

Научная статья

УДК 621.39; 004.056

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186887>

EDN: <https://www.elibrary.ru/KJEVFU>

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ВОЗДУШНЫМ СУДНОМ С ДВУХКАНАЛЬНЫМ КОГЕРЕНТНЫМ РАДИОВЫСОТОМЕРОМ

П.Д. Коратаев¹, Матвеев С.С.¹, Д.Ю. Набережнев¹, М.Ю. Толстых^{2,3}✉

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», г. Воронеж, Россия

²Московский государственный лингвистический университет, г. Москва, Россия

³Московский университет МВД России им.В.Я. Кикотя, г. Москва, Россия ✉

marina_lion@mail.ru

Цитирование: Коратаев П.Д., Матвеев С.С., Набережнев Д.Ю., Толстых М.Ю. Методика оценки точности решения навигационной задачи воздушным судном с двухканальным когерентным радиовысотомером // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186887>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности и надежности автономной навигации воздушных судов в условиях недоступности или отказа глобальных навигационных спутниковых систем. В подобных ситуациях бесплатформенная инерциальная навигационная система, работая в автономном режиме, накапливает ошибки, что существенно снижает точность навигационного решения. В этой связи целесообразным представляется использование дополнительной информации от двухканального когерентного радиовысотомера в составе комплексного навигационного фильтра в качестве канала коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной

системы. Радиовысотомер обеспечивает измерения высоты над подстилающей поверхностью, которые могут быть эффективно сопоставлены с цифровой моделью рельефа местности, позволяя уточнять пространственное положение воздушного судна. Предлагается методика оценки точности решения навигационной задачи воздушным судном с двухканальным когерентным радиовысотомером. Согласно разработанной методики на основе математического моделирования проведена оценка точности выполнения автономного полета воздушного судна по заданному маршруту с наведением на промежуточные пункты маршрута курсовым методом. При этом в качестве источника навигационной информации использованы: навигационная аппаратура потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, бесплатформенная инерциальная навигационная система и двухканальный когерентный радиовысотомер с возможностью измерения составляющих скорости носителя. Разработанная методика позволяет обеспечить существенный прирост в точности автономного наведения воздушного судна по маршруту при использовании в работе комплексного навигационного фильтра дополнительной информации от двухканального когерентного радиовысотомера.

Ключевые слова: система наведения, комплексная обработка информации, бесплатформенная инерциальная навигационная система, навигационная аппаратура потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, двухканальный когерентный радиовысотомер, оценка скорости носителя, промах.

.....

A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ACCURACY OF SOLVING A NAVIGATION PROBLEM BY AN AIRCRAFT WITH A TWO-CHANNEL COHERENT RADIO ALTIMETER

P.D. Korataev¹, S.S. Matveev¹, D.Yu. Naberzhnev¹, M.Yu. Tolstykh^{2,3}✉

¹MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

²Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

³Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia

Citation: Korataev P.D., Matveev S.S, Naberzhnev D.Yu., Tolstykh M.Yu. A methodology for assessing the accuracy of solving a navigation problem by an aircraft with a two-channel coherent radio altimeter // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186887>

Abstract. The relevance of the study is due to the need to improve the accuracy and reliability of autonomous aircraft navigation in conditions of unavailability or failure of global navigation satellite systems. In such situations, the free-form inertial navigation system, working offline, accumulates errors, which significantly reduces the accuracy of the navigation solution. In this regard, it seems advisable to use additional information from a two-channel coherent radio altimeter as part of an integrated navigation filter as a correction channel for a strapless inertial navigation system. The radio altimeter provides height measurements above the underlying surface, which can be effectively compared with a digital terrain model, allowing you to refine the spatial position of the aircraft. A methodology is being developed to assess the accuracy of solving a navigation problem by an aircraft with a two-channel coherent radio altimeter. According to the developed methodology, based on mathematical modeling, an assessment of the accuracy of performing an autonomous flight of an aircraft along a given route with guidance to intermediate points of the route using the heading method was carried out. At the same time, the following navigation equipment was used as a source of navigation information for consumers of global navigation satellite systems, a free-form inertial navigation system and a two-channel coherent radio altimeter with the ability to measure the components of the carrier's speed. The developed technique makes it possible to provide a significant increase in the accuracy of autonomous guidance of an aircraft along a route when using additional information from a twochannel coherent radio altimeter in the operation of an integrated navigation filter. **Keywords:** guidance system, integrated information processing, free-form inertial navigation system, navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems, two-channel coherent radio altimeter, estimation of carrier speed, overshoot.

Введение

Для обеспечения безопасности выполнения полета и точности определения навигационных параметров в состав бортовых комплексов каждого воздушного судна (ВС) входит система наведения, основной частью которых является навигационный комплекс (НК) [1, 2].

Как правило, НК современного ВС состоит из бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) [3, 4], навигационной аппаратуры потребителей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (НАП ГНСС) [5], доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС), корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) с входящим в ее состав радиовысотомером (РВ).

В интересах повышения точности оценивания навигационных параметров и эффективности работы НК производится объединение отдельных систем, функционирующих на различных физических принципах, в единую. Например, одним из вариантов комплексирования является создание инерциальноспутниковой навигационной системы (ИСНС) [6-8], в которой совместно обрабатываются сигналы БИНС и НАП ГНСС [9]. Однако, в виду низкой мощности навигационного сигнала и низкой помехозащищенности, что связано с использованием всенаправленной антенной системы [10, 11], работа НАП ГНСС может сопровождаться существенными ошибками или отказом. Следовательно, точность оценивания навигационных параметров снижается, тем самым влияя на безопасность и выполнение автономного полета ВС по заданному маршруту.

Для повышения точности автономного наведения ВС по маршруту целесообразно использование дополнительного информационного канала коррекции ИСНС, например, двухканального когерентного РВ с возможностью измерения высотно-скоростных параметров носителя [12].

Целью данного научного исследования является разработка методики оценки точности решения навигационной задачи воздушным судном с двухканальным когерентным РВ. Для ее достижения предполагается проведение

анализа влияния параметров радиовысотомера на навигационные характеристики, формализация процесса интеграции высотной информации в состав комплексного навигационного фильтра, а также разработка алгоритма оценки точности навигационного решения при различных сценариях полета, включая условия отказа ГНСС.

Оценка точности навигационных параметров по радиовысотным данным

Для выполнения автономного полета ВС по заданному маршруту траектория его движения задается промежуточными пунктами маршрута (ППМ) с заданными координатами. Процесс наведения ВС при этом в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществляется обычно курсовым методом, который заключается в совмещении продольной оси ВС с направлением на ППМ (рисунок 1) [13].

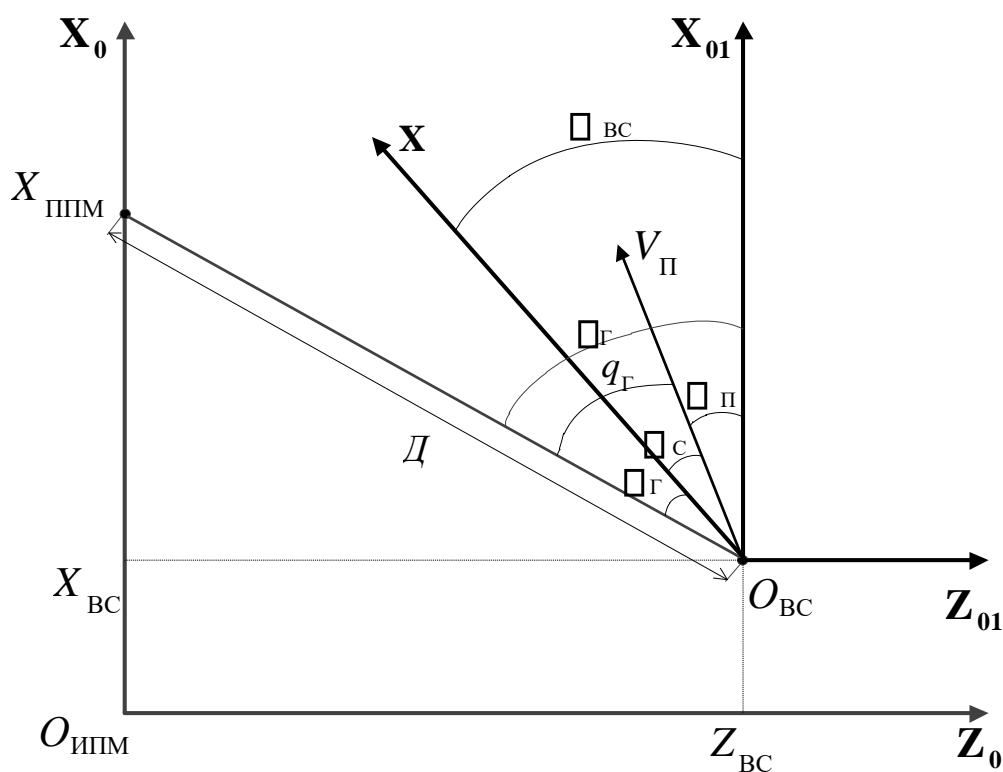


Рисунок 1 – Курсовой метод наведения.

На рисунке 1 обозначены: D – дальность до ППМ, $V_{П}$ – путевая скорость ВС, $\varphi_{П}$ – бортовой пеленг, α – угол сноса, $\psi_{П}$ – угол доворота, $q_{П}$ – угол упреждения, $\varepsilon_{П}$ – угол визирования ППМ, ψ_{BC} – ортодромический курс ВС.

$O_{ИПМ}XO_Z$ – ортодромическая система координат, в которой ось $O_{ИПМ}X$ проходит через ППМ с координатами $(X_{ППМ}, 0)$, точкой O_{BC} показано текущее положение ВС (X_{BC}, Z_{BC}) .

Для курсового метода параметр рассогласования в горизонтальной плоскости вычисляется следующим образом:

$$\Delta\alpha_H = \varepsilon_H - \psi_{BC} = \arctg Z_{BC} / X_{ППМ} - \alpha_{BC}, \quad (1)$$

в вертикальной плоскости:

$$\Delta\alpha_V = \varepsilon_V - \psi_{BC} = \arctg Z_{BC} / Y_{ППМ} - \alpha_{BC}. \quad (2)$$

Согласно формулам (1) и (2), точность наведения ВС курсовым методом зависит от точности определения координат X_{BC} , Y_{BC} , Z_{BC} , измерения ψ_{BC} . Поскольку при этом координаты в ИСНС рассчитываются на основе интегрирования значений составляющих скорости ВС, ошибки оценивания скорости ВС будут влиять на процесс наведения.

Ошибки определения навигационных параметров в БИНС [14] определяются погрешностями датчиков угловых скоростей (ДУС) и датчиков линейных ускорений (ДЛУ). В общем виде аддитивные погрешности ДУС, а значит и погрешности определения курса, определяются следующим выражением:

$$\Delta\omega(t) = \omega_0 + \eta(t) + G \times \omega(t). \quad (3)$$

где ω_0 – значение дрейфа ДУС, $\eta(t)$ – временные отсчеты белого шума ДУС, G – матрица погрешностей преобразования ДУС (диагональные элементы содержат погрешности масштабных коэффициентов, остальные – перекосы осей чувствительности гироскопов), $\omega(t)$ – вектор временных отсчетов истинных значений угловых скоростей для каждой из осей в заданный момент времени t .

В исследовании значения дрейфа ДУС моделировались случайной гауссовой величиной с нулевым математическим ожиданием, гауссовым распределением и среднеквадратическим отклонением (СКО) равным $5 \cdot 10^{-6}$ рад/с. Величина $\eta(t)$ также случайная гауссова с нулевым математическим ожиданием и СКО $2 \cdot 10^{-3}$ рад/с. Элементы матрицы моделировались независимыми случайными гауссовыми величинами с нулевым средним и СКО равным $2 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом оценка значений курса будет определяться выражениями:

$$\Delta\psi_{BCk} = T \cdot \Delta\omega_k + \Delta\psi_{BCk-}, \quad (4)$$

$$\psi_{BCk} = \psi_{BCk-} + \Delta\psi_{BCk}, \quad (5)$$

где k – момент времени, T – интервал интегрирования.

Для снижения ошибок оценивания в ИСНС составляющих скорости ВС в условиях помех НАП ГНСС в качестве дополнительного информационного канала целесообразно использовать бортовой когерентный радиовысотомер с возможностью измерения высотно-скоростных параметров. При этом необходимо производить оптимальную нелинейную дискретную комплексную обработку сигналов двухканального когерентного РВ и ИСНС в навигационном фильтре.

В ИСНС модель измерений акселерометров БИНС в связанной системе координат (ССК) можно записать как [9, 15]:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{I} + \mathbf{m}_k \mathbf{a}_k + \mathbf{b}_k + \mathbf{n}_k, \quad (6)$$

где k – номер временного отсчета; \mathbf{I} – единичная матрица;

\mathbf{m}_k – матрица перекося осей и погрешностей масштабных коэффициентов;
 \mathbf{a}_k – вектор истинных значений ускорений, измеренных акселерометрами, в ССК;
 \mathbf{b}_k – вектор смещений нулей акселерометров;
 \mathbf{n}_k – вектор независимых белых гауссовских шумов (БГШ) с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_n^2 .

При описании матрицы перекося осей и вектора смещений нулей акселерометров обычно используют модель в виде винеровского процесса [9, 15]:

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{m}_{k-1} + \sigma_m \boldsymbol{\xi}_{mk}, \quad \mathbf{b}_k = \mathbf{b}_{k-1} + \sigma_b \boldsymbol{\xi}_{bk}, \quad (7)$$

где σ_m, σ_b – СКО погрешностей масштабных коэффициентов и смещения нулей акселерометра; $\boldsymbol{\xi}_m, \boldsymbol{\xi}_b$ – вектора независимых БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичной дисперсией.

Измерения составляющих скорости в БИНС $\mathbf{Z}_{ИНС} = V_x, V_y, V_z T$ формируются на основе измерений акселерометров, где V_x, V_y, V_z – составляющие скорости ВС в ССК. Вектор измерений, составляющих скорости [12] двухканальным когерентным РВ, можно представить как $\mathbf{Z}_{РВ} = V_x, V_y, V_z T$.

Таим образом процесс комплексной обработки информации от двухканального когерентного РВ и ИСНС схематично можно представить следующим образом (рисунок 2).

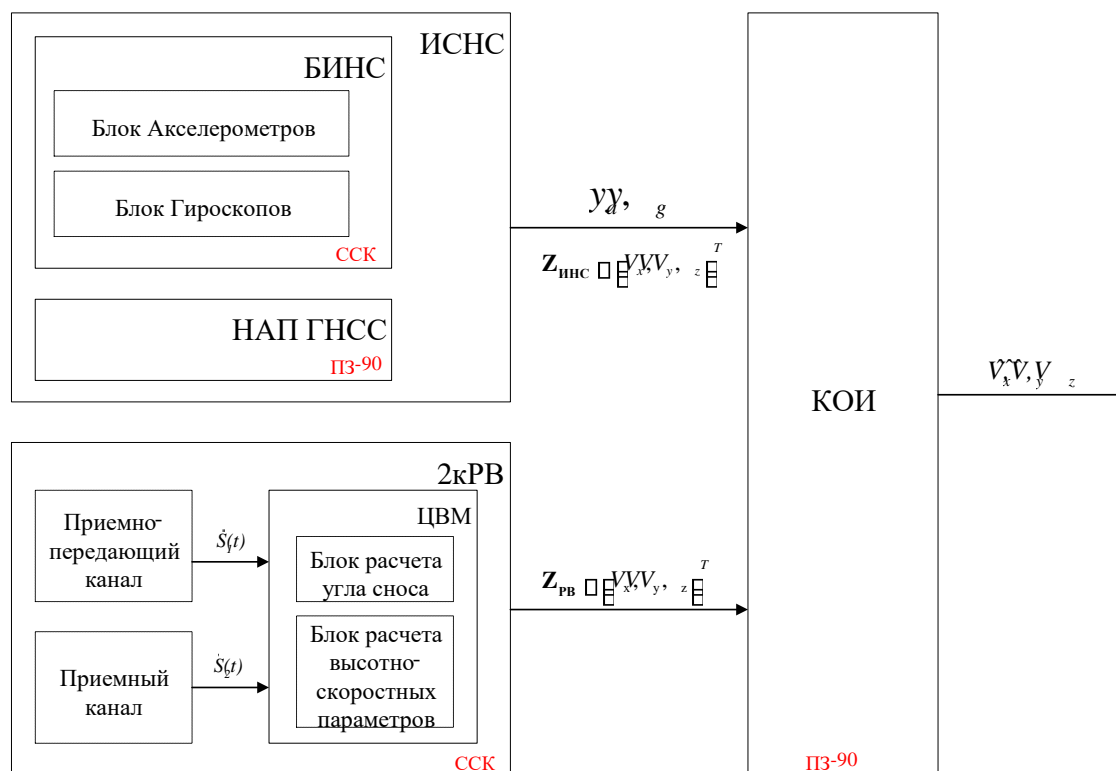


Рисунок 2 – Схема комплексной обработки информации

Информация от РВ используется в качестве внешнего измерительного воздействия на навигационный фильтр, что позволяет корректировать ошибки вертикального канала ИСНС. В рамках комплексной обработки осуществляется согласование данных по времени, фильтрация шумов, учет метрологических характеристик и реализация алгоритмов оценивания состояния, таких как расширенный фильтр Калмана. В случае отсутствия сигнала от ГНСС, РВ становится одним из ключевых источников коррекции, позволяя частично компенсировать недостаток внешней информации и обеспечить устойчивость навигационного решения.

При комплексной оптимальной обработке информации [16] будем полагать, что шумы наблюдения двухканального когерентного РВ аппроксимируются БГШ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией

$[\sigma_{V_x}^2, \sigma_{V_y}^2, \sigma_{V_z}^2]^T$. Шаг дискретизации поступления первичных измерений $\tau_{от}$

акселерометров БИНС и когерентного РВ одинаковый.

Вектор оцениваемых параметров = описывается нелинейным разностным уравнением первого порядка [17]:

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{X}^k) + \mathbf{G} \mathbf{w}^k, \quad (8)$$

где \mathbf{G} – вектор шумов, \mathbf{w}^k – стандартный дискретный БГШ, k – номер такта дискретизации. Нелинейная функция изменения вектора фильтруемых параметров во времени определяется как:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{xk} \\ b_{xk} \\ y_{yk} \\ m_{yk} \\ b_{yk} \\ y_{zk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Фундаментальная матрица определяется как [18]:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{yk} \\ b_{yk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F = \frac{\partial f(X_k)}{\partial X_k} = \begin{bmatrix} 1 & f_{12} & f_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & f_{45} & f_{46} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_{78} & f_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $f_{12} = 0,5 y_k - y_{k+1} b_{xk+1}$, $f_{13} = m_{xk} - 1$, $f_{45} = 0,5 y_k - y_{k+1} b_{yk+1}$, $f_{46} = m_{yk} - 1$, $f_{78} = 0,5 y_k - y_{k+1} b_{zk+1}$, $f_{79} = m_{zk} - 1$.

В векторе наблюдений для оптимального комплексного навигационного фильтра используются измерения составляющих скорости двухканального когерентного РВ [18], то есть $Z_k = Z_{PB}$.

Основные процедуры коррекции и экстраполяции оценок X описываются векторно-матричными уравнениями [19]:

$$\tilde{X}_k = f(\tilde{X}_{k-1}), R_k = F R_{k-1} F^T + D_k, Z_{PBk} = H X_k, K_k = R_k (R_k + H^T H)^{-1}, \quad (11)$$

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k (Z_{PBk} - H \tilde{X}_k), R_k = (I - K_k H) R_k, \quad (12)$$

и экстраполяции соответственно; \tilde{Z}_{PBk} – вектор экстраполированных

наблюдений; $D_k = \begin{bmatrix} \sigma_{PB2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{PB2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{PB2}^2 \end{bmatrix}$ – матрица шумов наблюдения;

$$\mathbf{D}_x = \begin{pmatrix}
 \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 2\sigma_a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2
 \end{pmatrix}$$

\mathbf{D}_x – матрица дисперсий шумов

где $\hat{\mathbf{X}}_k$ и $\tilde{\mathbf{X}}_k$ – векторы текущих и экстраполированных оценок параметров

состояния; \mathbf{R}_k и \mathbf{R}_k – корреляционные матрицы дисперсий ошибок фильтрации

вектора фильтруемых параметров; k – матрица коэффициентов усиления

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

«невязок» измерений; $H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица связей

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

измерений и фильтруемых параметров.

Для оценки точности выбрана величина линейного промаха h между ППМ и траекторией полета ВС с учетом работы навигационных систем.

Было проведено имитационное моделирование со следующими параметрами и условиями: начальные координаты ВС $X_{BC} = 0$ м., $Y_{BC} = 3 \cdot 10^3$ м., $Z_{BC} = 0$ м., начальный курс ВС $\alpha_{BC} = 0^\circ$, координаты ППМ $X_{ППМ} = 10 \cdot 10^3$ м.,

$Y_{ППМ} = 3 \cdot 10^3$ м., $Z_{ППМ} = 0$ м., путевая скорость ВС $V_{П} = 10$ м/с, информация от НАП ГНСС отсутствует.

Величина промаха при наличии информации от двухканального когерентного радиовысотомера составила в работе комплексного навигационного фильтра составила 8,8 м. При отсутствии коррекции БИНС величина промаха составила 175,1 м., следовательно, ошибка наведения снижена в 19,9 раз.

Заключение

Современные воздушные суда, особенно беспилотные летательные аппараты, требуют высокой точности автономного позиционирования и следования маршруту, особенно при полетах в сложных условиях: вблизи рельефа, в условиях помех или отсутствия сигнала от спутниковых навигационных систем [20], при выполнении критически важных миссий, где отказ глобальных навигационных спутниковых систем может привести к потере навигационной устойчивости.

Приемники глобальных навигационных спутниковых систем подвержены помехам, заглушению или спуфингу, а инерциальные навигационные системы накапливают ошибки со временем, ввиду чего возникает потребность в

дополнительных источниках информации для коррекции навигационного решения.

Разработанная методика, описываемая выражениями (6) – (12), позволяет обеспечить существенный прирост в точности автономного наведения воздушного судна по маршруту при использовании в работе комплексного навигационного фильтра дополнительной информации от двухканального когерентного радиовысотомера. Последний обеспечивает не только измерение высоты над рельефом, но и позволяет более точно оценивать профиль местности, улучшая качество навигации по цифровой карте высот. Двухканальная когерентная структура повышает точность и устойчивость измерений, особенно в условиях сложного рельефа.

Результаты моделирования свидетельствуют о целесообразности применения в работе комплексного навигационного фильтра информации от двухканального когерентного радиовысотомера как дополнительного канала коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы в условиях отсутствия информации от навигационной аппаратуры потребителей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем или отказа данного изделия. В условиях, когда автономность воздушного судна критически важна, например, при полетах в зонах без GPS, в горной местности, при поисково-спасательных операциях или в боевых условиях, точность автономного наведения напрямую влияет на эффективность и безопасность выполнения поставленных задач.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Скрыпник О.Н. Радионавигационные системы воздушных судов: учебник / О.Н. Скрыпник. М.: ИНФРА-М, 2016. 348 с.

2. Маковеева М. М., Шинаков Ю. С. Системы связи с подвижными объектами. Москва, Радио и связь, 2002. 440 с.
3. Бобронников, В. Т. Алгоритм комплексирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы и магнитометрической системы для решения задачи навигации летательных аппаратов / В. Т. Бобронников, А. Р. Кадочникова // Труды МАИ. 2013. № 71. С. 31.
4. Ермаков, П. Г. Сравнительный анализ схем комплексирования информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов / П. Г. Ермаков, А. А. Гоголев // Труды МАИ. 2021. № 117.
5. Неровный В.В. Помехоустойчивость мультисистемной аппаратуры потребителей ГНСС: монография. М.: Научная книга, 2018. 227 с.
6. Сильносвязанная многоантенная интегрированная инерциальноспутниковая навигационная система / Б. С. Алешин, Д. А. Антонов, К. К. Веремеенко, М. В. Жарков // Труды МАИ. 2012. № 54. С. 6.
7. Дишель, В. Д. Инерциально-спутниковые системы управления средствами выведения: теория и результаты первых применений / В. Д. Дишель // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 26.
8. Иванов В.Ф., Кошкарров А.С. Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками // Труды МАИ. 2017. № 93.
9. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.
10. Грошев А.В. Стратегия алгоритмического повышения точностных характеристик и информационной надежности инерциально-спутниковых навигационных систем в составе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 104.
11. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. М.: Радиотехника, 2017. 416 с.

12. Пат. 2832999 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/42 (2006.01). Способ и устройство измерения высоты и составляющих скорости по сигналам двухканального когерентного радиовысотомера / Колтышев Е.Е. [и др.], заявитель и патентообладатель Открытое Акционерное Общество Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь». № 2024106748; заявл. 15.03.24; опубл.

13. 01.25, Бюл. № 2. 23 с.

13. Максимов М. В., Горгонов Г. И. Радиоэлектронные системы самонаведения. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

14. Способ формирования навигационных сигналов с пониженным уровнем внеполосного излучения / В. С. Радько, В. В. Филоненко, А. М. Межуев, В. А.

Миронов // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2024. № 2. С. 26-34.

15. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.:

Радиотехника, 2010. 800 с.

16. Ярлыков М.С., Богачев А.С. Авиационные радиоэлектронные комплексы / под ред. М.С. Ярлыкова. М.: ВАТУ, 2000. 615 с.

17. Королев, А. В. Дифференциальные и разностные уравнения : учебник и практикум для вузов / А. В. Королев. М : Издательство Юрайт, 2025. 280 с.

18. Гейстер, С. Р. Системное проектирование радиолокационных станций : учеб.-метод. пособие / С. Р. Гейстер, С. В. Козлов. Минск : БГУИР, 2025. 306 с.

19. Линейная алгебра и аналитическая геометрия в примерах и задачах: учеб.-практ. пособие / Т. В. Прохорова ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. 121 с.

20. Ботов, М. И. Введение в теорию радиолокационных систем : монография / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев, В. В. Девогачак ; ред. М. И. Ботов. Красноярск : Сиб.

федер. ун-т, 2012. 394 с.

References

1. Skrypnik O.N. *Radionavigacionnyye sistemy vozdushnyh sudov* (Radio navigation systems of aircraft) textbook / O.N. Skrypnik. Moskva: INFRA-M, 2016. 348 p.

2. Makoveeva M. M., SHinakov YU. P. *Sistemy svyazi s podvizhnymi ob"ektami* (Communication systems with moving objects). Moskva, Radio i svyaz', 2002. 440 p.
3. Bobronnikov V. T., Kadochnikova A. R. *Trudy MAI*, 2013, no 71. P. 31.
4. Ermakov, P. G. *Trudy MAI*, 2021. No. 117.
5. Nerovnyj V.V. *Pomekhoustojchivost' mul'tisistemnoj apparatury potrebitelej GNSSP* (Noise immunity of multi-system equipment of GNSS consumers). Monograph. Moskva, Nauchnaya kniga, 2018. 227 p.
6. Alyoshin, B.S., Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V. *Trudy MAI*, 2012. No. 54. p. 6.
7. Dishel, V.D. *Trudy MAI*, 2011. No. 43. P. 26.
8. Ivanov V.F., Koshkarov A.P. *Trudy MAI*, 2017, no 93. P. 23.
9. *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* (GLONASS. Modernization and development prospects. The monograph) / A.I. Perov. Moskva: Radiotekhnika, 2020. 1072 p.
10. Groshev A.V. *Trudy MAI*, 2019, no 104. P. 16.
11. Yarlykov M.P. *Meandrovye shumopodobnye signaly (BOC-signaly) i ih raznovidnosti v sputnikovyyh radionavigacionnyh sistemah* (Meander noise-like signals (BOC signals) and their varieties in satellite radio navigation systems, Monograph). Moskva, Radiotekhnika, 2017. 416 p.
12. Pat. 2832999 Russian Federation, IPC G 01 S 13/42 (2006.01). *Sposob i ustrojstvo izmereniya vysoty i sostavlyayushchih skorosti po signalam dvuhkanal'nogo kogerentnogo radiovysotomera* (Method and device for measuring altitude and velocity components using signals from a two-channel coherent radio altimeter) / Koltyshev E.E. [and others]. No. 2024106748; application no. 15.03.24; publ. 13.01.25, Bul. no. 2. 23 p.
13. Maksimov M. V., Gorgonov G. I. *Radioelektronnye sistemy samonavedeniya* (Radio-electronic homing systems). Moskva, Radio i svyaz', 1982. 304 p.
14. A method for generating navigation signals with a reduced level of out-of-band radiation / V. S. Radko, V. V. Filonenko, A.M. Mezhuyev, V. A. Mironov // *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2024. No. 2. p. 26-34.
15. *GLONASS. Principy postroeniya i funkcionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and operation). Moskva: Radiotekhnika, 2010. 800 p.

16. Yarlykov M.S., Bogachev A.S. *Aviacionnye radioelektronnye komplekсы* (Aviation radioelectronic complexes) / edited by M.S. Sklykkov. Moskva: VATU, 2000. 615 p.
17. Korolev, A.V. *Differencial'nye i raznostnye uravneniya* (Differential and difference equations : textbook and workshop for universities) / A.V. Korolev. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2025. 280 p.
18. Geister, S. R. *Sistemnoe proektirovanie radiolokacionnyh stancij* (System design of radar stations) / S. R. Geister, S. V. Kozlov. Minsk : BGUIR, 2025. 306 p.
19. *Linejnaya algebra i analiticheskaya geometriya v primerah i zadachah* (Linear algebra and analytical geometry in examples and problems: textbook. Manual) / T. V. Prokhorova ; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyh. Vladimir : Izd-vo Volgu, 2022. 121 p.
20. Botov, M. I. *Vvedenie v teoriyu radiolokacionnyh sistem : monografiya* (Radar systems introduction to the theory : a monograph) / M. I. Botov, V. A. Vyahirev, V. V. Devotchak ; red. M. I. Botov. Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2012. 394 p.

Информация об авторах

Павел Дмитриевич Коратаев, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военновоздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; e-mail: korataev2015@mail.ru

Сергей Сергеевич Матвеев, адъюнкт кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; e-mail: gres02@yandex.ru

Дмитрий Юрьевич Набережнев, адъюнкт кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; e-mail: dimnabr@yandex.ru

Марина Юрьевна Толстых, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры международной информационной безопасности института информационных наук, Московский государственный лингвистический университет, г. Москва, Россия; доцент кафедры специальных информационных технологий учебно-научного комплекса информационных технологий, Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, г. Москва, Россия; e-mail: marina_lion@mail.ru

Information about the authors

Pavel D. Korataev, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Aviation Systems and Radio Navigation & Radio Communication Military Training and Research Center of the Air Force, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia; e-mail: korataev2015@mail.ru

Sergey S. Matveev, Adjunct Department of Aviation Systems and Radio Navigation & Radio Communication Military Training and Research Center of the Air Force, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia; e-mail: gres02@yandex.ru

Dmitry Yu. Naberezhnev, Adjunct Department of Aviation Systems and Radio Navigation & Radio Communication Military Training and Research Center of the Air Force, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia; e-mail: dimnabr@yandex.ru

Marina Yu. Tolstykh, Ph.D. in Technical Sciences, Docent; Associate Professor Department of International Information Security, Institute of Information Sciences, Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia; Associate Professor Department of Special Information Technologies, Educational and Research Complex of Information Technologies, Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia; e-mail: marina_lion@mail.ru