

УДК 621.396.96

СИНТЕЗ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ВТОРОГО ПОРЯДКА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ РАДИАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ

С.А. ГОРШКОВ, В.Н. ЗАВИЖЕНЕЦ

Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30 марта 2017

Аннотация. Для радиолокационных станций (РЛС) обзора рассмотрены особенности использования радиальной скорости в задаче Калмановской фильтрации дальности и двух ее производных. Проведен сопоставительный анализ результатов фильтрации рассматриваемых параметров для гипотетических РЛС обзора. Проанализирована суммарная ошибка, учитывающая флуктуационную и все виды динамических ошибок.

Ключевые слова: фильтр Калмана, наклонная дальность, радиальная скорость, радиальное ускорение, РЛС обзора.

Abstract. The features of the radial speed application in the problem of Kallman's filtration of range and two its derivatives for the surveillance radar are considered. The comparative analysis of the consielired parameters of the filtration results for the hypothetical radars is performed. The total fluctation and dynamic errors are analysed.

Keywords: Kallman's filter, inclined range, radial speed, radial acceleration, surveillance radar.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 106, No. 4, pp. 19–26

Synthesis of the Kallman's filter of the second order at observation of radial range and speed

S.A. Gorshkov, V.N. Zavizhenets

Введение

Использование разовых оценок радиальной скорости \hat{V}_{r_f} вместе с оценками дальности \hat{r}_f повышает качество фильтрации этих параметров [1–3]. Предполагается получение оценок радиальной скорости из значений частоты Доплера. Для начала работы рекурсивного фильтра Калмана требуется его инициализация. Параметры инициализации рассчитываются по конечной выборке (методом наименьших квадратов). Алгоритмы фильтрации первого и второго порядка по конечной выборке были рассмотрены ранее [1–4]. Особенности работы фильтра Калмана и его инициализации при наблюдении дальности и радиальной скорости недостаточно раскрыты в литературе. Данной проблеме был посвящен ряд публикаций в зарубежной [5] и отечественной литературе [6]. В статье рассмотрен Калмановский алгоритм фильтрации второго порядка оценок радиальной скорости совместно с оценками дальности, уточнены результаты, полученные в [4], и проанализирована возможность использования данного фильтра в различных РЛС обзора. Результаты сравниваются с фильтром второго порядка по оценкам дальности.

Постановка задачи

Вектор наблюдаемых параметров $\hat{\Theta}$ содержит разовые оценки с первого по k -й шаг:

$\hat{\Theta}_r = \|\hat{r}_{f1} \dots \hat{r}_{fk}\|^T$ или $\hat{\Theta}_{r,V_r} = \|\hat{r}_{f1} \dots \hat{r}_{fk} \quad \hat{V}_{r_{f1}} \dots \hat{V}_{r_{fk}}\|^T$ соответственно. Временной интервал

обновления данных постоянны и равен Δt (в [1–3] – период обзора $T_{\text{обз}}$). Ошибки разового оценивания независимы гауссовские с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_{f_r} , $D_{f_{V_r}}$. Инициализация фильтра Калмана второго порядка проводится за три первых контакта при наблюдении дальности и за два контакта – при условии наблюдения дальности и радиальной скорости. В результате инициализации формируется оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{a}}_k = \left\| \hat{r}_k \hat{V}_{rk} \hat{a}_{rk} \right\|^T$ и корреляционная матрица ошибок фильтрации \mathbf{R}_k на k -м шаге [7, с. 345],

$$\mathbf{R}_k = D_{f_r} \begin{Bmatrix} b_k & c_k & e_k \\ c_k & d_k & f_k \\ e_k & f_k & g_k \end{Bmatrix} = D_{f_r} \bar{\mathbf{R}}_k, \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{R}}_k$ – нормированное к D_{f_r} значение корреляционной матрицы ошибок фильтрации.

Задача – рассмотреть особенности алгоритма работы фильтра Калмана второго порядка при наблюдении дальности и радиальной скорости.

Алгоритм фильтра Калмана второго порядка с использованием радиальной скорости

Работу фильтра Калмана можно разделить на три этапа: экстраполяция вектора состояния и корреляционной матрицы ошибок фильтрации; расчет коэффициентов и корреляционной матрицы ошибок фильтрации; фильтрация вектора состояния.

Экстраполяция вектора состояния $\hat{\mathbf{a}}_{0_{k+1}}$ на $(k+1)$ -й шаг фильтрации ведется в соответствии со следующим выражением:

$$\hat{\mathbf{a}}_{0_{k+1}} = \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{a}}_k, \quad (2)$$

где \mathbf{B} – динамическая матрица пересчета вектора состояния с k -го шага на $(k+1)$ -й, которая для фильтра второго порядка имеет следующий вид:

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

С учетом (3) элементы экстраполированного вектора состояния (2) равны:

$$\hat{r}_{(k+1)} = \hat{r}_k + \Delta t \hat{V}_{rk} + 0,5 \Delta t^2 \hat{a}_{rk}; \quad \hat{V}_{r0(k+1)} = \hat{V}_{rk} + \Delta t \hat{a}_{rk}; \quad \hat{a}_{0(k+1)} = \hat{a}_{rk}. \quad (4)$$

Экстраполяция корреляционной матрицы ошибок фильтрации $\mathbf{R}_{0(k+1)}$ с k -го шага на $(k+1)$ -й производится следующим образом:

$$\mathbf{R}_{0(k+1)} = \mathbf{B}_k \mathbf{R}_k \mathbf{B}_k^T + \mathbf{M}_k = D_{f_r} \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{R}}_k \mathbf{B}_k^T + D_m \bar{\mathbf{M}}_k = D_{f_r} (\mathbf{B}_k \bar{\mathbf{R}}_k \mathbf{B}_k^T + \bar{\mathbf{M}}_k C_m), \quad (5)$$

где D_m – дисперсия случайного маневра [7, с. 358] (задается заранее), а $C_m = D_m / D_{f_r}$; \mathbf{M}_k – матрица случайного маневра, с помощью которой управляют полосой пропускания фильтра в установившемся режиме, связывая ее с темпом обзора и интенсивностью случайного маневра. Тем самым можно регулировать суммарную динамическую и флуктуационную ошибку. При $\Delta t = \text{const}$ $\mathbf{M}_k = \mathbf{M}$ (т. е. не изменяется) и рассчитывается в соответствии с выражением

$$\mathbf{M} = \begin{Bmatrix} \Delta t^6/36 & \Delta t^5/12 & \Delta t^4/6 \\ \Delta t^5/12 & \Delta t^4/4 & \Delta t^3/2 \\ \Delta t^4/6 & \Delta t^3/2 & \Delta t^2 \end{Bmatrix} \cdot D_m = \bar{\mathbf{M}} \cdot D_m, \quad (6)$$

где $\bar{\mathbf{M}}$ – нормированная к D_m матрица случайного маневра.

Введем обозначения элементов корреляционной матрицы ошибок экстраполяции (5):

$$\mathbf{R}_{0(k+1)} = D_{fr} \begin{vmatrix} b_{k+1}^{\vartheta} & c_{k+1}^{\vartheta} & e_{k+1}^{\vartheta} \\ c_{k+1}^{\vartheta} & d_{k+1}^{\vartheta} & f_{k+1}^{\vartheta} \\ e_{k+1}^{\vartheta} & f_{k+1}^{\vartheta} & g_{k+1}^{\vartheta} \end{vmatrix} = D_{fr} \bar{\mathbf{R}}_{0(k+1)}. \quad (7)$$

Здесь $\bar{\mathbf{R}}_{0(k+1)}$ – нормированная к D_{fr} корреляционная матрица ошибок экстраполяции, элементы которой вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} b_{k+1}^{\vartheta} &= b_k^{\vartheta} + 2\Delta t c_k^{\vartheta} + \Delta t^2 (e_k^{\vartheta} + d_k^{\vartheta}) + \Delta t^3 f_k^{\vartheta} + \Delta t^4 g_k^{\vartheta} / 4 + \Delta t^6 C_m / 36; \quad g_{k+1}^{\vartheta} = g_k^{\vartheta} + \Delta t^2 C_m; \\ c_{k+1}^{\vartheta} &= c_k^{\vartheta} + \Delta t (e_k^{\vartheta} + d_k^{\vartheta}) + 1,5\Delta t^2 f_k^{\vartheta} + 0,5\Delta t^3 g_k^{\vartheta} + \Delta t^5 C_m / 12; \quad f_{k+1}^{\vartheta} = f_k^{\vartheta} + \Delta t g_k^{\vartheta} + 0,5\Delta t^3 C_m; \\ e_{k+1}^{\vartheta} &= e_k^{\vartheta} + \Delta t f_k^{\vartheta} + 0,5\Delta t^2 g_k^{\vartheta} + \Delta t^4 C_m / 6; \quad d_{k+1}^{\vartheta} = d_k^{\vartheta} + 2\Delta t f_k^{\vartheta} + \Delta t^2 g_k^{\vartheta} + 0,25\Delta t^4 C_m. \end{aligned} \quad (8)$$

Расчет матрицы коэффициентов фильтрации вектора состояния \mathbf{K}_{k+1} [7]:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\theta}]^{-1} = \begin{vmatrix} K_{11(k+1)} & K_{12(k+1)} \\ K_{21(k+1)} & K_{22(k+1)} \\ K_{31(k+1)} & K_{32(k+1)} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где \mathbf{H} – статическая матрица пересчета вектора состояния в вектор наблюдаемых параметров:

$$\mathbf{H} = \begin{vmatrix} \partial r / \partial r & \partial r / \partial V_r & \partial r / \partial a_r \\ \partial V_r / \partial r & \partial V_r / \partial V_r & \partial V_r / \partial a_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad (10)$$

\mathbf{R}_{θ} – матрица ошибок разовых оценок:

$$\mathbf{R}_{\theta} = \begin{vmatrix} D_{fr} & 0 \\ 0 & D_{fr} \end{vmatrix} = D_{fr} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & D_{fr} \end{vmatrix} = D_{fr} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Delta t^2 C_{\theta}} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$C_{\theta} = D_{fr} / (\Delta t^2 D_{fr})$ – коэффициент, введенный в [4].

Вычисляя (9) с использованием выражений (6), (7), (8) и (11), получим:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \frac{1}{\Delta_{k+1}} \begin{vmatrix} b_{k+1}^{\vartheta} d_{\Sigma(k+1)} - (c_{k+1}^{\vartheta})^2 & c_{k+1}^{\vartheta} (b_{\Sigma(k+1)} - b_{k+1}^{\vartheta}) \\ c_{k+1}^{\vartheta} (d_{\Sigma(k+1)} - d_{k+1}^{\vartheta}) & d_{k+1}^{\vartheta} b_{\Sigma(k+1)} - (c_{k+1}^{\vartheta})^2 \\ e_{k+1}^{\vartheta} d_{\Sigma(k+1)} - f_{k+1}^{\vartheta} c_{k+1}^{\vartheta} & f_{k+1}^{\vartheta} b_{\Sigma(k+1)} - e_{k+1}^{\vartheta} c_{k+1}^{\vartheta} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где $\Delta_{k+1} = b_{\Sigma(k+1)} d_{\Sigma(k+1)} - (c_{k+1}^{\vartheta})^2$; $b_{\Sigma(k+1)} = b_{k+1}^{\vartheta} + 1$; $d_{\Sigma(k+1)} = d_{k+1}^{\vartheta} + 1 / (\Delta t^2 C_{\theta})$.

Расчет корреляционной матрицы ошибок фильтрации \mathbf{R}_{k+1} в соответствии с выражением (22.20 а) [7, с. 348] и с учетом (7) и (12) может быть представлен в следующем виде:

$$\mathbf{R}_{k+1} = (\mathbf{E} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}) \mathbf{R}_{0(k+1)} = D_{fr} (\mathbf{E} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}) \bar{\mathbf{R}}_{0(k+1)} = D_{fr} \bar{\mathbf{R}}_{k+1}, \quad (13)$$

$$\text{где } \bar{\mathbf{R}}_{k+1} = \begin{vmatrix} b_{k+1}^{\varphi} & c_{k+1}^{\varphi} & e_{k+1}^{\varphi} \\ c_{k+1}^{\varphi} & d_{k+1}^{\varphi} & f_{k+1}^{\varphi} \\ e_{k+1}^{\varphi} & f_{k+1}^{\varphi} & g_{k+1}^{\varphi} \end{vmatrix} = (\mathbf{E} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}) \bar{\mathbf{R}}_{0(k+1)} - \text{нормированная к } D_{fr} \text{ корреляционная}$$

матрица ошибок фильтрации.

Фильтрация вектора состояния содержит две операции: вычисление невязок

$$\mathbf{U}_{k+1} = \begin{Bmatrix} U_{r(k+1)} \\ U_{Vr(k+1)} \end{Bmatrix} = \left(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)} \right) = \begin{Bmatrix} \hat{r}_{f(k+1)} - \hat{r}_{0(k+1)} \\ \hat{V}_{rf(k+1)} - \hat{V}_{r0(k+1)} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

и вычисление фильтрованных оценок элементов вектора состояния

$$\hat{\mathbf{a}}_{k+1} = \hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)} + \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{U}_{k+1}. \quad (15)$$

Сопоставление качества фильтрации для типовых РЛС обзора

Сопоставлялись алгоритмы фильтрации второго порядка при наблюдении только оценок дальности и оценок дальности с радиальной скоростью. Сформировано входное воздействие как сумма задающего и возмущающего. Задающее воздействие – полиномиальная модель 2-го порядка, в соответствии с которой рассчитано 15 точек траектории. Возмущающее воздействие распределено по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением (СКО) для дальности $\sigma_{f_r} = \sqrt{D_{f_r}}$ и радиальной скорости $\sigma_{f_{V_r}} = \sqrt{D_{f_{V_r}}}$, исходя из тактико-технических характеристик (ТТХ) РЛС. Используемые при расчетах показатели ТТХ выбраны с учетом их физической реализуемости, а их значения для пяти гипотетических РЛС сведены в таблицу.

Таблица. Тактико-технические характеристики гипотетических РЛС

Тип гипотетической РЛС	РЛС 1	РЛС 2	РЛС 3	РЛС 4	РЛС 5
Диапазон несущей частоты	МВ	ДМВ	ДМВ	СМВ	СМВ
СКО оценки дальности σ_{f_r} , м	25	250	250	50	50
СКО оценки радиальной скорости $\sigma_{f_{V_r}}$, м/с	5	15	15	1	1
Период обзора Δt , с	10	10	5	10	5
Значение коэффициента C_{Θ}	0,25	2,78	11,11	25	100

Оценки векторов наблюдаемых параметров первоначально фильтруются по алгоритмам конечной выборки и далее по алгоритмам Калмана. На каждом шаге фильтрации получены ошибки дальности, радиальной скорости и радиального ускорения. Для получения высокой достоверности результатов использовалась выборка из $N_{\text{оп}} = 10^5$ случайных реализаций.

Показатели качества. Введем СКО суммарной ошибки измерения фильтруемого скалярного параметра α (это может быть r , V_r или a_r) [2, 3], учитывающее флуктуационную и все виды динамических ошибок фильтрации и экстраполяции [8, с. 95] на каждом обзоре:

$$\sigma_{\alpha}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{оп}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{оп}}} [\hat{a}_j(k) - \alpha_{ij}(k)]^2}, \quad (16)$$

где $\hat{a}_j(k)$ – результат фильтрации параметра α ; $\alpha_{ij}(k)$ – истинное значение параметра α .

В качестве показателя, характеризующего относительный выигрыш в точности измерения параметра α за счет использования радиальной скорости, выбран коэффициент $K_{\Delta\sigma_{\alpha}}(k)$, выраженный в процентах:

$$K_{\Delta\sigma_{\alpha}}(k) = \frac{\sigma_{\alpha(r)}(k) - \sigma_{\alpha(r,V_r)}(k)}{\sigma_{\alpha(r)}(k)} \cdot 100\% = \frac{\Delta\sigma_{\alpha}(k)}{\sigma_{\alpha(r)}(k)} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где $\sigma_{\alpha(r)}(k)$ – СКО ошибки фильтрации параметра α по оценкам дальности; $\sigma_{\alpha(r,V_r)}(k)$ – СКО ошибки фильтрации параметра α по оценкам дальности и радиальной скорости.

Ошибки фильтрации дальности (16) с использованием оценок частоты Доплера $\sigma_{r(r,V_r)}(k)$ и без них – $\sigma_{r(r)}(k)$ получены по результатам моделирования при различных D_m для РЛС 2 и приведены на рис. 1.

Для удобства сопоставления тех или иных характеристик станций с различным периодом осуществлен переход от номера шага (обзора) ко времени с момента первого обнаружения цели $t = (k - 1) \cdot \Delta t$. Далее на рисунках длительность фильтрации представлена во времени. Свойства $\sigma_{r(r,V_r)}(k)$ и $\sigma_{r(r)}(k)$ при $k=1...3$ рассмотрены в [3]. Начиная с 4-го шага, суммарная ошибка убывает до некоего установившегося значения, определяемого коэффициентом маневра. Оптимальным стоит рассматривать значение D_M , если время сходимости меньше $10\Delta t$. Разность суммарных ошибок $\Delta\sigma_r(k) = \sigma_{r(r)}(k) - \sigma_{r(r,V_r)}(k)$ нарастает и стабилизируется.

С использованием выражения (17), по результатам моделирования получены зависимости относительных выигрышей в точности фильтрации дальности $K_{\Delta\sigma_r}(k)$ и графически представлены на рис. 1, б для пяти типов РЛС (см. табл.) при $D_M = 10^{-3}$.

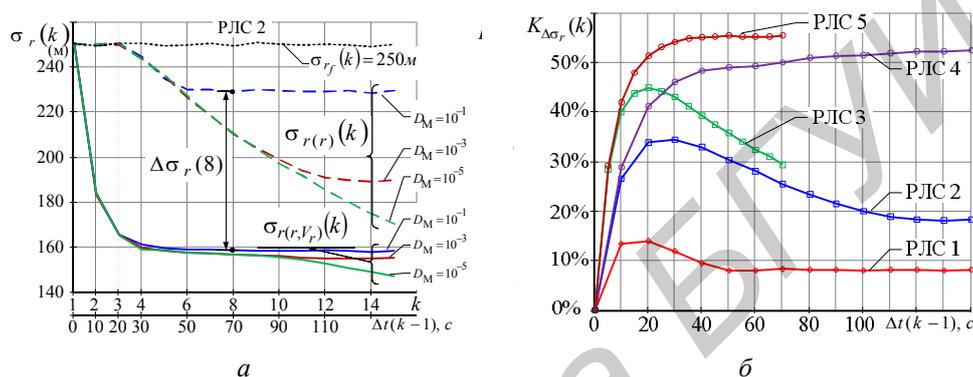


Рис. 1. Показатели качества фильтрации дальности:

a – СКО ошибок фильтрации; *б* – относительный выигрыш в точности фильтрации

Из рис. 1 следует, что выигрыш в точности достигает более 50 % и определяется не только дисперсией маневра и номером шага, но и значениями СКО ошибок измерения дальности, радиальной скорости и периода обзора. Максимальный эффект наблюдается для тех типов РЛС, где коэффициент C_θ (см. выражение (11)) много больше единицы.

Использование низкоточной оценки радиальной скорости дает максимальный эффект в районе 10 % лишь на 3–4 шаге фильтрации. Существенное сужение полосы фильтра при малом коэффициенте маневра приводит к уменьшению установившейся ошибки фильтрации. Однако при этом увеличивается время сходимости.

Сопоставляя РЛС 2 и РЛС 3, РЛС 4 и РЛС 5 (см. рис. 1, б), можно видеть, что увеличение темпа обзора приводит к увеличению выигрыша в точности фильтрации дальности во всех случаях. Экстремум выигрыша при разных периодах повторения достигается примерно в одно время.

Ошибки фильтрации радиальной скорости $\sigma_{V_r(r)}(k)$, $\sigma_{V_r(r,V_r)}(k)$ рассчитаны в соответствии с (16) для РЛС 2 и РЛС 3 при $D_M = 10^{-3}$ и графически представлены на рис. 2, а.

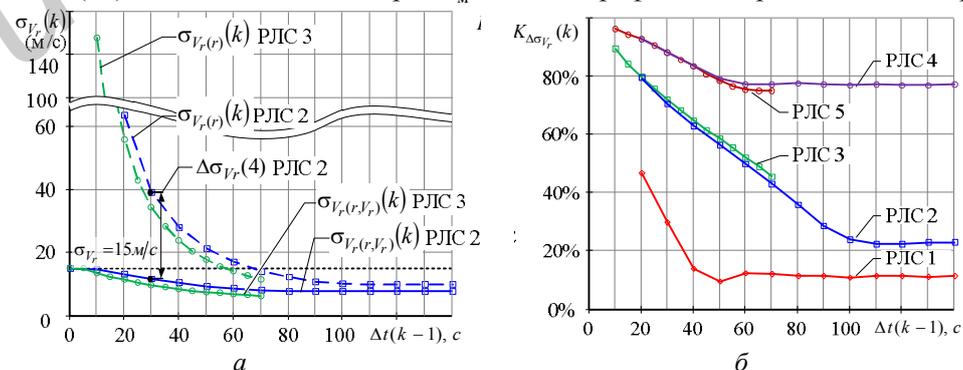


Рис. 2. Показатели качества фильтрации радиальной скорости:

a – СКО ошибок фильтрации; *б* – относительный выигрыш в точности фильтрации

Результат фильтрации радиальной скорости с использованием расширенного вектора наблюдения формируется уже по результатам первого обзора, что на два периода раньше (т. е. на 10–20 с в зависимости Δt), чем при работе только по оценкам дальности. При этом СКО ошибки фильтрации $\sigma_{V_r(r,V_r)}(k)$ при $k = 1$ равно $\sigma_{f_{V_r}}$, а начальное значение $\sigma_{V_r(r)}(k)$ возрастает с уменьшением периода обзора. Начиная со 2-го шага, все ошибки фильтрации убывают до установившегося значения, определенного дисперсией маневра. Повышение темпа обзора снижает уровень сходимости результирующей дисперсии ошибок фильтрации радиальной скорости.

На рис. 2, б приведено семейство зависимостей относительного выигрыша в точности фильтрации радиальной скорости $K_{\Delta\sigma_{V_r}}(k)$ (17) для различных типов РЛС при $D_m = 10^{-3}$. Характер зависимостей – убывающий с возможными моментами переходных процессов (наблюдается для РЛС 1). Максимальная эффективность для некоторых типов РЛС (при $C_\Theta > 10$) может достигать более 90%. Зависимости относительного выигрыша для станций, отличающихся только темпом обзора (РЛС 2 и РЛС 3, РЛС 4 и РЛС 5), практически совпадают.

Ошибки фильтрации радиального ускорения $\sigma_{a_r(r)}(k)$, $\sigma_{a_r(r,V_r)}(k)$ (16) получены по результатам моделирования РЛС 2 при $D_m = 10^{-3}$ и приведены в виде графиков на рис. 3, а.

Все зависимости СКО ошибок фильтрации радиального ускорения убывают до предела, который определяется параметрами станции и дисперсией случайного маневра. Использование оценок радиальной скорости уменьшает ошибки фильтрации лишь на первых шагах обзора. Уменьшение периода повторения (РЛС 3, РЛС 5) привело к росту начального значения ошибок фильтрации как при использовании оценок скорости, так и без них.

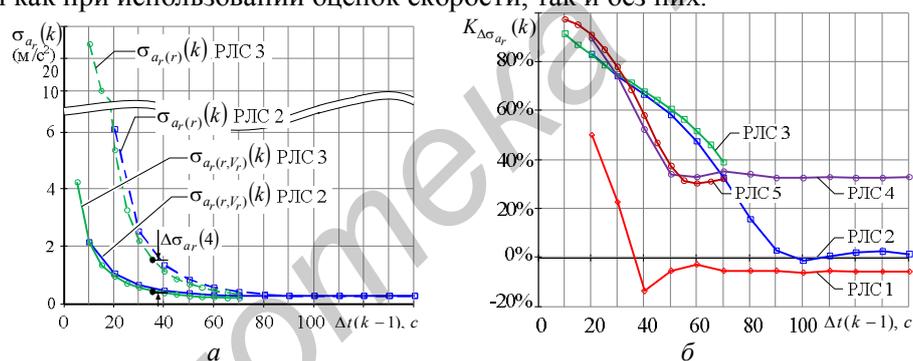


Рис. 3. Показатели качества фильтрации радиального ускорения: а – СКО ошибок фильтрации; б – относительный выигрыш в точности фильтрации

Анализ относительного выигрыша в точности фильтрации радиального ускорения $K_{\Delta\sigma_{a_r}}(k)$ (17) (см. рис. 3, б) для каждого типа гипотетической РЛС подчеркивает его зависимость от соотношения точности оценок дальности и оценок радиальной скорости. Таким образом, если в РЛС дальность оценивается с высокой точностью, а при этом используется большая длина волны, то выигрыш нивелируется, а то и становится проигрышем. Это подтверждается зависимостью для РЛС 1. Для РЛС 2 лишь на малом (переходном) участке наблюдается отрицательный эффект, на последующих шагах выигрыш небольшой либо вообще отсутствует. Для прототипов РЛС 2–5 максимальный выигрыш может составлять более 80% на начальных шагах фильтрации. Зависимости относительного выигрыша в точности для РЛС с разными темпами обзора практически совпадают при построении их во временном масштабе.

Заключение

Проведен синтез алгоритма фильтра Калмана второго порядка с использованием оценки радиальной скорости и его сопоставительное моделирование с алгоритмом фильтрации второго порядка, работающим только по оценкам дальности. Рассмотрена фильтрация для пяти типов РЛС, охватывающих три диапазона длин волн и обладающих как разными точностными

параметрами, так и разным темпом обзора. По результатам моделирования особое внимание уделено суммарной ошибке измерения параметров, включая флуктуационную и динамические.

Для РЛС метрового диапазона с высокой точностью измерения дальности использование оценок частоты Доплера вряд ли целесообразно, так как наблюдается выигрыш в точности измерений дальности лишь 7–15 %, что может быть малоэффективно. Прирост в точности фильтрации радиальной скорости колеблется от 10 до 50 %, а радиального ускорения с пятого шага становится менее эффективным нежели без использования частоты Доплера.

Для РЛС дециметрового диапазона максимальный относительный выигрыш в точности оценивания дальности в 45 % при высоком темпе и в 35 % при малом темпе обзора достигается примерно на 20–30-й секунде наблюдения цели с последующим спадом до 18 %. Зависимости эффективности, при фильтрации радиальной скорости, ведут себя примерно одинаково, постепенно убывая с 80–90 % ($\Delta t = 5 \text{ с}, 10 \text{ с}$) до 25 %. Характер зависимости выигрыша для радиального ускорения схож с зависимостями для радиальной скорости, при этом применение оценок радиальной скорости становится неэффективным примерно с 90–100-й секунды наблюдения.

Наибольший относительный выигрыш для всех фильтруемых параметров траектории проявляется у станций сантиметрового диапазона (РЛС 4, РЛС 5). Это объясняется тем, что РЛС данного диапазона наиболее чувствительны к оценкам частоты Доплера (в отличие от станций метрового диапазона).

С другой стороны, для сантиметровых станций возникает эффект неоднозначности оценки частоты Доплера. Это не позволяет напрямую использовать первичные результаты оценивания. В метровых станциях данное явление не возникает, но и эффективность от использования оценок радиальной скорости невелика. Так, например, частота Доплера для радиальной скорости 300 м/с при частоте повторения $F_{\text{п}} = 1 \text{ кГц}$ для РЛС метрового диапазона составит лишь одну треть от $F_{\text{п}}$, а для дециметрового и сантиметрового она будет равен $4F_{\text{п}}$ и $20F_{\text{п}}$ соответственно.

Подводя общий итог данной статьи и работ [1–3], можно сделать вывод о том, что для фильтрации радиальной дальности с использованием частоты Доплера следует использовать многогипотезные фильтры, с межобзорной памятью гипотез, для различных моделей движения [6, 7] с учетом и без учета $\hat{F}_{\text{д}}$. Необходимо рассматривать фильтры как нулевого, так и первого–второго порядков. Но использовать их оценки необходимо, комбинируя различные фильтры в зависимости от суммарных ошибок фильтрации на данном шаге.

Для обзорных станций необходимо находить компромиссные решения с точки зрения точности фильтрации и времени сходимости фильтра. Так, обнаружение маловысотных целей выдвигает жесткие требования к рабочему времени зенитных ракетных комплексов (ЗРК), особенно в условиях применения противорадиолокационных ракет. Вероятность успеха противовоздушного боя в таких условиях может быть повышена, если обзорные РЛС передвижных маловысотных групп будут выдавать целеуказания непосредственно на ЗРК в течение первых контактов с целью. Рабочее время РЛС, и ЗРК будет минимальным, если эти РЛС используют оценки скорости по частоте Доплера при темпе обзора порядка 5–10 с, в зависимости от дальности действия. Для форсирования действий после перебазирования РЛС (обзора и/или точного измерения координат (ТИК)) и развертывания их на позиции, необходимо оснащение навигационной аппаратурой, решающей задачи фазового относительного измерения координат, горизонтирования, ориентирования, в том числе взаимного «РЛС обзора – РЛС ТИК». Целеуказания в таких группировках будут наиболее точными (с учетом параллакса цели) и потребуют минимального времени допоиска. Особенно если РЛС ТИК также будут когерентными.

Список литературы

1. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Влияние оценок частоты Доплера отраженного сигнала на фильтрацию полярных координат неманеврирующего объекта // Докл. БГУИР. 2013. № 1 (71). С. 78–83.
2. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Анализ применимости оценок частоты Доплера для фильтрации в прямоугольных координатах и сопоставление результатов фильтрации для РЛС разных длин волн // Докл. БГУИР. 2013. № 3 (73). С. 69–75.

3. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Фильтрация полиномиальных траекторий маневрирующих целей с использованием конечной выборки оценок дальности и радиальной скорости // Докл. БГУИР. 2016. № 6 (100). С. 47–54.
4. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
5. Бар-Шалом Я., Ли Х.Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: Ч. 2. М., 2011. 239 с.
6. Хмарский П.А., Солонар А.С. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность измерений вектора состояния для фильтров Калмана // Докл. БГУИР. 2012. № 7 (69). С. 47–53.
7. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
8. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. Минск: МВИЗРУПВО, 1990. 180 с.

References

1. Gorshkov S.A., Zavizhenec V.N. Vliyanie ocenok chastoty Doplera otrazhennogo signala na fil'traciju poljarnyh koordinat nemanevrirujushhego ob#ekta // Dokl. BGUIR. 2013. № 1 (71). S. 78–83. (in Russ.)
2. Gorshkov S.A., Zavizhenec V.N. Analiz primenimosti ocenok chastoty Doplera dlja fil'tracii v prjamougol'nyh koordinatah i sopostavlenie rezul'tatov fil'tracii dlja RLS raznyh dlin voln // Dokl. BGUIR. 2013. № 3 (73). S. 69–75. (in Russ.)
3. Gorshkov S.A., Zavizhenec V.N. Fil'tracija polinomial'nyh traektorij manevrirujushhhih celej s ispol'zovaniem konechnoj vyborki ocenok dal'nosti i radial'noj skorosti // Dokl. BGUIR. 2016. № 6 (100). S. 47–54. (in Russ.)
4. Kuz'min S.Z. Osnovy teorii cifrovoj obrabotki radiolokacionnoj informacii. M.: Sov. radio, 1974. 432 s. (in Russ.)
5. Bar-Shalom Ja., Li H.R. Traektornaja obrabotka. Principy, sposoby i algoritmy: Ch. 2. M., 2011. 239 s. (in Russ.)
6. Hmarskij P.A., Solonar A.S. Vlijanie vybora modelej vhodnogo vozdejstvija na tochnost' izmerenij vektora sostojanija dlja fil'trov Kalmana // Dokl. BGUIR. 2012. № 7 (69). S. 47–53. (in Russ.)
7. Radiojelektronnye sistemy: Osnovy postroenija i teorija. Spravochnik / pod red. Ja.D. Shirmana. M.: Radiotehnika, 2007. 512 s. (in Russ.)
8. Ohrimenko A.E. Osnovy obrabotki i peredachi informacii. Minsk: MVIZRUPVO, 1990. 180 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Горшков С.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Завиженец В.Н., старший преподаватель кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Gorshkov S.A., PhD, associate professor, associate professor of a radar-location and send-recvive devices of establishment of education Military academy of Republic of Belarus.

Zavizhenets V.N., senior teacher of department of a radar-location and send-recvive devices of establishment of education Military academy of Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Фогеля, д. 1в, кв. 166
тел. +375-29-778-33-14;
e-mail: sedbox@mail.ru;
Горшков Сергей Анатольевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Fogelya, 1v/166,
tel. +375-29-778-33-14;
e-mail: sedbox@mail.ru;
Gorshkov Sergey Anatollevich