

УДК 621.396.96

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ИНТЕРЕСАХ АДАПТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ К УСЛОВИЯМ НАБЛЮДЕНИЯ

С.Н. ЯРМОЛИК, М.В. СВИНАРСКИЙ, А.С. ХРАМЕНКОВ, Е.В. ЗАЙКО

Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 марта 2018

Аннотация. Статья посвящена повышению точности оценивания углов ориентации летательного аппарата применительно к радиолокационным системам. Разработана структурная схема устройства оценивания углов пространственной ориентации объекта радиолокационного наблюдения. Методом математического моделирования исследовано влияние ошибок измерения сферических координат объекта на оценку углов его пространственной ориентации. Показано, что использование фильтрованных значений прямоугольных координат летательного аппарата позволяет повысить точность оценивания его углов пространственной ориентации. Отмечены достоинства и недостатки предложенного подхода оценки углов пространственной ориентации летательного аппарата в интересах адаптации радиолокационных портретов к условиям наблюдения.

Ключевые слова: фильтр Калмана, углы пространственной ориентации летательного аппарата.

Abstract. The article is devoted to the increasing of the spatial orientation angles estimation accuracy of the aircraft with reference to radar systems. The structural device scheme of the spatial orientation angles estimation of the radar observation object was worked out. Using the method of mathematical modeling there was examined the errors measuring spherical coordinates object influencing to its spatial orientation angles estimation. It is shown that the using of filtered rectangular coordinates meanings of the aircraft allows increasing its spatial orientation angles estimation accuracy. The advantages and disadvantages of the aircraft spatial orientation angles estimation by the proposed method are shown in the interests of radar profiles adaptation to the observation conditions.

Keywords: Kalman filter, spatial orientation aircraft angles.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 57-64

**Increasing of the spatial orientation estimation accuracy of the aircraft
in the interests of radar profiles adaptation to the observation conditions**

S.N. Yarmolik, M.V. Svinarskiy, A.S. Khramenkov, E.V. Zaiko

Введение

При распознавании радиолокационных объектов в качестве классификационных признаков широко используют их радиолокационные портреты (РЛП) [1]. Принятие решения о классе наблюдаемого объекта предполагает сопоставление наблюдаемого РЛП с имеющимися эталонными портретами. Эффективность решения во многом зависит от оптимальности процедуры обработки РЛП и степени его соответствия ожидаемому эталону [2]. РЛП являются функциями от углов ориентации летательного аппарата (ЛА) в пространстве [1]. Пространственную ориентацию ЛА в системе координат (СК) линии визирования (ЛВ) принято характеризовать совокупностью трех углов ориентации [2]: углом курса $\psi^{ЛВ}$, углом тангажа $\vartheta^{ЛВ}$ и углом крена $\gamma^{ЛВ}$.

Задача адаптации анализируемых РЛП к условиям наблюдения цели требует постоянного оценивания и учета углов пространственной ориентации (УПО) ЛА.

Проведенные исследования позволили сформулировать методику оценивания УПО [2]. Значения углов ($\hat{\psi}^{лв}$, $\hat{\vartheta}^{лв}$, $\hat{\gamma}^{лв}$), формируемые по разовым оценкам прямоугольных координат ЛА, характеризуются низкой точностью [2]. Отмеченный недостаток может быть преодолен использованием в рамках разработанной методики не разовых оценок прямоугольных координат ЛА, а их фильтрованных значений [2]. Фильтрованные значения прямоугольных координат объекта формируются устройством фильтрации и экстраполяции координат и параметров траекторий наблюдаемых объектов в процессе вторичной обработки радиолокационной информации [1, 3, 4]. При этом осуществляется объединение разовых оценок координат, полученных в различных периодах обращения к объекту [3].

Целью статьи является: разработка структуры устройства, обеспечивающего оценивание углов ориентации ЛА с точностью, позволяющей адаптировать РЛП объектов к условиям их наблюдения. При этом необходимо произвести оценку эффективности функционирования предложенного устройства.

Основная часть

Разрабатываемое устройство представляет собой дискретный фильтр, основу которого составляет фильтр Калмана (ФК) [1, 3]. Исходными данными для устройства оценивания (УО) УПО являются: вектор наблюдаемых параметров $\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{r} & \hat{\beta} & \hat{\varepsilon} \end{bmatrix}^T$, элементами которого являются разовые оценки радиальной дальности \hat{r} , азимута $\hat{\beta}$ и угла места $\hat{\varepsilon}$; диагональная

корреляционная матрица ошибок наблюдаемых параметров $\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varepsilon^2 \end{bmatrix}$, где σ_r^2 , σ_β^2 ,

σ_ε^2 – среднеквадратические отклонения (СКО) гауссовских ошибок наблюдения дальности, азимута и угла места. Требуемые данные соответствуют выходу устройства разовых оценок трехкоординатной РЛС с периодом обновления данных $\Delta t = T_{обз}$. При получении структуры УО УПО объекта использована полиномиальная модель задающего воздействия второго порядка, соответствующая равноускоренному перемещению аэродинамического ЛА.

В интересах оценивания УПО ЛА наиболее целесообразно использовать известные методы дискретной фильтрации при косвенных измерениях (наблюдаются сферические координаты ЛА, а фильтруются прямоугольные координаты ЛА) [4]. Структурная схема разработанного устройства оценивания УПО объекта представлена на рис. 1.

Приведенное устройство производит оценивание углов ориентации ЛА: $\hat{\psi}^{лв}$, $\hat{\vartheta}^{лв}$ и $\hat{\gamma}^{лв}$ на основе разовых оценок его сферических координат. Использование косвенных измерений обуславливает применение преобразователя сферических координат в прямоугольные [3, 6]. Начальная инициализация ФК осуществляется посредством фильтра по конечной выборке [5], а переключение входных данных между фильтрами обеспечивает коммутатор. На выходе ФК формируется оценка вектора состояния, элементами которого являются фильтрованные значения прямоугольных координат наблюдаемого объекта и их производные: $\hat{\mathbf{a}}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{V}_x & \hat{a}_x & \hat{y} & \hat{V}_y & \hat{a}_y & \hat{z} & \hat{V}_z & \hat{a}_z \end{bmatrix}^T$. Полученные значения УПО ЛА позволяют решать задачу адаптации устройств радиолокационного распознавания к изменяющимся углам наблюдения.

Рассмотрим особенности функционирования составных элементов УО УПО.

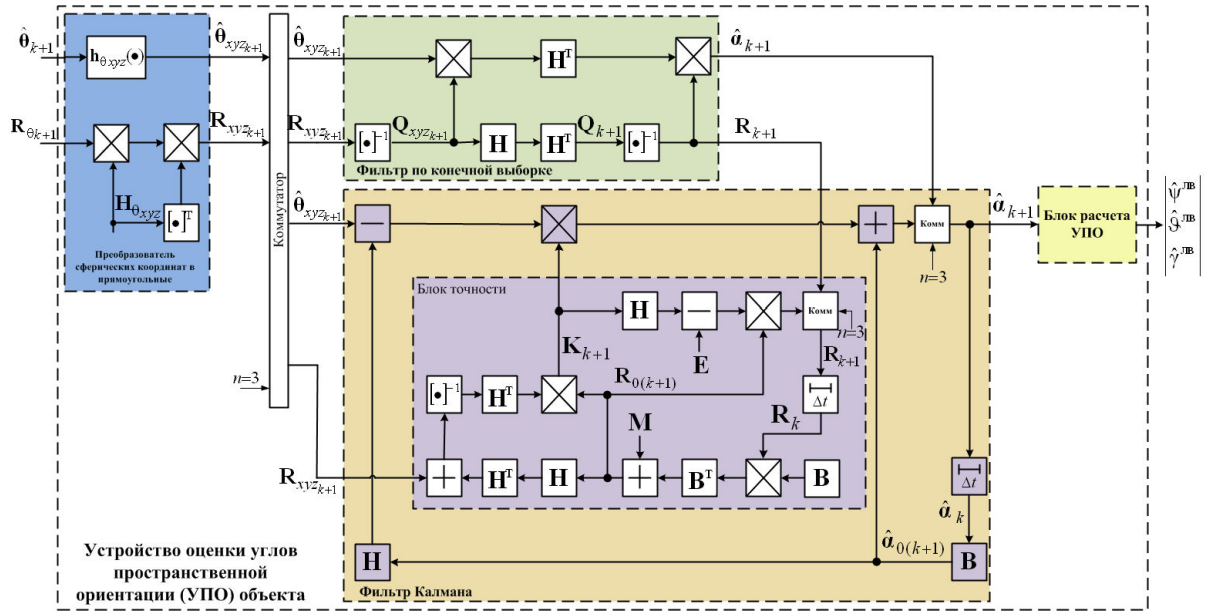


Рис. 1. Структурная схема УО УПО наблюдаемого объекта

Преобразователь сферических координат в прямоугольные координаты. Наличие нелинейных изменений в сферических координатах наблюдаемого ЛА обуславливает переход к использованию прямоугольной СК [3]. При этом оценка вектора состояния \hat{a}_{k+1} формируется по разовым оценкам прямоугольных координат ЛА $\hat{\theta}_{xyz_{k+1}} = [\hat{x}_{k+1} \ \hat{y}_{k+1} \ \hat{z}_{k+1}]^T$. Ошибки измерения определяются как разность между измеренным значением параметра ($\alpha_{изм}$) и его истинным значением ($\alpha_{ист}$): $\Delta\alpha = \alpha_{изм} - \alpha_{ист}$. В большинстве случаев ошибки измерения сферических координат цели (Δr , $\Delta\beta$, $\Delta\varepsilon$) малы по сравнению со значениями оцениваемых координат r , β и ε . Принятое допущение позволяет осуществить пересчет дисперсий ошибок измерения из сферической в декартову СК [3]. Для пересчета оценки вектора наблюдения $\hat{\theta}_{k+1}$ и матрицы ошибок текущих измерений $R_{\theta_{k+1}}$ из сферической СК в прямоугольную СК ($\hat{\theta}_{xyz_{k+1}}$, $R_{xyz_{k+1}}$) применяется вектор-функция $h_{\theta_{xyz}}$ ($\hat{\theta}$) и матрица пересчета $H_{\theta_{xyz}}$:

$$\hat{\theta}_{xyz_{k+1}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{y}_{k+1} \\ \hat{z}_{k+1} \end{bmatrix} = h_{\theta_{xyz}}(\hat{\theta}_{k+1}) = \begin{bmatrix} \hat{r}_{k+1} \cos(\hat{\beta}_{k+1}) \cos(\hat{\varepsilon}_{k+1}) \\ \hat{r}_{k+1} \sin(\hat{\varepsilon}_{k+1}) \\ \hat{r}_{k+1} \sin(\hat{\beta}_{k+1}) \cos(\hat{\varepsilon}_{k+1}) \end{bmatrix}, \quad R_{xyz_{k+1}} = H_{\theta_{xyz}} R_{\theta_{k+1}} H_{\theta_{xyz}}^T, \quad (1)$$

где \hat{r}_{k+1} , $\hat{\beta}_{k+1}$, $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ – текущие разовые оценки сферических координат ЛА; \hat{x}_{k+1} , \hat{y}_{k+1} , \hat{z}_{k+1} – текущие разовые оценки прямоугольных координат ЛА.

Выражения (1) определяют алгоритм функционирования блока преобразования сферических координат в прямоугольные.

Фильтр по конечной выборке. Для установки начальных значений ФК на первых трех шагах ($n = 3$) используется алгоритм фильтрации по конечной выборке [5]:

$$\hat{a}_{k+1} = R_{k+1} H_{k+1}^T Q_{xyz_{k+1}} \hat{\theta}_{xyz_{k+1}}, \quad Q_{k+1} = R_{k+1}^{-1} = H_{k+1}^T Q_{xyz_{k+1}} H_{k+1}, \quad (2)$$

где H_{k+1} – динамическая матрица пересчета малых приращений вектора состояния в приращения вектора наблюдаемых параметров; $Q_{xyz_{k+1}}$ – матрица точности наблюдаемых прямоугольных координат ЛА; Q_{k+1} – результирующая матрица точности вектора состояния.

Вектор наблюдения представляет собой совокупность трех разовых оценок $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{xyz_{k+1}} = \left\| \hat{\boldsymbol{\theta}}_{1,xyz} \hat{\boldsymbol{\theta}}_{2,xyz} \hat{\boldsymbol{\theta}}_{3,xyz} \right\|^T$, где $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{i,xyz} = [\hat{x}_i \ \hat{y}_i \ \hat{z}_i]^T$, $i = \overline{1, n}$ – разовые оценки прямоугольных координат i -го шага. Матрица ошибок наблюдения прямоугольных координат имеет вид

$$\mathbf{R}_{xyz_{k+1}} = \left\| \begin{array}{ccc} \mathbf{R}_{xyz_1} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{R}_{xyz_2} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{R}_{xyz_3} \end{array} \right\|, \text{ где } \mathbf{R}_{xyz_1}, \mathbf{R}_{xyz_2}, \mathbf{R}_{xyz_3} \text{ – корреляционные матрицы ошибок}$$

разового оценивания 1, 2 и 3-го шага соответственно, \mathbf{O} – нулевая матрица.

Выражение (2) определяет алгоритм фильтрации по конечной выборке.

Фильтр Калмана. Работа ФК для случая косвенных измерений вектора наблюдаемых параметров имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)} &= \mathbf{B} \hat{\mathbf{a}}_k, \quad \mathbf{R}_{0(k+1)} = \mathbf{B} \mathbf{R}_k \mathbf{B}^T + \mathbf{M}, \\ \hat{\mathbf{a}}_{k+1} &= \hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)} + \mathbf{K}_{k+1} \left[\hat{\boldsymbol{\theta}}_{xyz_{k+1}} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)} \right], \\ \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T \left[\mathbf{H} \mathbf{R}_{0(k+1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{xyz_{k+1}} \right]^{-1}, \\ \mathbf{R}_{k+1} &= (\mathbf{E} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}) \mathbf{R}_{0(k+1)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{a}}_{0(k+1)}$ – экстраполированная оценка вектора состояния; $\mathbf{B} = \left\| \begin{array}{ccc} \overline{\mathbf{B}} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \overline{\mathbf{B}} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \overline{\mathbf{B}} \end{array} \right\|$ – динамическая

матрица пересчета с k -го на $(k+1)$ -й обзор; $\overline{\mathbf{B}} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta t & (\Delta t)^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – динамическая матрица

пересчета для одной координаты; $\hat{\mathbf{a}}_k$ – значение вектора состояния на k -м (предыдущем) обзоре; $\mathbf{R}_{0(k+1)}$ – корреляционная матрица ошибок экстраполяции; \mathbf{R}_k – корреляционная матрица флуктуационных ошибок фильтрации; $\mathbf{M} = \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{D}_m$ – матрица случайного маневра;

$$\mathbf{S} = \left\| \begin{array}{ccccccccc} \frac{(\Delta t)^3}{6} & \frac{(\Delta t)^2}{2} & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(\Delta t)^3}{6} & \frac{(\Delta t)^2}{2} & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(\Delta t)^3}{6} & \frac{(\Delta t)^2}{2} & \Delta t \end{array} \right\| \text{ – матрица пересчета случайных}$$

приращений вектора состояния; $\mathbf{D}_m = \left\| \begin{array}{ccc} \mathbf{D}_x & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D}_y & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{D}_z \end{array} \right\|$ – матрица дисперсий случайного

маневра ЛА; $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y, \mathbf{D}_z$ – диагональные матрицы дисперсий случайного маневра по координатам X, Y, Z ; \mathbf{K}_{k+1} – матрица коэффициентов фильтрации для $(k+1)$ -го обзора; \mathbf{H} – статическая матрица пересчета вектора состояния в вектор наблюдаемых параметров; \mathbf{E} – диагональная единичная матрица.

Выражения (3) определяют алгоритм работы ФК 2-го порядка.

Блок расчета углов пространственной ориентации. Детальное описание методики расчета УПО объекта наблюдения приведено в [2]. На выходе устройства фильтрации и экстраполяции в каждый момент времени получаем требуемую оценку вектора состояния

$$\hat{\mathbf{a}}_{k+1} = \left| \hat{x} \ \hat{V}_x \ \hat{a}_x \ \hat{y} \ \hat{V}_y \ \hat{a}_y \ \hat{z} \ \hat{V}_z \ \hat{a}_z \right|^T, \text{ обеспечивающую расчет углов ориентации}$$

ЛА в СК ЛВ. По полученному вектору состояния $\hat{\mathbf{a}}_{k+1}$ (3) оцениваются УПО ЛА в Земной СК $(\hat{\psi}, \hat{\theta}, \hat{\gamma})$ [3]:

$$\hat{\psi} = \arctan\left(\frac{\hat{V}_z}{\hat{V}_x}\right), \hat{\theta} = \arctan\left(\frac{\hat{V}_y}{\sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_z^2}}\right), \hat{\gamma} = \arctan\left[-\frac{\hat{V}_\psi \cdot \cos(\hat{\theta})}{\hat{V}_g + (g/|\hat{\mathbf{V}}|) \cdot \cos(\hat{\theta})}\right], \quad (4)$$

где $\hat{V}_\psi = \frac{\hat{a}_z \cdot \hat{V}_x - \hat{a}_x \cdot \hat{V}_z}{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_z^2}$ – скорость изменения угла курса в Земной СК;

$\hat{V}_g = \frac{\hat{a}_y \cdot (\hat{V}_x^2 - \hat{a}_x \cdot \hat{V}_x + \hat{V}_z^2 - \hat{a}_z \cdot \hat{V}_z)}{\sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_z^2} \cdot (\hat{a}_y^2 + \hat{V}_x^2 + \hat{V}_z^2)}$ – скорость изменения угла тангажа в Земной СК;

$g \cong 9,82$ – ускорение свободного падения; $|\hat{\mathbf{V}}| = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2 + \hat{V}_z^2}$ – значение модуля вектора скорости ЛА.

Конечные выражения для искомым углов пространственной ориентации ЛА $(\hat{\psi}^{\text{ЛВ}}, \hat{\theta}^{\text{ЛВ}}, \hat{\gamma}^{\text{ЛВ}})$ учитывают требуемые повороты систем координат [2]:

$$\hat{\psi}^{\text{ЛВ}} = \arctg\left(\frac{i_z^{\text{ЛВ}}}{i_x^{\text{ЛВ}}}\right), \hat{\theta}^{\text{ЛВ}} = \arctg\left(\frac{(i_y^{\text{ЛВ}} \cdot |\hat{\mathbf{V}}|)}{\sqrt{(i_x^{\text{ЛВ}} \cdot |\hat{\mathbf{V}}|)^2 + (i_z^{\text{ЛВ}} \cdot |\hat{\mathbf{V}}|)^2}}\right), \hat{\gamma}^{\text{ЛВ}} = \arctg\left(\frac{j_z^{\text{ЛВ}}}{j_y^{\text{ЛВ}}}\right), \quad (5)$$

где $\vec{i}^{\text{ЛВ}}, \vec{j}^{\text{ЛВ}}$ – векторы, характеризующие значение векторов Земной СК в СК ЛВ; $i_x^{\text{ЛВ}}, i_y^{\text{ЛВ}}, i_z^{\text{ЛВ}}$ – проекция вектора $\vec{i}^{\text{ЛВ}}$ в СК ЛВ на соответствующие оси; $j_y^{\text{ЛВ}}, j_z^{\text{ЛВ}}$ – проекция вектора $\vec{j}^{\text{ЛВ}}$ в СК ЛВ на соответствующие оси.

Выражения (5) определяют алгоритм функционирования блока расчета УПО.

Результаты моделирования

Предложенный подход к определению УПО ЛА, основанный на использовании фильтрованных значений прямоугольных координат наблюдаемого объекта, позволил существенно повысить их точность оценивания. С целью иллюстрации данного факта выполнялось математическое моделирование. В качестве примера рассмотрена траектория прямолинейного полета ЛА с постоянной высотой.

При моделировании использованы следующие исходные данные: начальная дальность полета ЛА $r_n = 100 \cdot 10^3$ (м); начальный азимут полета ЛА $\beta_n = 60$ (град); начальная высота полета ЛА $H_n = 5 \cdot 10^3$ (м); начальный курс полета ЛА $\psi_n = 220$ (град); период обзора РЛС $\Delta t = 5$ (с); скорость полета ЛА $|\mathbf{V}| = 200$ (м/с).

Оценка УПО ЛА $(\hat{\psi}^{\text{ЛВ}}, \hat{\theta}^{\text{ЛВ}}, \hat{\gamma}^{\text{ЛВ}})$ осуществлялась по измеренным сферическим координатам $(\hat{r}, \hat{\beta}, \hat{\varepsilon})$ наблюдаемого объекта. При этом точность измерения УПО ЛА $(\sigma_{\psi^{\text{ЛВ}}}, \sigma_{\theta^{\text{ЛВ}}}, \sigma_{\gamma^{\text{ЛВ}}})$ зависит от точности измерения его сферических координат $(\sigma_r, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon)$ и от условий наблюдения объекта.

Для иллюстрации влияния ошибок измерения сферических координат на точность оценивания УПО ЛА в СК ЛВ анализировались три типовых радиолокатора обзора: 9С15 (С-300В), Восток 3Д и 19Ж6, параметры которых представлены в таблице.

Параметры РЛС

РЛС	СКО ошибок измерения		
	σ_r , м	σ_β , град	σ_ε , град
9С15	225	0,35	0,3
Восток 3D	25	0,5	0,1
19Ж6	250	0,4	1

На рис. 2 показано изменение ошибок оценивания углов курса, тангажа и крена ЛА в СК ЛВ, формируемых на основе фильтрованных значений и разовых оценок прямоугольных координат объекта (РЛС 9С15).

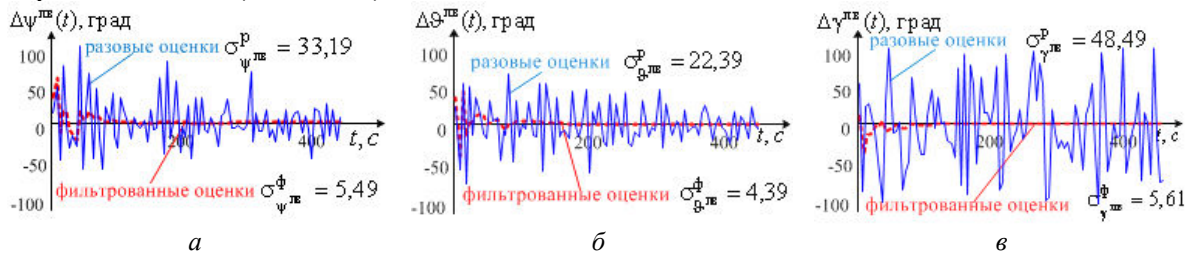


Рис. 2. Ошибки оценивания углов ЛА, формируемые по разовым и фильтрованным оценкам прямоугольных координат объекта: *а* – угла курса; *б* – угла тангажа; *в* – угла крена

Представленные результаты наглядно иллюстрируют эффект повышения точности оценивания УПО наблюдаемого объекта, обусловленный использованием фильтрованных значений оценок его прямоугольных координат. Полученные результаты являются важными для адаптации устройств распознавания к ориентации целей. В большинстве практических случаев решение задачи ракурсной адаптации устройств радиолокационного распознавания основывается на максимально правдоподобных оценках значений УПО распознаваемых целей [1]. При этом весь диапазон анализируемых значений углов ориентации целей разбивается на сектора, размеры которых, как правило, определяются точностью формирования анализируемых оценок.

Эталонные портреты распознаваемых целей формируются применительно к каждому из возможных угловых секторов. Очевидно, что наличие существенных ошибок оценивания УПО распознаваемых целей приводит к рассогласованию между наблюдаемыми и эталонными РЛП, что не позволяет эффективно классифицировать объекты. Повышение точности оценивания значений УПО ЛА позволяет правильно выбирать из банка данных эталонные РЛП распознаваемых объектов, обеспечивая повышение эффективности принимаемых решений [7].

Разработка любого устройства предполагает оценку эффективности его функционирования. В качестве показателя качества, характеризующего эффективность разработанного УО УПО наблюдаемого объекта, целесообразно выбрать СКО суммарной ошибки измерения фильтруемого скалярного параметра α (будем понимать измеряемые углы $\psi^{ЛВ}$, $\vartheta^{ЛВ}$, $\gamma^{ЛВ}$) [8]. Рассматриваемый показатель учитывает флуктуационную и динамическую ошибку фильтрации и экстраполяции параметра на каждом контакте с целью. Для обеспечения значений доверительной вероятности, равной 0,95, и относительной погрешности 5% проводилось $N_{оп} = 3074$ модельных эксперимента [8].

На рис. 3 представлены результаты оценивания СКО ошибок фильтрации углов ориентации ЛА, перемещающегося по заданной траектории для трех анализируемых радиолокаторов обзора.

Полученные результаты позволяют утверждать, что: с увеличением времени контакта с целью точность оценки УПО ЛА повышается; на первых контактах с целью УО УПО характеризуется низкой точностью, обусловленной наличием переходных процессов в ФК; рассматриваемые РЛС обеспечивают высокую точность оценки УПО ЛА (единицы градусов) только по истечении определенного времени (после 40 контактов).

Методом математического моделирования было установлено, что основное влияние на точность оценивания УПО наблюдаемого объекта оказывает дальность до наблюдаемого объекта и точность оценок его угловых координат.

Разработанное УО УПО ЛА в установившемся режиме позволяет решать задачу адаптации эталонных РЛП к условиям наблюдения распознаваемого объекта. Однако для достижения высокой точности оценки УПО ЛА в СК ЛВ необходимо располагать определенным временным ресурсом. Необходимость использования компромиссного решения между точностью оценивания УПО ЛА и располагаемым временным ресурсом в ряде практически важных случаев вынуждает совершенствовать подходы к построению адаптивных систем распознавания.

Одним из перспективных направлений в создании адаптивных систем распознавания является использование оценок распределения случайных углов ориентации наблюдаемого объекта ($\hat{p}(\psi^{ЛВ}, \vartheta^{ЛВ}, \gamma^{ЛВ})$). При этом разработанная структура УО УПО является важным элементом методики определения совместного закона распределения УПО ЛА.

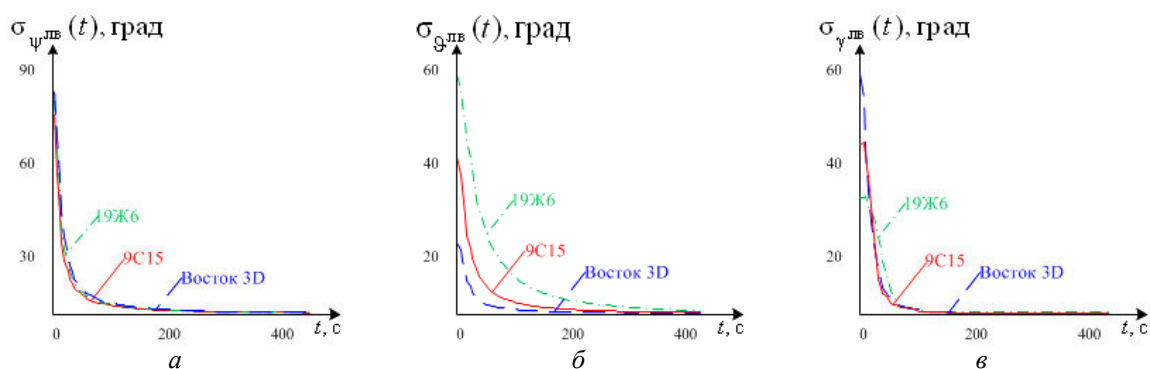


Рис. 3. СКО оценки ошибок фильтрации углов ориентации ЛА:
 а – угла курса; б – угла тангажа; в – угла крена

Заключение

В статье разработана структура устройства оценки УПО наблюдаемого радиолокационного объекта. Основу данного устройства составляет дискретный ФК второго порядка. Для начальной инициализации ФК используется алгоритм фильтрации по конечной выборке. Использование фильтрованных значений прямоугольных координат наблюдаемого ЛА позволило существенно повысить точность оценивания его углов ориентации в СК ЛВ. Формируемые оценки измеряемых углов $\psi^{ЛВ}$, $\vartheta^{ЛВ}$ и $\gamma^{ЛВ}$ позволяют решать задачу адаптации эталонных РЛП объекта к текущим условиям наблюдения ЛА.

Методом математического моделирования исследовано влияние ошибок измерения сферических координат ЛА на точность оценивания углов его пространственной ориентации. Отмечено, что наличие переходных процессов в ФК обуславливает необходимость совершенствования классического подхода адаптации устройств распознавания к ориентации ЛА в пространстве, основанного на использовании максимально правдоподобных оценок. Определенную перспективу в создании адаптивных систем распознавания имеет использование оценок распределения случайных углов ориентации наблюдаемого объекта.

Список литературы

1. Радиозлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я.Д.Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Оценивание углов ориентации летательного аппарата в интересах адаптации к условиям наблюдения / С.Н. Ярмолик [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2017. № 4. С. 73–82.
3. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
4. Хмарский П.А., Солонар А.С. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность измерений вектора состояния для фильтров Калмана // Докл. БГУИР. 2012. № 7. С. 47–53.

5. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Фильтрация полиномиальных траекторий маневрирующих целей с использованием конечной выборки оценок дальности и радиальной скорости // Докл. БГУИР. 2016. № 6. С. 47–54.
6. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Синтез фильтра Калмана второго порядка при наблюдении радиальной дальности и скорости // Докл. БГУИР. 2017. № 4. С. 19–26.
7. Свинарский М.В., Ярмолик С.Н., Храменков А.С. Влияние ракурса наблюдения цели на эффективность классификации радиолокационных объектов // Докл. БГУИР. 2017. № 2. С. 31–38.
8. Косачев И.М., Нефедов Д.С. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2015. № 1. С. 107–134.

References

1. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroeniya i teorija. Spravochnik / pod red. Ja.D. Shirmana. M.: Radiotekhnika, 2007. 512 s. (in Russ.)
2. Ocenivanie uglov orientacii letatel'nogo apparata v interesah adaptacii k uslovijam nabljudeniya / S.N. Jarmolik [i dr.] // Vestn. Voen. akad. Resp. Belarus. 2017. № 4. S. 73–82. (in Russ.)
3. Farina A., Studer F. Cifrovaja obrabotka radiolokacionnoj informacii. Soprovozhdenie celej. M.: Radio i svjaz', 1993. 320 s. (in Russ.)
4. Hmarskij P.A., Solonar A.S. Vlijanie vybora modelej vhodnogo vozdejstvija na tochnost' izmerenij vektora sostojanija dlja fil'trov Kalmana // Dokl. BGUIR. 2012. № 7. S. 47–53. (in Russ.)
5. Gorshkov S.A., Zavizhenec V.N. Fil'tracija polinomial'nyh traektorij manevrirujushchih celej s ispol'zovaniem konechnoj vyborki ocenok dal'nosti i radial'noj skorosti // Dokl. BGUIR. 2016. № 6. S. 47–54. (in Russ.)
6. Gorshkov S.A., Zavizhenec V.N. Sintez fil'tra Kalmana vtorogo porjadka pri nabljudenii radial'noj dal'nosti i skorosti // Dokl. BGUIR. 2017. № 4. S. 19–26. (in Russ.)
7. Svinarskij M.V., Jarmolik S.N., Hramenkov A.S. Vlijanie rakursa nabljudeniya celi na jeffektivnost' klassifikacii radiolokacionnyh ob'ektov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2. S. 31–38. (in Russ.)
8. Kosachev I.M., Nefedov D.S. Metodiki rascheta pokazatelej dostovernosti i tochnosti ocenivaemyh taktiko-tehnicheskikh harakteristik vooruzhenija, voennoj i special'noj tehniky // Vestn. Voen. akad. Resp. Belarus. 2015. № 1. S. 107–134. (in Russ.)

Сведения об авторах

Ярмолик С.Н., к.т.н., доцент, начальник цикла кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Свинарский М.В., аспирант кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Храменков А.С., старший инженер кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Зайко Е.В., магистрант кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Yarmolik S.N., PhD, Assistant Professor, head of the cycle of department of radiolocation and transceivers devices Military academy of the Republic of Belarus.

Svinarskiy M.V., PG student of department of radiolocation and transceivers devices Military academy of the Republic of Belarus.

Khramenkov A.S., senior engineer of department of radiolocation and transceivers devices Military academy of the Republic of Belarus.

Zaiko E.V., PG student of department of radiolocation and transceivers devices Military academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-33-640-61-14;
e-mail: mechislav1993@gmail.com
Свинарский Мечислав Витальевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 220,
Military academy of the Republic of Belarus
tel. +375-33-640-61-14;
e-mail: mechislav1993@gmail.com
Svinarskiy Mechislav Vitalevich