



УДК 621.396.67  
ГРНТИ 78.25.41

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАССОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

*В.Г. ПОПОВ, кандидат физико-математических наук*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*С.Н. РАЗИНЬКОВ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Е.А. РЕШЕТНЯК, кандидат технических наук*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

На основе калмановской фильтрации разработаны алгоритмы и проведен анализ эффективности трассового сопровождения маневрирующих воздушных источников радиоизлучений по результатам пеленгования их сигналов. Исследовано влияние добавочного шумового ускорения на величины среднеквадратических ошибок оценивания параметров трасс.

*Ключевые слова:* фильтр Калмана, трассовое сопровождение объектов, оценки параметров трасс, добавочное шумовое ускорение.

## ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF ROUTE MAINTENANCE OF MANEUVERING AIR SOURCES OF RADIO EMISSIONS

*V.G. POPOV, Candidate of Physico-mathematical sciences*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*S.N. RAZIN'KOV, Doctor of Physico-mathematical sciences, Senior researcher*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*E.A. RESHETNYAK, Candidate of Technical sciences*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

On the basis of Kallman's filtration algorithms are developed and the analysis of efficiency of route maintenance of the maneuvering air sources of radio emissions by results of a direction finding of their signals is carried out. The impact of additional noise acceleration on sizes of mean square errors of estimation of parameters of routes is investigated.

*Keywords:* Kallman's filter, route maintenance of objects, assessment of parameters of routes, additional noise acceleration.

**Введение.** Трассовое сопровождение объектов по излучениям входящих в их состав радиоэлектронных средств является одной из ключевых задач мониторинга обстановки и контроля воздушного пространства [1]. Данные о местоположении, инвариантные к изменениям фоновой контрастности демаскирующих признаков контролируемой цели, являются основой для распознавания и анализа ее динамических состояний в условиях применения мер маскировки и снижения заметности [2, 3].

Для трассового сопровождения воздушных источников радиоизлучений (ИРИ) выполняются процедуры фильтрации параметров трасс, входного контроля и сопровождения по результатам измерения координат, их экстраполированных и сглаженных значений и составляющих скорости движения [2].

При прямолинейном равномерном движении объектов фильтрация параметров трасс может осуществляться с применением фильтра Калмана [4], являющимся рекуррентным линей-



ным фильтром, оптимальным по минимуму среднеквадратических ошибок (СКО) выполняемых оценок [2, 3]. Вместе с тем, при наличии маневров движения рекуррентная фильтрация приводит к накоплению ошибок оцениваемых параметров, приводящих к существенному отклонению траектории движения от истинного положения и затрудняющих сопровождение ИРИ.

В предлагаемой работе с использованием калмановской фильтрации [2, 4] построены алгоритмы сопровождения маневрирующих воздушных ИРИ, базирующиеся на идентификации маневра путем сопоставления значений измеренных и отфильтрованных координат и учитывающие влияние добавочного шумового ускорения на СКО оценки параметров трасс.

Цель работы – анализ влияния добавочного шумового ускорения на СКО оценки параметров трасс маневрирующих воздушных ИРИ.

**Трассовое сопровождение маневрирующих объектов с учетом шумового ускорения.** Будем полагать, что оценивание параметров трасс движущихся объектов выполняется независимо по координатам  $x$  и  $y$ , что эквивалентно вычислениям в одномерном пространстве. Траектории движения контролируемых излучателей содержат прямолинейные участки, на которых перемещение осуществляется с неизменной скоростью  $V$ , и повороты (развороты) при сохранении энергетической доступности пеленгуемых сигналов в каждой точке маршрута.

В качестве показателя эффективности трассового сопровождения маневрирующих воздушных ИРИ выбираются СКО отфильтрованных пеленгов.

Экстраполяция вектора параметров трассы к моменту времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , определяется выражением [4]:

$$\mathbf{S}_{n|n-1} = \Phi \mathbf{S}_{n-1}, \quad (1)$$

где  $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  – оператор экстраполяции,  $\Delta t = t_n - t_{n-1}$  – интервал времени между моментами времени  $t_{n-1}$  и  $t_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , в которые осуществляется пеленгование ИРИ.

Ковариационная матрица параметров трассы экстраполируется к моменту времени  $t_n$  по правилу [4]:

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

где  $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \Delta t^2 / 2 \\ \Delta t \end{bmatrix}$  – матрица коэффициентов усиления шума движения воздушной цели,  $\sigma_a^2$  – дисперсия ее шумового ускорения.

Непосредственный расчет экстраполированного вектора параметров  $\mathbf{S}_{n|n-1} = \begin{bmatrix} x_{n|n-1} \\ V_{n|n-1}^x \end{bmatrix}$  выполняется в соответствии с выражениями:

$$x_{n|n-1} = x_{n-1} + V_{n-1}^x \Delta t, \quad V_{n|n-1}^x = V_{n-1}^x. \quad (3)$$

Для расчета элементов экстраполированной ковариационной матрицы  $\mathbf{P}_{n|n-1} = \begin{bmatrix} D_{n|n-1}^x & D_{n|n-1}^{xV^x} \\ D_{n|n-1}^{V^x x} & D_{n|n-1}^{V^x} \end{bmatrix}$  используются формулы:



$$D_{n|n-1}^x = D_{n-1}^x + D_{n-1}^{xV^x} \Delta t + D_{n-1}^{V^x} \Delta t^2 + \sigma_a^2 \Delta t^4 / 4,$$

$$D_{n|n-1}^{xV^x} = D_{n|n-1}^{V^x x} = D_{n-1}^{V^x x} + D_{n-1}^{V^x} \Delta t + \sigma_a^2 \Delta t^3 / 2,$$

$$D_{n|n-1}^{V^x} = D_{n-1}^{V^x} + \sigma_a^2 \Delta t^2.$$

Правило фильтрации экстраполированного вектора параметров трассы имеет вид:

$$\mathbf{S}_n = \mathbf{S}_{n|n-1} + \mathbf{K}_n (x_n^{u_{3M}} - \mathbf{H} \mathbf{S}_{n|n-1}),$$

где  $\mathbf{K}_n$  – коэффициент усиления фильтра Калмана,  $x_n^{u_{3M}}$  – значение координаты, полученное по результатам измерения пеленгов на момент времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ,  $\mathbf{H} = [1 \ 0]$  – матрица отображения вектора параметров на скалярную величину координаты  $x$ .

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T + \sigma_x^2(n))^{-1},$$

где  $\sigma_x(n)$  – СКО измерения координаты  $x$ .

С учетом вида матрицы  $\mathbf{H}$  коэффициент усиления фильтра Калмана имеет вид:

$$\mathbf{K}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) / (\mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) + \sigma_x^2(n)) \\ \mathbf{P}_{n|n-1}(2,1) / (\mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) + \sigma_x^2(n)) \end{bmatrix}.$$

Тогда выражение (5) можно переписать в явном виде:

$$\mathbf{S}_n = \begin{bmatrix} x_{n-1} + V_{n-1}^x \Delta t + \mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) (x_n^{u_{3M}} - x_{n|n-1}) / (\mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) + \sigma_x^2(n)) \\ V_{n-1}^x + \mathbf{P}_{n|n-1}(2,1) (x_n^{u_{3M}} - x_{n|n-1}) / (\mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) + \sigma_x^2(n)) \end{bmatrix}.$$

Фильтрация ковариационной матрицы проводится в соответствии с выражением:

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{P}_{n|n-1} - \mathbf{K}_n \mathbf{H} \mathbf{P}_{n|n-1}.$$

Расчет элементов отфильтрованной ковариационной матрицы осуществляется по следующим формулам:

$$\mathbf{P}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) - \mathbf{K}_n(1) \mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) & \mathbf{P}_{n|n-1}(1,2) - \mathbf{K}_n(1) \mathbf{P}_{n|n-1}(1,2) \\ \mathbf{P}_{n|n-1}(2,1) - \mathbf{K}_n(2) \mathbf{P}_{n|n-1}(1,1) & \mathbf{P}_{n|n-1}(2,2) - \mathbf{K}_n(2) \mathbf{P}_{n|n-1}(1,2) \end{bmatrix}.$$

Элементы вектора параметров трасс и его ковариационной матрицы после фильтрации сохраняются до следующего цикла вместо их предыдущих значений.

Аналогичным образом проводятся вычисления для координаты  $y$  при замене в (5) значения  $x_n^{u_{3M}}$  на  $y_n^{u_{3M}}$ , а в (6) – дисперсии  $\sigma_x^2(n)$  на  $\sigma_y^2(n)$ .

**Оценка СКО отфильтрованных пеленгов маневрирующих воздушных объектов.** Ввиду сохранения приоритета прямолинейного равномерного движения экстраполяция и



фильтрация параметров трасс ИРИ проводится при  $\sigma_a = 0$ . В процедуре входного контроля и сопровождения полученные оценки координат объектов сравниваются с измеренными; при расхождении координат более, чем на  $h\sigma_{x,y}$ , где  $h$  – некоторое значение величины порога, принимается решение о наличии маневра.

Рассмотрим разновидности реализации алгоритмов трассового сопровождения ИРИ. В первом алгоритме, который будем называть «Комбинированный алгоритм № 1», при разнице значений отфильтрованных и измеренных координат более, чем на  $h\sigma_{x,y}$ , проводится замена отфильтрованных координат на измеренные. Во втором алгоритме, условно названном «Комбинированным алгоритмом № 2», в такой ситуации в качестве замены используются оценки, полученные алгоритмом с добавочным шумовым ускорением при  $\sigma_a \neq 0$ . Далее для алгоритмов № 1 и № 2 производится процедура инициализации элементов ковариационной матрицы:

$$\mathbf{P}_n = \begin{bmatrix} \sigma_{x,y}^2(n) & \sigma_{x,y}^2(n)/\Delta t \\ \sigma_{x,y}^2(n)/\Delta t & 2\sigma_{x,y}^2(n)/\Delta t^2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

По результатам статистического моделирования трассового сопровождения ИРИ на множестве реализаций траекторий маневрирующих воздушных ИРИ, совершающих движение по прямолинейным участкам с различными значениями углов поворота, были получены практические оценки параметров  $h$  и  $\sigma_a$ . Значения  $h \approx 2,8$  и  $\sigma_a \approx 6$  (м/с<sup>2</sup>) показали наименьшие СКО оценок пеленгов по совокупности смоделированных маневров и были выбраны в качестве оптимальных при проведении дальнейших исследований.

Зависимости СКО отфильтрованных пеленгов от СКО измерения их значений, полученные при статистическом моделировании трассового сопровождения ИРИ, представлены на рис. 1 и 2 при углах поворота 10° и 90° соответственно.

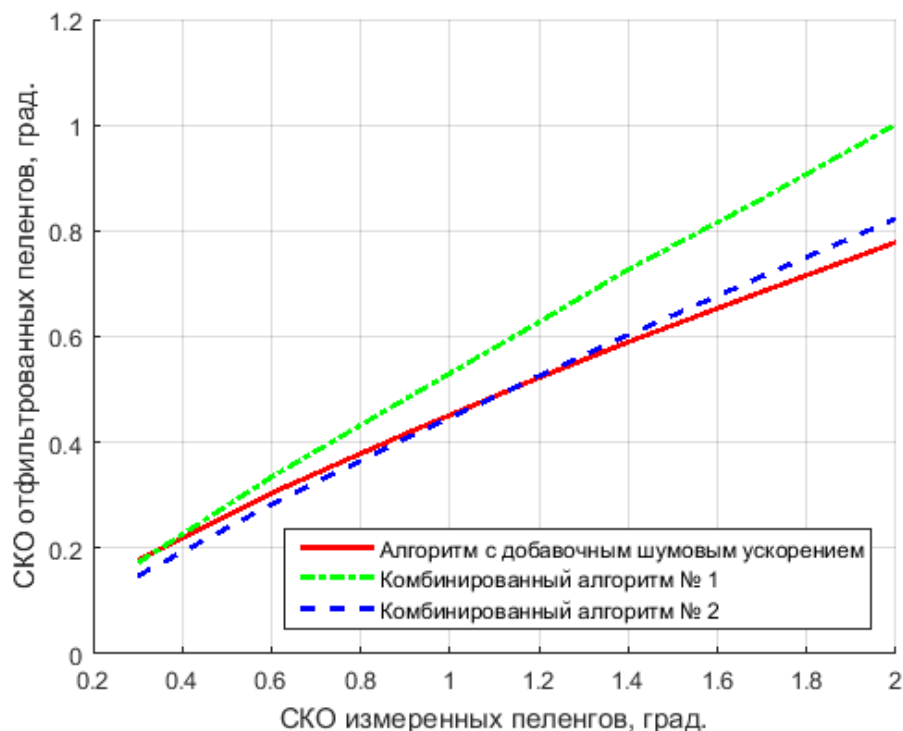


Рисунок 1 – Зависимости СКО отфильтрованных пеленгов от СКО измеренных пеленгов маневрирующих ИРИ при угле поворота 10°

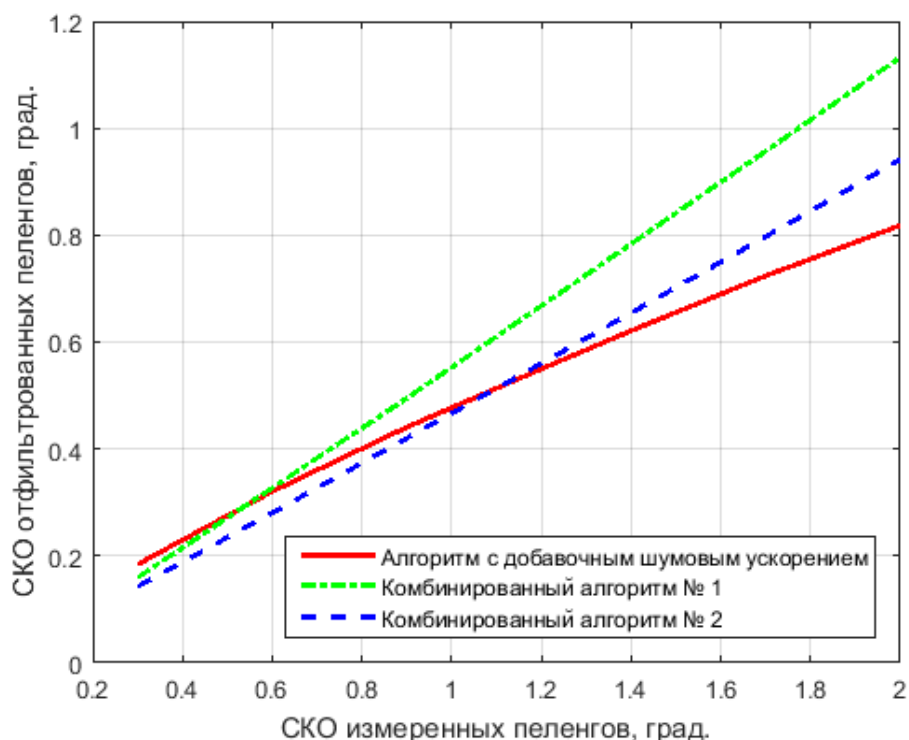


Рисунок 2 – Зависимости СКО отфильтрованных пеленгов от СКО измеренных пеленгов маневрирующих ИРИ при угле поворота  $90^\circ$

Установлено, что при малых (менее  $1,1^\circ$ ) ошибках пеленгования Комбинированный алгоритм № 2, базирующийся на пересчете параметров трасс с учетом добавочного шумового ускорения, оказывается более эффективным; алгоритм с добавочным шумовым ускорением и Комбинированный алгоритм № 1, построенный на замене оценок координат объектов на их измеренные значения, позволяют получить примерно одинаковые СКО отфильтрованных пеленгов при ошибках пеленгования менее  $0,6^\circ$ . При увеличении ошибки измерения пеленгов (свыше  $1,1^\circ$ ) алгоритм с добавочным шумовым ускорением оказывается более эффективным.

**Заключение.** Разработаны алгоритмы трассового сопровождения маневрирующих ИРИ, базирующиеся на применении калмановской фильтрации с идентификацией маневра путем сопоставления значений измеренных и отфильтрованных координат и учитывающие влияние добавочного шумового ускорения на СКО оценки параметров трасс.

Установлено, что при малых ошибках пеленгования наибольшей эффективностью характеризуется алгоритм сопровождения объектов с пересчетом параметров трасс при учете добавочного шумового ускорения; по мере увеличения ошибок измерения пеленгов возрастает эффективность алгоритма с добавочным шумовым ускорением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
3. Разиньков С.Н., Сирота А.А. Оценка эффективности первичной и вторичной обработки импульсных радиосигналов в системах пассивной радиолокации // Измерительная техника. 2004. №2. С. 53–59.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.



REFERENCES

1. Radio`elektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya / Pod red. Ya.D. Shirmana. M.: Radiotekhnika, 2007. 512 p.
2. Radzievskij V.G., Sirota A.A. teoreticheskie osnovy radio`elektronnoj razvedki. M.: Radiotekhnika, 2004. 432 p.
3. Razin'kov S.N., Sirota A.A. Ocenka `effektivnosti pervichnoj i vtorichnoj obrabotki impul'snyh radiosignalov v sistemah passivnoj radiolokacii // Izmeritel'naya tekhnika. 2004. №2. pp. 53–59.
4. Perov A.I. Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem. M.: Radiotekhnika, 2003. 400 p.

© Попов В.Г., Разиньков С.Н., Решетняк Е.А., 2019

Попов Василий Георгиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, aspirant@inbox.ru.

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, razinkovsergey@rambler.ru.

Решетняк Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, начальник отдела – заместитель начальника управления Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, reshetnyakea@bk.ru.