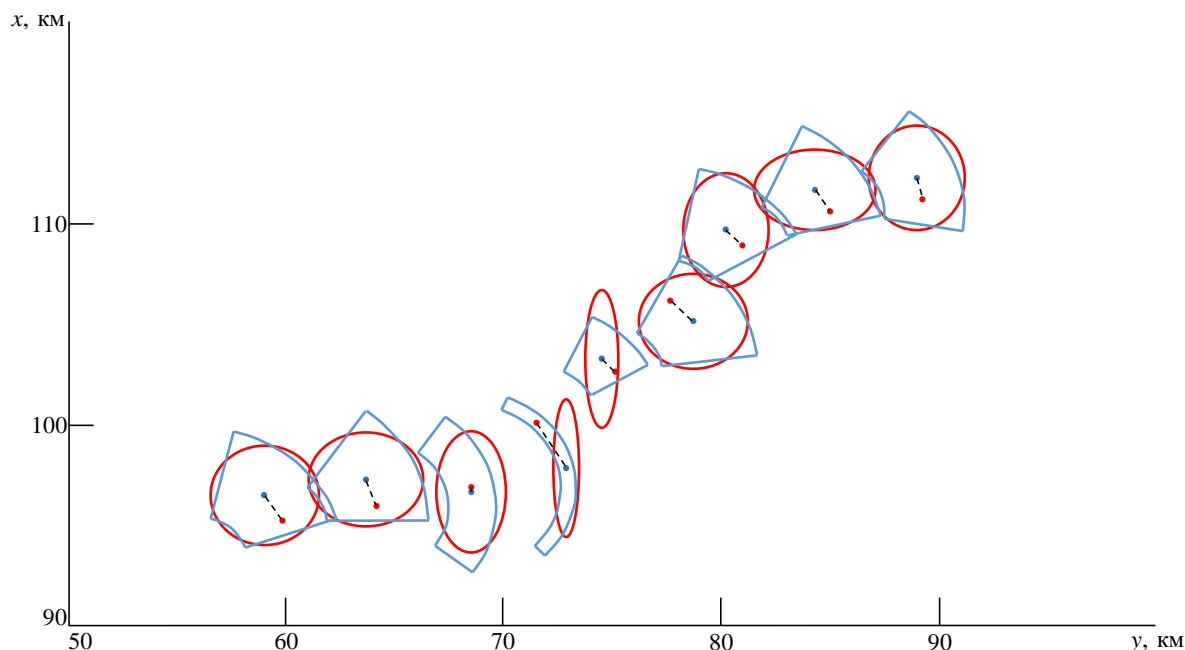


Рис 4. Положение и внешний вид стробов при маневре цели.
Голубыми линиями ограничены стробы ПАС, красными – стробы ИАС.
Синие маркеры – центры стробов; красные маркеры – отметки от цели

Fig. 4. Position and shape of strobes for maneuvering target.
Blue lines limit the strobes of the proposed algorithm; red lines limit the strobes of the known algorithm.
Blue markers is the strobes centers; red markers is the position of the target

– отображать зависимости среднего времени сопровождения от размеров строба для ИАС и ПАС.

Дополнительно для визуализации полученных результатов в среде Qt Creator на языке C++ с использованием алгоритмов из модели, реализованной в MATLAB, разработана программа:

– для имитации и графического построения различных траекторий движения воздушных объектов;

– имитации и графического построения наблюдений от РЛС с заданными точностными характеристиками;

– траекторной фильтрации полученных наблюдений и графического построения восстановленных траекторий и прогнозируемых отметок;

– графического построения рассчитанных стробов в форме эллипса и усеченного сектора.

На рис. 4 представлены отметки сопровождаемой цели с различными стробами при $\gamma=3$. Моделирование отметок производилось в декартовых координатах с СКО наблюдений 10 м по каждой координате. РЛС располагалась в начале координат. Цель двигалась курсом 45° с начальной скоростью 300 м/с, ускорением 1 м/с^2 и скоростью изменения курса $3^\circ/\text{с}$. Для выполнения траекторной фильтрации использовался фильтр с

раздельным оцениванием в связанных координатах [15], настроенный на сопровождение объекта, перемещающегося с указанными параметрами движения.

На рис. 4 показано, что объект выполняет маневрирование по курсу и в момент поворота эллиптический строб ИАС теряет отметку от цели. Такой эффект объясняется динамикой движения объекта в момент стробирования.

Для оценки эффективности алгоритмов стробирования в ходе моделирования оценивалось среднее время сопровождения цели до первой потери отметки T_{ac1} для стробов ИАС и ПАС идентичного размера. Оба фильтра настроены на сопровождение цели с указанными ранее параметрами движения.

На рис. 5 представлены результаты, полученные при имитации движения цели с параметрами, совпадающими с настройкой фильтров. При малом размере строба ($\gamma \leq 2$) алгоритмы имеют близкие значения средней продолжительности сопровождения до первой потери отметки от цели. По мере роста значения коэффициента γ , сопровождающегося увеличением размеров стробов, среднее время сопровождения ПАС все больше превышает аналогичный показатель ИАС.

На рис. 6 показаны результаты, полученные

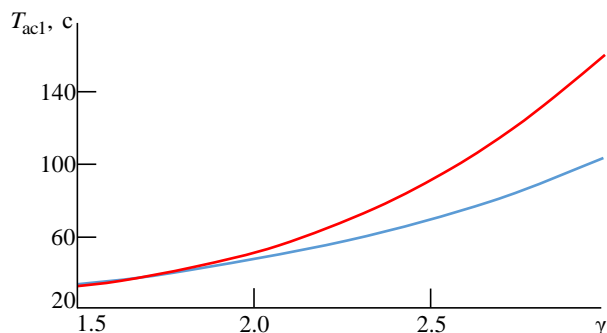


Рис. 5. Зависимость среднего времени сопровождения цели ИАС и ПАС от значения коэффициента γ . Красная линия – ПАС; синяя линия – ИАС

Fig. 5 Dependence of the average object tracking time on the value of the coefficient γ for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

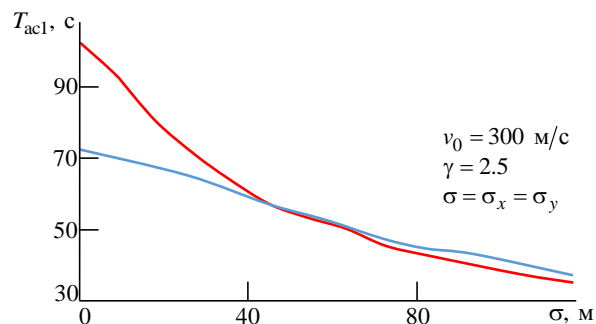


Рис. 6. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от погрешности измерения координат

Fig. 6. Dependence of the average object tracking time on the measurement error of coordinates for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

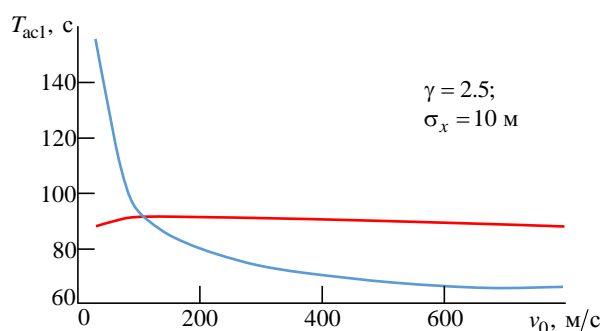


Рис. 7. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от начальной скорости

Fig. 7. Dependence of average object tracking time on initial speed for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

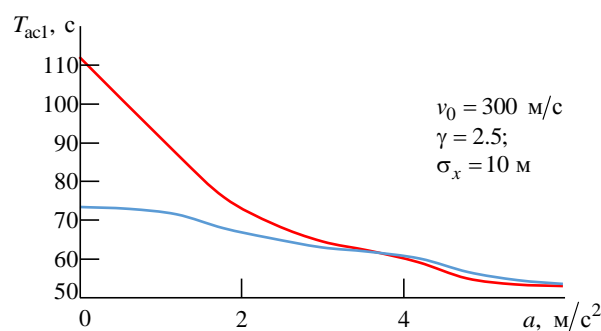


Рис. 8. Зависимость среднего времени сопровождения объекта для ИАС (синяя линия) и ПАС (красная линия) от ускорения

Fig. 8. Dependence of average object tracking time on acceleration for the proposed algorithm (red line) and known algorithm (blue line)

при $\gamma = 2.5$ для движения цели с начальной скоростью 300 м/с при различных значениях погрешности измерения координат (погрешности измерения обеих координат положены равными). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ПАС имеет преимущество при значениях $\sigma_x < 50$ м. При больших значениях погрешности измерения координат оба алгоритма имеют близкое значение среднего времени сопровождения, причем с ростом погрешности это значение снижается.

На рис. 7 представлены графики, полученные при $\gamma = 2.5$ для движения цели с различной начальной скоростью и погрешностью измерения координат 10 м. Видно, что при скорости менее 100 м/с ИАС имеет преимущество, однако с ростом скорости значение среднего времени сопровождения стремится к установившемуся значению. При этом среднее время ПАС практически не зависит от начальной скорости и превосходит (в среднем на 20 с) установившееся значение ИАС.

На рис. 8 представлены зависимости $T_{ac1}(a)$ для движения с различным ускорением, полученные при фиксированном значении начальной скорости $v_0 = 300$ м/с; $\gamma = 2.5$ и $\sigma_x = 10$ м. Из полученных графиков можно сделать вывод, что с ростом динамики движения значение среднего времени сопровождения снижается для обоих алгоритмов, причем ПАС уступает ИАС.

Заключение. Установлено, что для скоростных и высокоманевренных целей ПАС, реализуемый в координатах, связанных с отслеживаемой целью, с построением строга в форме усеченного эллипсоидного сектора, обеспечивает более длительное сопровождение до первой потери отметки от цели, чем ИАС с эллиптическим строгом, реализуемый в не связанных с целью координатах. ИАС имеет преимущество в средней продолжительности времени сопровождения только при наблюдении за низкоскоростными объектами, характер движения которых близок к прямолинейному. Также установлено, что средняя про-

должительность сопровождения для ПАС практически не зависит от начальной скорости движения цели, а при малых погрешностях измерения координат имеет большее значение, чем для ИАС. Такие результаты объясняются тем, что в ПАС осуществляется подстройка размеров и формы строба в зависимости от характера движения: при интенсивном маневрировании сектор-

ный строб вытягивается по курсу, а при прямолинейном движении с ускорением – вытягивается вдоль траектории. В итоге такой строб лучше, чем эллипсоид ИАС, охватывает область наиболее вероятного местоположения цели, что позволяет осуществлять качественное сопровождение объектов в большем диапазоне скоростей.

Список литературы

1. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models // Signal and Data Processing of Small Targets 2000. Orlando, FL, United States, 13 July 2000. (Proc. SPIE. Vol. 4048). doi: 10.1117/12.391979
2. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 2001. 256 p. doi: 10.1002/0471221279
3. Bar-Shalom Y., Willett P. K., Tian X. Tracking and Data Fusion: a Handbook of Algorithms. Storrs: YBS Publishing, 2011. 1236 p.
4. Chui C. K., Chen G. Kalman Filtering with Real-Time Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 240 p.
5. Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта / Э. В. Зябиров, А. В. Аравин, С. В. Михайлов, И. П. Филюшкин // Изв. вузов. Поволжский регион. 2018. № 4 (48). С. 88–95. doi: 10.21685/2072-3059-2018-4-8
6. Афанасьев Б. В., Афанасьев В. В. Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в стробе и выбора радиолокационной метки // Вестн. Гос. ун. морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10, № 3. С. 608–618. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618
7. Беляев А. В., Карташов В. М., Лутуангу Ф. А. Стробирование отметок движущихся объектов в системе обработки изображений со стационарной видеокамерой // Scientific J. ScienceRise. 2017. № 3 (32). С. 66–71. doi: 10.15587/2313-8416.2017.96524
8. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.
9. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.
10. Рязанцев Л. Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестн. ТГТУ. 2009. Т. 15, № 4. С. 729–739.
11. Антропов В. В., Мазиков Е. Б. Алгоритм вторичной обработки информации при траекторном распознавании // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. "Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития", Чебоксары, 11 дек. 2016. Чебоксары: ЦНС "Интерактив плюс", 2016. С. 13–21. doi: 10.21661/r-115874
12. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction. 4th ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 514 p. doi: 10.1002/9780470740156
13. Васильев К. К., Маттис А. В. Связанные стохастические модели движения радиолокационных целей // Автоматизация процессов управления. 2017. № 4 (50). С. 14–18.
14. Васильев К. К., Маттис А. В. Траекторная фильтрация в связанных координатах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 11. С. 11–18
15. Маттис А. В., Саверкин О. В. Эффективность траекторной фильтрации в связанных координатах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 11. С. 19–24. doi: 10.18127/j20700814-201811-04

Информация об авторах

Васильев Константин Константинович – доктор технических наук (1985), профессор (1987) кафедры телекоммуникации Ульяновского государственного технического университета. Автор 508 научных работ. Сфера научных интересов – статистический синтез и анализ информационных систем. Адрес: Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, Ульяновск, 432027, Россия E-mail: vkk@ulstu.ru

Маттис Алексей Валерьевич – кандидат технических наук (2010), главный конструктор ФНПЦ АО «НПО "Марс"». Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – системы автоматического управления. Адрес: 2ФНПЦ АО «НПО "Марс"», ул. Солнечная, д. 20, Ульяновск, 432022, Россия E-mail: mattisav@rambler.ru

Саверкин Олег Владимирович – инженер по специальности "Сети связи и системы коммутации" (2014, Ульяновский государственный технический университет), аспирант кафедры телекоммуникации Уль-

яновского государственного технического университета. Автор 26 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая обработка сигналов.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, Ульяновск, 432027, Россия

E-mail: saverkin-oleg@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6730-0003>

References

1. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models. Signal and Data Processing of Small Targets 2000. Orlando, FL, United States, 13 July 2000. Proc. SPIE, vol. 4048. doi: 10.1117/12.391979
2. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Hoboken, NJ, Wiley & Sons, 2001, 256 p. doi: 10.1002/0471221279
3. Bar-Shalom Y., Willett P. K., Tian X. Tracking and Data Fusion: a Handbook of Algorithms. Storrs, YBS Publishing, 2011, 1236 p.
4. Chui C. K., Chen G. Kalman Filtering with Real-Time Applications. Berlin, Springer-Verlag, 2017, 240 p.
5. Zyabirov E. V., Aravin A. V., Mikhaylov S. V., Filyushkin I. P. The Choice of the Form and Parameters of Strokes at the Identification of Coordinate Information from Air Target Sensors in a Complex of Automation Equipment of a Battery Command Post. University Proceedings. Volga region. Technical sciences. 2018, no. 4 (48), pp. 88–95. doi: 10.21685/2072-3059-2018-4-8 (In Russ.)
6. Afanasev B., Afanasev V. Procedure of Complex Processing Radar Data in Strobe and Selection of Radar Mark. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala s.o. makarova*. 2018, no. 3(49), pp. 608–618. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618 (In Russ.)
7. Belyaev A. V., Kartashov V. M., Lutuangu F. A. Strobing the Moving Objects Marks in the Image Processing Sys-tem with Stationary Video Camera. Science Rise, 2017, no. 1 (32), pp. 66–71. doi: 10.15587/2313-8416.2017.96524 (In Russ.)
8. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radio-lokatsionnoi informatsii v 2 chastyakh* [Basics of Trajectory Processing of Radar Information]. SPb., Publishing house of ETU, 2014, pt. 1, 164 p. (In Russ.)
9. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoi obrabotki radio-lokatsionnoi informatsii v 2 chastyakh* [Basics of trajectory processing of radar information]. SPb., Publishing house of ETU, 2014, pt. 2, 180 p. (In Russ.)
10. Ryazantsev L. B. Multi-Model Bayesian Estimation of Maneuvering Air Target Vector in Discrete Time. Transactions TSTU, 2009, vol.15, no. 4, pp. 729–739. (In Russ.)
11. Antropov V. V., Mazakov E. B. Algorithm of Secondary Information Processing Under a Trajectory Identification. Proc. 3d International Scientific and Practical Conf. Science, Education, Society: Tendencies and Future Development. Cheboksary, 11 December 2016. Cheboksary, SCC "Interaktiv plus", 2016, pp. 13–21. doi: 10.21661/r-115874 (In Russ.)
12. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Fourth Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2008, 514 p.
13. Vasiliev K. K., Mattis A. V. Associated Stochastic Models of Radar Target Movement. Automation of Control Processes. 2017, no. 4 (50), pp. 14–18. (In Russ.)
14. Vasiliev K. K., Mattis A. V. Trajectory Estimation in the Body-Fixed Frame. Journal Information-Measuring and Control Systems. 2018, no. 11, pp. 11–18. (In Russ.)
15. Mattis A.V., Saverkin O.V. Trajectory Estimation in the Body-Fixed Frame. Journal Information-Measuring and Control Systems. 2018, no. 11, pp. 19–24. doi: 10.18127/j20700814-201811-04 (In Russ.)

Information about the authors

Konstantin K. Vasiliev, Dr. Sci. (Eng.) (1985), Professor (1987) of the Department of Telecommunication of Ulyanovsk State Technical University. The author of 508 scientific publications Area of expertise: statistical synthesis and analysis of information systems.

Address: Ulyanovsk State Technical University, 32 Severny Venetz Str., Ulyanovsk 432027, Russia

E-mail: vkv@ulstu.ru

Alexey V. Mattis, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Design manager of FRPC JSC RPA "Mars". The author of 40 scientific publications. Area of expertise: automatic control systems.

Address: FRPC JSC RPA "Mars", 20 Solnechnaya Str., Ulyanovsk 432022, Russia

E-mail: mattisav@rambler.ru

Oleg V. Saverkin, Dipl.-engineer on telecommunication (2014, Ulyanovsk State Technical University), post-graduate student of the Department of Telecommunication of Ulyanovsk State Technical University. The author of 26 scientific publications Area of expertise: statistical processing of signals

Address: Ulyanovsk State Technical University, 32 Severny Venetz Str., Ulyanovsk 432027, Russia

E-mail: saverkin-oleg@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6730-0003>