

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ТРАЕКТОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЕМ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА**А.А. Чугунов, А.Д. Евсеев, С.В. Черных, И.Б. Галуев**
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Данная работа посвящена разработке алгоритма траекторной фильтрации в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. Такие системы используются для скрытого траекторного сопровождения за счет приема собственного радиоизлучения источников на пассивные приемные пункты. В данной работе представлен алгоритм траекторной фильтрации, использующий в качестве дополнительного наблюдения высоту полета источника радиоизлучения в геодезической системе координат. На практике эта информация может быть известна, если источник радиоизлучения использует бортовой ответчик радиолокационного опознавания. В этом случае высота полета может быть декодирована и использована в качестве дополнительного наблюдения. В работе было проведено моделирование для сравнения эффективности предложенного алгоритма со стандартным алгоритмом на основе расширенного фильтра Калмана без использования дополнительных наблюдений. Сравнение алгоритмов проводилось также на экспериментальных данных. Показано, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат (до 2,5 раз), но и увеличить устойчивость отслеживания траектории по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

Ключевые слова: многопозиционная пассивная радиолокация, радиолокация, сглаживающие траектории, расширенный фильтр Калмана, разностно-дальномерный метод.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90

Введение

Многопозиционные радиолокационные системы (МП РЛС) для мониторинга воздушной обстановки имеют дело с определенным классом объектов: с траекториями движения источников радиоизлучения (ИРИ). С точки зрения задачи радиолокации параметры траекторий (координаты, вектор скорости, вектор ускорений) являются случайными процессами. МП РЛС решают задачу траекторного сопровождения ИРИ в режиме реального времени. Задача получения оценок непостоянных во времени параметров траектории ИРИ в моменты поступления соответствующих им наблюдений является задачей фильтрации. [1–5].

В радиолокации распространен подход к траекторной фильтрации, основанный на сглаживании одномоментных оценок координат ИРИ, полученных с помощью одношаговых алгоритмов [4–8]. Преимуществом такого подхода является линейность модели наблюдения, благодаря чему решением может выступать линейный фильтр Калмана или α , α - β , α - β - γ -фильтры. Однако в такой постановке необходимо учитывать нестационарность шума наблюдения, а также взаимную корреляцию элементов вектора состояния. Нестационарность шума наблюдения обусловлена тем, что в процессе движения ИРИ находится в областях с различными значениями геометрического фактора (ГФ), и если дисперсия шумов наблюдения первичных данных постоянна, то матрица дисперсий вторичных

наблюдений (координат) непостоянна. Кроме того, в МП РЛС не для всех поступающих на вход вторичной обработки отметок возможен одномоментный расчет координат (неполные отметки), что ограничивает использование данного подхода, поскольку его использование приводит к потере части входных наблюдений [2].

Таким образом, в МП РЛС целесообразно применять алгоритмы траекторной фильтрации, для которых входными наблюдениями выступают первичные радиолокационные параметры (значения времен приема, разностей времен приема радиосигналов ИРИ на ПП), а выходными данными – параметры траекторий (координаты, векторы скорости и ускорений) в ТЦСК. Поскольку первичные радиолокационные параметры связаны с вектором состояния нелинейно, постановка задачи траекторной фильтрации в МП РЛС является принципиально нелинейной.

Известно, что априорная информация о высоте полета ИРИ самолетного типа позволяет повысить точность определения двумерных координат ИРИ при использовании ее в алгоритмах вторичной обработки. На практике высота полета ИРИ может быть априори известна с определенной точностью. Одним из основных наблюдаемых источников для МП РЛС являются бортовые ответчики системы радиолокационного опознавания (РЛО) [9–10]. При работе по сигналам в режиме А/С высота полета может быть получена путем декодирования соответствующих сигналов бортового ответчика. При работе с другими ИРИ априорная высота полета может быть определена из перечня характерных высот полета, соответствующих конкретному ИРИ, распознанному по соответствующим радиосигналам.

Большую часть времени полета ИРИ самолетного типа (за исключением взлета, посадки, смены эшелона) совершают полет на постоянной высоте над уровнем моря h . При определении параметров траектории ИРИ в ТЦСК координата z в данном случае не является постоянной за счет влияния кривизны земной поверхности (рис. 1).

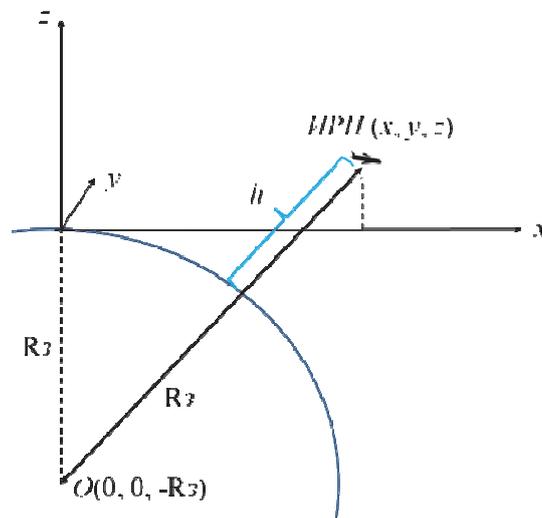


Рис. 1 – Связь высоты полета ИРИ h в геодезической системе координат и высоты ИРИ в топоцентрической системе координат z

Fig. 1 – Relationship between the flight height RRS h in the geodetic coordinate system and the height RRS in the topocentric coordinate system z

Пусть $\mathbf{x} = (x \ y \ z)^T$ – координаты ИРИ, $\mathbf{O} = (0 \ 0 \ -R_3)^T$ – координаты центра Земли в топоцентрической системе координат, R_3 – радиус Земли. Очевидно, что

$$x^2 + y^2 + (z + R_3)^2 = (R_3 + h)^2; \quad (1)$$

$$z(x, y, h) = -R_3 + \sqrt{(R_3 + h)^2 - (x^2 + y^2)}; \quad (2)$$

$$h(x, y, z) = -R_3 + \sqrt{(R_3 + z)^2 + (x^2 + y^2)}. \quad (3)$$

Выражения (2)–(3) описывают связь h и z . Для описания модели земной поверхности применяется понятие референц-эллипсоида, и в этом случае радиус Земли не является постоянной величиной со средним значением 6371 км, экваториальным значением 6378 км и полярным значением 6356,8 км. Дальность действия МП РЛС составляет несколько сотен километров, поэтому принимается сделанное выше допущение (1) о сферической модели Земли в зоне действия МП РЛС с известным радиусом R_3 .

Целью данной работы является разработка алгоритма фильтрации траектории ИРИ на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана с дополнительным наблюдением высоты полета в геодезической системе координат.

1. Постановка задачи

Известны координаты четырех приемных пунктов (ПП) в топоцентрической декартовой системе координат $\mathbf{x}_i^{\text{ПП}} = \{x_i^{\text{ПП}} \ y_i^{\text{ПП}} \ z_i^{\text{ПП}}\}^T$, $i = 1 \dots 4$. Вектор состояния ИРИ включает в себя трехмерные координаты, вектор скорости и вектор ускорения

$$\boldsymbol{\alpha} = [x \ v_x \ a_x \ y \ v_y \ a_y \ z \ v_z \ a_z]^T. \quad (4)$$

Модель динамики вектора состояния полагается линейной

$$\boldsymbol{\alpha}_k = \mathbf{F}_k \boldsymbol{\alpha}_{k-1} + \mathbf{G}_k \boldsymbol{\xi}_{k-1}, \quad k = 1 \dots M-1, \quad \boldsymbol{\alpha}(T_0^{\text{изл}}) = \boldsymbol{\alpha}_0; \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & T_k & T_k^2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & T_k^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k & T_k^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ T_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где ξ_{k-1} – вектор дискретных белых гауссовских формирующих шумов (ДБГШ) с матрицей дисперсий $\mathbf{D}\xi$; $T_k = t_k - t_{k-1}$ – разница между двумя соседними моментами наблюдений.

Наблюдениями являются отметки, которые представляют собой совокупность времен приема радиосигнала ИРИ всеми ПП. Для k -й отметки

$$\theta_k = \mathbf{s}_k(\alpha_k) + \mathbf{n}_k \quad (7)$$

известно время частотно-пространственного строба $t_k^{\text{строб}}$, в который попала данная отметка. Это абсолютное время в шкале времени МП РЛС. В (7) \mathbf{n}_k – вектор ДБГШ наблюдений. Функция связи вектора состояния с наблюдениями записывается следующим образом:

$$S_k^i = \frac{1}{c} \left\| q\alpha_k - \mathbf{x}_i^{\text{ПП}} \right\| + T_k^{\text{изл}}, \quad (8)$$

где

$$q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

c – скорость света; $T_k^{\text{изл}}$ – время излучения k -го радиоимпульса в шкале времени МП РЛС, соответствующего k -й отметке; α_k – вектор состояния ИРИ в момент $T_k^{\text{изл}}$.

Особенностью синтеза алгоритма траекторной фильтрации в МП РЛС является непостоянный период поступления отметок. Пассивный характер работы системы приводит к зависимости темпа обновления вектора состояния от режима излучения бортовой аппаратуры ИРИ. Для сигналов типа РЛО темп определяется периодом обзора и количеством наземных запросчиков.

Непостоянство периода поступления отметок накладывает определенные ограничения и на использование модели наблюдения (8). Параметр $T_k^{\text{изл}}$, входящий в модель, неизвестен и также подлежит оценке и включению в вектор состояния. Однако фильтрация этого параметра в текущей постановке нереализуема из-за невозможности экстраполяции следующего момента излучения. В связи с этим используется разностно-дальномерный метод (РДМ) определения координат с формированием косвенных наблюдений $\tilde{\theta}$ – разностей времен приема и исключением неизвестного параметра $T_k^{\text{изл}}$ из вектора состояния:

$$\tilde{\theta}_k = \mathbf{H}\theta_k, \quad (10)$$

где матрица \mathbf{H} задает правило формирования косвенных наблюдений. Данная матрица имеет вид

$$\mathbf{H}_4 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = (-1 \ 1) \quad (11)$$

для отметок, содержащих соответственно четыре, три и два принятых радиоимпульса. Отметки, для которых прием радиоимпульсов ИРИ произошел не на всех ПП, будем называть неполными отметками, в противном случае – полными.

Кроме того, в модели наблюдения (8) значения времен приема на ПП рассчитываются исходя из положения источника в точке с координатами $q\alpha_k$ в момент $T_k^{\text{изл}}$, на шкале времени МП РЛС. Поскольку этот момент предполагается неизвестным, принимается допущение о том, что координаты ИРИ $q\alpha_k$ соответствуют моменту $t_k^{\text{строб}}$, который известен. Это допущение основано на том, что длительность сканирования частотного пространства $T_{\text{строб}}$ настолько мала, что изменение вектора состояния на данном интервале времени незначительно. На практике длительность одного частотно-пространственного строба составляет 10...50 мс. Для ИРИ, движущегося со скоростью 200 м/с, координаты за время строба изменятся не более чем на 10 м. При среднеквадратичной погрешности первичных наблюдений 10 нс (3 м) и типичном значении ГФ в дальней зоне (десятки-сотни) погрешность координат, обусловленная предложенным допущением, значительно меньше погрешности оценки координат.

В таком случае модель динамики вектора состояния (5)–(6) целесообразно описывать во временной шкале МП РЛС в привязке к временам частотно-пространственных стробов, тогда $T_k = t_k^{\text{строб}} - t_{k-1}^{\text{строб}}$.

В модель наблюдений помимо времен приема (8) включается также высота полета ИРИ в геодезической системе координат. Тогда векторная функция наблюдений примет следующий вид:

$$\mathbf{S}_k(\alpha_k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} \|q\alpha_k - \mathbf{x}_1^{\text{ПП}}\| + T_k^{\text{изл}} \\ \vdots \\ \frac{1}{c} \|q\alpha_k - \mathbf{x}_N^{\text{ПП}}\| + T_k^{\text{изл}} \\ -R_3 + \sqrt{(R_3 + z)^2 + (x^2 + y^2)} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где N – число принятых радиоимпульсов в отметке. Матрица дисперсий шумов наблюдений \mathbf{n}_k

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где σ_n^2 – дисперсия наблюдений времен приема ИРИ на ПП; σ_h^2 – дисперсия наблюдений высоты.

По аналогии с (11) выражения для матриц формирования косвенных наблюдений будут иметь вид:

$$\mathbf{H}_4 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Требуется разработать алгоритм фильтрации вектора состояния $\hat{\alpha}_k$ с учетом модели наблюдения (7), (10), (12)–(14) и модели динамики вектора состояния (5)–(6).

2. Разработка алгоритма

Выражения для алгоритма расширенного фильтра Калмана в данной постановке задачи имеют следующий вид.

1. Экстраполяция вектора состояния и матрицы дисперсий ошибок фильтрации:

$$\tilde{\alpha}_k = \mathbf{F}_k \hat{\alpha}_{k-1}; \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{\alpha,k} = \mathbf{F}_k \mathbf{D}_{\alpha,k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G}_k \mathbf{D}_{\xi,k-1} \mathbf{G}_k^T, \quad (16)$$

2. Расчет коэффициентов фильтрации:

$$\mathbf{K}_k = \tilde{\mathbf{D}}_{\alpha,k} \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\alpha}_k)}{d\alpha} \right)^T \times \\ \times \mathbf{H}_k^T \left(\mathbf{H}_k \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\alpha}_k)}{d\alpha} \right) \tilde{\mathbf{D}}_{\alpha,k} \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\alpha}_k)}{d\alpha} \right)^T \mathbf{H}_k^T + \mathbf{H}_k \mathbf{D}_n \mathbf{H}_k^T \right)^{-1}. \quad (17)$$

3. Коррекция вектора состояния и матрицы дисперсий ошибок фильтрации:

$$\mathbf{D}_{\alpha,k} = \tilde{\mathbf{D}}_{\alpha,k} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \left(\frac{d\mathbf{S}_k(\tilde{\alpha}_k)}{d\alpha} \right) \tilde{\mathbf{D}}_{\alpha,k}; \quad (18)$$

$$\hat{\alpha}_k = \tilde{\alpha}_k - \mathbf{K}_k (\mathbf{H}_k \theta_k - \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k(\tilde{\alpha}_k)). \quad (19)$$

При этом

$$\frac{d\mathbf{S}_i(\alpha)}{d\alpha} = [s_{i,1}(\alpha) \ 0 \ 0 \ s_{i,4}(\alpha) \ 0 \ 0 \ s_{i,7}(\alpha) \ 0 \ 0], \quad i=1\dots N, \quad (20)$$

где для $i=1\dots N$ выражения для $s_{i,1}(\alpha)$, $s_{i,4}(\alpha)$, $s_{i,7}(\alpha)$

$$s_{i,1}(\alpha) = \frac{1}{c} \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i^{\text{III}})^2 + (y - y_i^{\text{III}})^2 + (z - z_i^{\text{III}})^2}}; \quad (21)$$

$$s_{i,4}(\alpha) = \frac{1}{c} \frac{y - y_i}{\sqrt{(x - x_i^{\text{III}})^2 + (y - y_i^{\text{III}})^2 + (z - z_i^{\text{III}})^2}}; \quad (22)$$

$$s_{i,7}(\alpha) = \frac{1}{c} \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i^{\text{III}})^2 + (y - y_i^{\text{III}})^2 + (z - z_i^{\text{III}})^2}} \quad (23)$$

для $i=1\dots N$

$$s_{N+1,1}^h(\alpha) = \frac{x}{\sqrt{(R_3 + z)^2 + (x^2 + y^2)}}; \quad (24)$$

$$s_{N+1,4}^h(\alpha) = \frac{y}{\sqrt{(R_3 + z)^2 + (x^2 + y^2)}}; \quad (25)$$

$$s_{N+1,7}^h(\alpha) = \frac{z}{\sqrt{(R_3 + z)^2 + (x^2 + y^2)}}. \quad (26)$$

Выражения (15)–(26) описывают алгоритм фильтрации траектории в МП РЛС с учетом дополнительного наблюдения – высоты полета ИРИ в геодезической системе координат.

3. Моделирование и эксперимент

Для проверки работоспособности и оценки эффективности алгоритма с использованием априорной информации о геодезической высоте ИРИ разработанные алгоритмы были реализованы в Matlab. Алгоритмы позволяют оценить вектор состояния ИРИ α на основе наблюдений времен приема θ . Далее алгоритм траекторной фильтрации с разностно-дальномерной моделью наблюдений без дополнительного наблюдения геодезической высоты обозначим как РДФ, а алгоритм фильтрации с дополнительным наблюдением геодезической высоты – РДФВ.

Рассмотрим конфигурацию МП РЛС, состоящей из четырех ПП. Расстояние между боковыми ПП и центральным ПП составляет $R = 10$ км. Высота всех ПП – $h = 15$ м. Азимутальные направления на ПП 1, 2, 3 равны 30, 150 и 270° соответственно.

Траектория движения ИРИ, показанная на рис. 2, и соответствующие ей наблюдения МП РЛС моделировались в соответствии с моделью наблюдений, определенной в разделе 2. Для алгоритма РДФВ дополнительно моделируются наблюдения высоты. Траектория ИРИ включает несколько маневров, а также два участка прямолинейного равномерного движения: полет к МП РЛС с азимутального направления, для которого характерно низкое значение ГФ, и полет от МП РЛС в азимутальном направлении, для которого характерно высокое значение ГФ. Параметры моделирования: интервал наблюдения – 1900 с, постоянный период излучения ИРИ – 1 с, длительность частотно-пространственного строга – 12 мс, среднеквадратическое отклонение шума наблюдения – 10 нс.

Для обоих алгоритмов параметр σ_{ξ} принят равным 0,1 м/с³. Для алгоритма РДФВ параметр σ_h варьируется.

Для сравнения алгоритмов РДФ и РДФВ в качестве критерия эффективности используется радиальная квадратичная погрешность DRMS (Distance root mean square) – общая характеристика, применяемая при оценке точности двумерных навигационных определений [11], называемая также погрешностью в плане. С точки зрения физического смысла она представляет собой радиус круга, за пределы которого мгновенная погрешность не выходит с вероятностью 68,3% [12]. Эта характеристика вычисляется как $DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$, где σ_x^2 , σ_y^2 – дисперсии погрешностей по осям x и y соответственно.

Алгоритм расширенного фильтра Калмана на каждом шаге формирует оценку матрицы дисперсий ошибок фильтрации \mathbf{D}_{α} . Определим оценку DRMS, формируемую фильтром как

$$DRMS_k = \sqrt{\mathbf{D}_{\alpha,k}^{1,1} + \mathbf{D}_{\alpha,k}^{4,4}}. \quad (27)$$

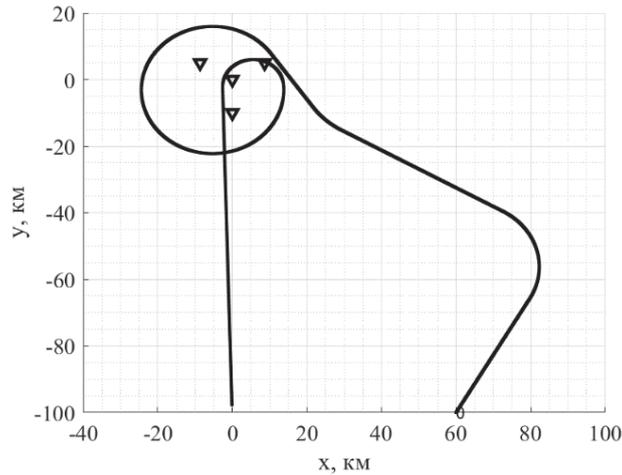


Рис. 2 – Моделируемая траектория движения ИРИ и положение ПП

Fig. 2 – Simulated RRS trajectory and RS positions

На рис. 3 показаны реализации DRMS и выигрыш для алгоритма РДФВ при различных значениях σ_h по сравнению с РДФ. Выигрыш для такта k вычисляется как $DRMS_{РДФ} / DRMS_{РДФВ}$.

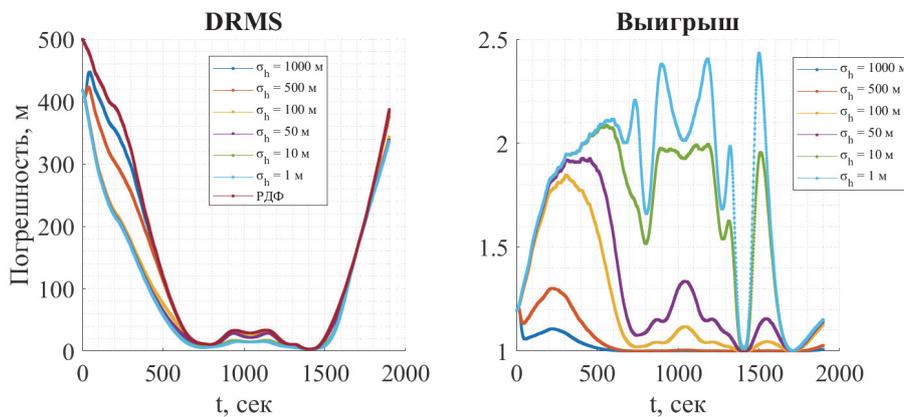


Рис. 3 – Реализации DRMS для алгоритма РДФВ с различными значениями σ_h и алгоритма РДФ

Fig. 3 – DRMS implementations for the RDFV algorithm with different values of σ_h and the RDF algorithm

Видно, что использование дополнительных наблюдений геодезической высоты полета ИРИ приводит к повышению точности определения двумерных координат, особенно в районе с низким значением ГФ.

Анализ рис. 3 показывает, что использование дополнительной информации о высоте полета ИРИ обеспечивает выигрыш в точности определения двумерных координат ИРИ в 1,5–2,5 раза. Дополнительные наблюдения высоты полета ИРИ в геодезической системе координат со среднеквадратичным значением порядка

сотен-тысяч метров не дают существенного выигрыша. Низкое отличие в показателях на начальном интервале фильтрации обусловлено переходом фильтров в установившийся режим работы.

Проведен анализ эффективности используемого подхода на реальных данных натурального эксперимента, проведенного на действующей МП РЛС. При проведении эксперимента ИРИ имел на борту ГНСС приемник, координаты с которого приняты за опорную траекторию, используемую для оценки точности определения координат. Изучаемый ИРИ работал с бортовым ответчиком РЛО, что позволяло извлекать из сигнальных данных информацию о геодезической высоте полета.

На рис. 4 показана реализация геодезической высоты полета, взятой из данных ГНСС приемника, и высоты, декодированной из сигналов РЛО. Видно, что они совпадают с определенной точностью.

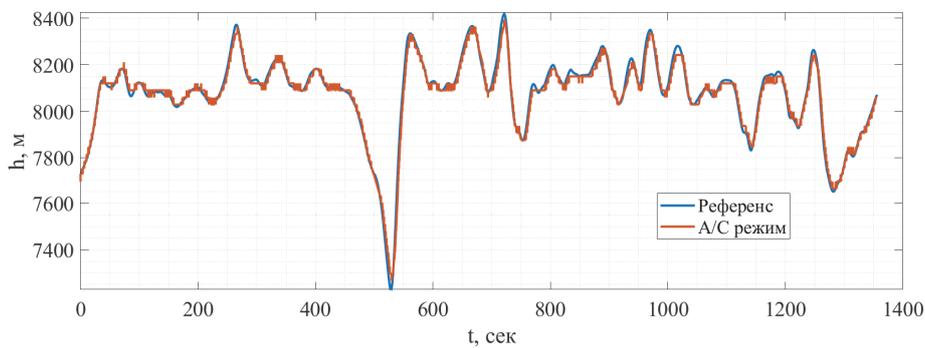


Рис. 4 – Сравнение высот полета ИРИ по опорным данным и декодированных из режима A/C сигналов

Fig. 4 – Comparison of RRS flight altitudes from reference track and decoded from A/C mode signals

На рис. 5 показана доля полных меток на определенном временном интервале. За весь интервал наблюдения процент полных отметок не превышал 40 %, а начиная с 400-й секунды полных отметок практически не было.

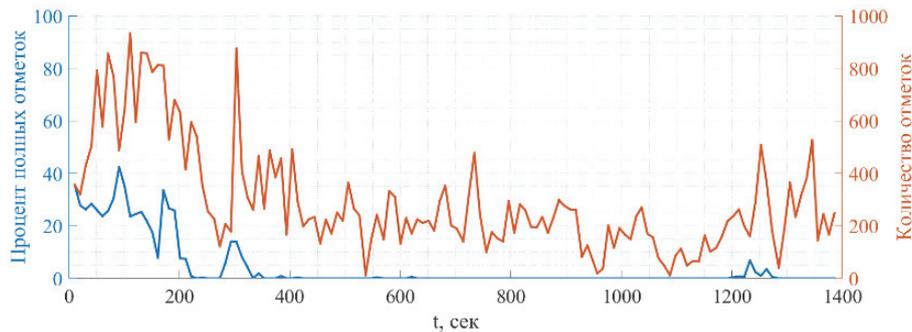


Рис. 5 – Процентное соотношение полных отметок

Fig. 5 – Complete marks percentage

На рис. 6 показана опорная траектория ИРИ в плане относительно ПП (черная линия). Расположение ПП показано черными треугольниками. На левом рисунке показан результат оценки траектории, полученный с помощью алгоритма РДФ (красная линия). На правом рисунке показан результат оценки траектории, полу-

ченный с помощью алгоритма РДФВ с параметром $\sigma_h = 100$ (синяя линия). Для обоих алгоритмов параметр σ_ξ установлен равным $0,1 \text{ м/с}^3$

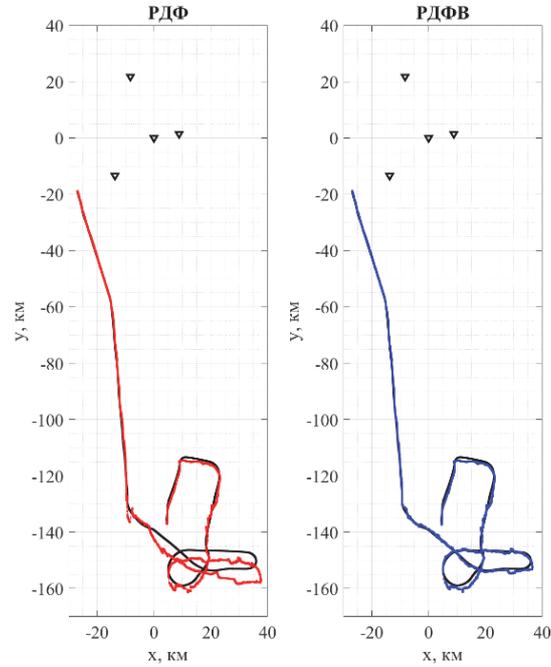


Рис. 6 – Сравнение оценок реальной траектории

Fig. 6 – Real trajectory estimation comparison

На рис. 7 представлены реализации радиальных погрешностей для оценок, полученных по алгоритмам РДФ и РДФВ. Радиальные погрешности рассчитываются по формуле

$$d_k = \sqrt{(x_k - x_k^{\text{ист}})^2 + (y_k - y_k^{\text{ист}})^2}. \quad (28)$$

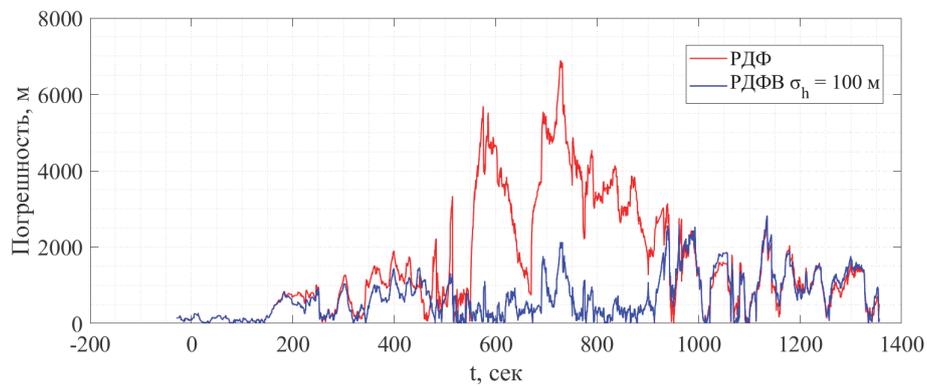


Рис. 7 – Радиальная погрешность оценки координат ИРИ для алгоритмов РДФ и РДФВ

Fig. 7 – Radial error of RRS coordinate estimation for algorithms RDF and RDFV

Видно, что при использовании алгоритма РДФВ наблюдается значительный выигрыш в точности определения координат ИРИ, особенно при отсутствии полных отметок.

Анализ данных, полученных в результате моделирования и эксперимента, позволяет сделать вывод о том, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат ИРИ в МП РЛС, но и увеличить устойчивость отслеживания траектории в условиях наличия неполных отметок по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

Заключение

Данная работа посвящена разработке алгоритма траекторной фильтрации в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. Особенностью таких систем является нахождение источников радиоизлучения в областях с высоким значением ГФ, что приводит к резкому ухудшению точности оценки координат. Другим негативным фактором является наличие в наблюдениях неполных отметок, что может привести к сбою слежения и резкому ухудшению точности определения координат источников радиоизлучения. В данной работе представлен алгоритм, использующий в качестве дополнительного наблюдения высоту полета в геодезической системе координат. На практике эта информация может быть известна, если источник радиоизлучения использует бортовой ответчик системы радиолокационного опознавания. В этом случае высота полета может быть декодирована и использована в качестве дополнительного наблюдения. В данной работе было проведено моделирование для сравнения эффективности предложенного алгоритма со стандартным алгоритмом на основе расширенного фильтра Калмана без использования дополнительных наблюдений. Сравнение алгоритмов проводилось также на экспериментальных данных. Показано, что использование априорной информации о геодезической высоте полета в качестве дополнительных наблюдений алгоритма позволяет не только повысить точность оценки двумерных координат (до 2,5 раз), но и увеличить устойчивость отслеживания траектории по сравнению с алгоритмом, не учитывающим эту информацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черняк В.С.** Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
2. Estimation of the parameters of the trajectories of radio sources in multi-position complexes by the MLE method / A.A. Chugunov, S.A. Serov, R.S. Kulikov, V.B. Pudlovskiy, N.I. Petukhov // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731473.
3. Nonlinear approximation algorithm for object trajectory estimation in MLAT systems / A.A. Chugunov, N.I. Petukhov, R.S. Kulikov, T.A. Brovko, A.P. Malyshev, O.V. Glukhov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2022. – P. 172–176.
4. Измерение координат источников радиоизлучения многопозиционной пассивной разностно-дальномерной системой произвольной конфигурации / Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, А.А. Саликов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10 (5). – С. 114–119.
5. **Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П.** Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. – 84 с.
6. **Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А.** Особенности фильтрации координат и параметров движения объекта на этапе совершения установившегося разворота // Доклады БГУИР. – 2013. – № 4 (74). – С. 67–73.

7. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Фильтрация полиномиальных траекторий маневрирующих целей с использованием конечной выборки оценок дальности и радиальной скорости // Доклады БГУИР. – 2016. – № 6 (100). – С. 47–54.
8. Васильев К.К., Лучков Н.В. Траекторная обработка на основе нелинейной фильтрации // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 1 (47). – С. 4–9.
9. STANAG 4193 Ed 3 P1. Technical Characteristics of the IFF Mk XIIA System. Part I: System Description and General Characteristics.
10. Annex 10. Aeronautical Telecommunications. Vol. 4. Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems. – 5th ed. – ICAO, 2014.
11. GPS Position Accuracy Measures. APN-029 Rev. 1. – NovAtel Customer Service, 2003. – P. 1–6.
12. Гарматенко И.С. Международные стандарты оценки точности навигационной информации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – Т. 6 (8). – С. 863–866.

TRAJECTORY FILTERING ALGORITHM IN MULTI-POSITION PASSIVE RADARS WITH ADDITIONAL FLIGHT ALTITUDE OBSERVATION

Chugunov A.A., Evseev A.D., Chernyh S.V., Galuev I.B.

National Research University MPEI, Moscow, Russia

This work is devoted to developing an algorithm for trajectory filtering in multi-position passive radar systems. This paper presents an algorithm that uses the flight altitude in the geodetic coordinate system as an additional observation. In practice, this information can be known if the radio radiation source uses an onboard IFF responder in A/C mode. In this case, the flight altitude can be decoded and used as an additional observation. In this paper, a simulation was performed to compare the effectiveness of the proposed algorithm with the standard one based on the Extended Kalman filter without using additional observation. Comparison of the algorithms was also carried out on experimental data. It is shown that the use of a priori information about the geodetic altitude of the flight as additional observations of the algorithm allows not only to increase the accuracy of two-dimensional coordinate estimation (up to 2.5 times), but also to increase the stability of trajectory tracking in comparison with the algorithm that does not take this information into account.

Keywords: multiposition passive radar, radiolocation, trajectory smoothing, Extended Kalman Filter, time difference of arrival.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90

REFERENCES

1. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multiposition radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 416 p.
2. Chugunov A.A., Serov S.A., Kulikov R.S., Pudlovskiy V.B., Petukhov N.I. Estimation of the parameters of the trajectories of radio sources in multi-position complexes by the MLE method. *2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731473.
3. Chugunov A.A., Petukhov N.I., Kulikov R.S., Brovko T.A., Malyshev A.P., Glukhov O.V. Nonlinear approximation algorithm for object trajectory estimation in MLAT systems. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. IEEE, 2022, pp. 172–176.
4. Matveev B.V., Dubykin V.P., Kryukov D.Yu., Kuryan Yu.S., Salikov A.A. Izmerenie koordinat istochnikov radioizlucheniya mnogopozitsionnoi passivnoi raznostno-dal'nomernoi sistemoi proizvol'noi konfiguratsii [Measurement of coordinates of the radio source multiposition passive difference-range system of any configuration]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10 (5), pp. 114–119.

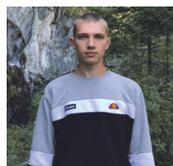
5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokatsionnoi informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Radar information processing in radio engineering systems]. Tambov, TSTU Publ., 2016. 84 p.
6. Solonar A.S., Khmarski P.A., Mikhalkovski A.A. Osobennosti fil'tratsii koordinat i parametrov dvizheniya ob"ekta na etape soversheniya ustanovivshegosya razvorota [Features of filtering using coordinated turn models]. *Doklady BGUIR*, 2013, no. 4 (74), pp. 67–73. (In Russian).
7. Gorshkov S.A., Zavizhenets V.N. Fil'tratsiya polinomial'nykh traektorii manevriruyushchikh tselei s ispol'zovaniem konechnoi vyborke otsenok dal'nosti i radial'noi skorosti [Polynomial trajectories filtering of maneuvering targets with final estimation usage of range and range rate]. *Doklady BGUIR*, 2016, no. 6 (100), pp. 47–54. (In Russian).
8. Vasiliev K.K., Luchkov N.V. Traektornaya obrabotka na osnove nelineinoy fil'tratsii [Trajectory processing on the basis of nonlinear filtering]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of Control Processes*, 2017, no. 1 (47), pp. 4–9.
9. STANAG 4193 Ed 3 P1. Technical Characteristics of the IFF Mk XIII System. Part I: System Description and General Characteristics.
10. Annex 10. *Aeronautical Telecommunications*. Vol. 4. *Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems*. 5th ed. ICAO, 2014.
11. *GPS Position Accuracy Measures*. APN-029 Rev. 1. NovAtel Customer Service, 2003, pp. 1–6.
12. Garmatenko I.S. Mezhdunarodnye standarty otsenki tochnosti navigatsionnoi informatsii [International standards of the assessment of accuracy of navigation information]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2013, vol. 6 (8), pp. 863–866.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чугунов Александр Андреевич – родился в 1995 году, инженер I категории, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 59 научных работ. (Адрес: 143903, Россия, г. Балашиха, ул. Комсомольская, д. 8. E-mail: san4es_95@mail.ru).

Chugunov Alexander Andreevich (b. 1995) – engineer, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 59 scientific papers. (Address: 8, Komsomolskaya Street, Balashikha, 143903, Russia. E-mail: san4es_95@mail.ru).



Евсеев Артем Денисович – родился в 2002 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 142507, Россия, г. Павловский Посад, ул. Кузьмина, д. 32а. Email: yevseevad@mpei.ru).

Evseev Artyom Denisovich (b. 2002) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 6 scientific papers. (Address: 32A, Kuzmina Street, Pavlovskiy Posad, 142507, Russia. E-mail: yevseevad@mpei.ru).



Черных Сергей Владимирович – родился в 2001 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. Опубликовано 9 научных работ. (Адрес: 109428, Россия, г. Москва, ул. Михайлова, д. 41. E-mail: ChernykhSVI@mpei.ru).

Chernykh Sergey Vladimirovich (b. 2001) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. He is author of 9 scientific papers. (Address: 41, Mikhailova Street, Moscow, 109428, Russia. E-mail: ChernykhSVI@mpei.ru).



Галуев Игорь Борисович – родился в 2001 году, лаборант, кафедра радиотехнических систем, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация. (Адрес: 143912, Россия, г. Балашиха, ул. Первомайская, д. 6. E-mail: GaluevIB@mpei.ru).

Galuev Igor Borisovich (b. 2001) – laboratory assistant, Radiosystems Department, NRU MPEI. His research interests are currently focused on radiolocation and radionavigation. (Address: 6, Pervomayskaya Street, Balashikha, 143912, Russia. E-mail: GaluevIB@mpei.ru).

*Статья поступила 28 августа 2023 г.
Received August 28, 2023*

To Reference:

Chugunov A.A., Evseev A.D., Chernyh S.V., Galuev I.B. Algoritm traektornoi fil'tratsii istochnikov radioizlucheniya v mnogopozitsionnykh passivnykh radiolokatsionnykh sistemakh s dopolnitel'nym nablyudeniem vysoty poleta [Trajectory filtering algorithm in multi-position passive radars with additional flight altitude observation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 77–90. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-77-90.