

Научная статья
УДК 621.396.969
DOI: [10.34759/trd-2022-127-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-18)

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ СОСТОЯНИЯ ВЕРТОЛЁТА В БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Сергей Александрович Горбунов¹, Вадим Александрович Ненашев²✉,
Михаил Владимирович Мажитов³, Али Ахмад Хадур⁴

^{1,3,4}Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, Тверь, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», ГУАП, Санкт-Петербург, Россия

²nenashev@guap.ru✉

Аннотация. Расширение функций и областей применения вертолетов определяет востребованность и актуальность разработки новых алгоритмов оценивания координат состояния в импульсно-доплеровской радиолокационной станции воздушного базирования, обеспечивающих устойчивое наблюдение, что в свою очередь положительно отразится на безопасности полетов. Вертолет является сложным с точки зрения радиолокации объектом наблюдения. Анализ существующих алгоритмов оценивания координат состояния показал недостаточную эффективность при обнаружении и сопровождении вертолета при различном характере его полета. Поэтому объективно существует необходимость разработки новых алгоритмов оценивания, учитывающих особенности полета

вертолета, и обеспечивающих устойчивое его наблюдение. В качестве подхода для получения оптимальных алгоритмов оценивания координат состояния вертолета предложено использование математического аппарата теории оптимальной линейной фильтрации. Цель исследования: на основе математического аппарата теории оптимальной линейной фильтрации синтезировать оптимальный по минимуму среднеквадратической ошибки алгоритм оценивания координат абсолютного и относительного движения вертолета в бортовой радиолокационной станции при различном характере его полета, включая режим зависания. Результаты: представлен анализ эффективности применения синтезированного алгоритма оценивания координат состояния вертолета. Особенностью является использование в бортовой радиолокационной станции при сопровождении вертолета по скорости двух составляющих: оценки доплеровской частоты, обусловленной отражениями сигнала от фюзеляжа, и оценки доплеровской частоты, обусловленной отражениями сигнала от вращающихся лопастей несущего винта вертолета. Практическая значимость: результаты исследований могут быть использованы при модернизации существующих и разработке перспективных бортовых радиолокационных станций, построенных на импульсно-доплеровском принципе обработки сигналов.

Ключевые слова: вертолет, бортовая радиолокационная станция, алгоритм оценивания координат состояния, теория оптимального оценивания

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

Для цитирования: Горбунов С.А., Ненашев В.А., Мажитов М.В., Али Ахмад Хадур. Алгоритм оценивания координат состояния вертолѐта в бортовой радиолокационной станции // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-18)

Original article

ALGORITHM FOR ESTIMATING THE COORDINATES OF THE STATE OF THE HELICOPTER IN THE ONBOARD RADAR STATION

Sergey A. Gorbunov¹, Vadim A. Nenashev^{2✉}, Mikhail V. Mazhitov³,

Ali Ahmad Khadur⁴

^{1,3,4}Military Academy of Aero-Space Defense named after the Marshal of Soviet Union G. K. Zhukov, Tver, Russia

²Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

²nenashev@guap.ru✉

Abstract. Functions and application areas extension of helicopters determines the demand and relevance of the new algorithms developing for the state coordinates estimating in the air-based pulse-Doppler radar station, ensuring stable surveillance, which in its turn will positively reflect on the flight safety. Helicopter is a complex object under observation in terms of radar. Analysis of the existing algorithms for the state coordinates estimating revealed insufficient efficiency in a helicopter detecting and tracking at various kind of flying. Thus, there is an objective need to develop new estimation algorithms that account for the helicopter flight characteristics and ensure its stable observation. The authors

propose employing mathematical apparatus on the optimal linear filtering theory as an approach to optimal algorithms obtaining for the helicopter state coordinates estimation. The purpose of the study consists in synthesizing an algorithm optimal by the root mean square error minimum for coordinates estimation of the helicopter absolute and relative motion in the onboard radar station at various kinds of its flight, including the hovering mode, based on the mathematical apparatus on the optimal linear filtering theory. As the result, the article presents the analysis of effectiveness of the said synthesized algorithm application. The specificity consists in two components application, namely estimation of Doppler frequency, stipulated by signal reflection from the fuselage, and Doppler frequency stipulated by the signal reflection from the rotating helicopter blades. The results of the study may be employed while the existing radar stations upgrading, or developing prospective ones based on the pulse-Doppler principle of signals processing.

Keywords: helicopter, on-board radar station, state coordinate estimation algorithm, optimal estimation theory

Funding: the reported study was funded by a grant of Russian Science Foundation (project № 22-79-00303).

For citation: Gorbunov S.A., Nenashev V.A., Mazhitov M.V., Ali Ahmad Khadur. Algorithm for estimating the coordinates of the state of the helicopter in the onboard radar station. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-18)

Введение

Расширение функций и областей применения вертолетов различного назначения предопределяет востребованность и актуальность разработки

алгоритмов оценивания его координат состояния в радиолокационных станциях [1 – 3].

Алгоритмы оценивания координат состояния используются в радиолокационных станциях различного назначения для формирования оптимальных оценок [4, 5].

Отметим, что современные бортовые радиолокационные станции (БРЛС) построены на импульсно-доплеровском принципе обработки сигналов [5 – 8].

Устойчивое и точное формирование оценок координат состояния вертолетов в БРЛС, размещаемой на воздушных судах (ВС), позволит осуществлять управление воздушным судном по траектории, выгодной с точки зрения безопасности полета.

Представленные в [9 – 10] результаты экспериментальных исследований информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реального вертолета, открыли ряд факторов и особенностей, присущих вертолетам, как объектам радиолокационного наблюдения.

Так, вертолет, как объект радиолокационного наблюдения, представляет собой сложный сигнал, обусловленный отражениями от различных элементов конструкции, в частности, фюзеляжа, подвижных частей силовой установки, и вращающихся лопастей несущего и (при наличии) рулевого винтов [9, 11] (рис. 1).



Рисунок 1 – Вертолет, как объект радиолокационного наблюдения

Однако сигнал, обусловленный отражениями от рулевого винта имеет слабую амплитуду, и использоваться в интересах радиолокационного наблюдения не может.

Следовательно, интерес в радиолокационном смысле представляют сигналы, обусловленные отражениями от фюзеляжа, силовой установки, и лопастей несущего винта.

Стоит отметить, что подвижные части силовой установки и вращающиеся лопасти несущего винта имеют свои радиальные скорости [9, 11].

Цель статьи – на основе теории оптимального оценивания синтезировать алгоритм оценивания координат состояния вертолёта в бортовой радиолокационной станции.

На рисунке 2 представлено взаимное расположение ВС – носителя БРЛС, и вертолета.

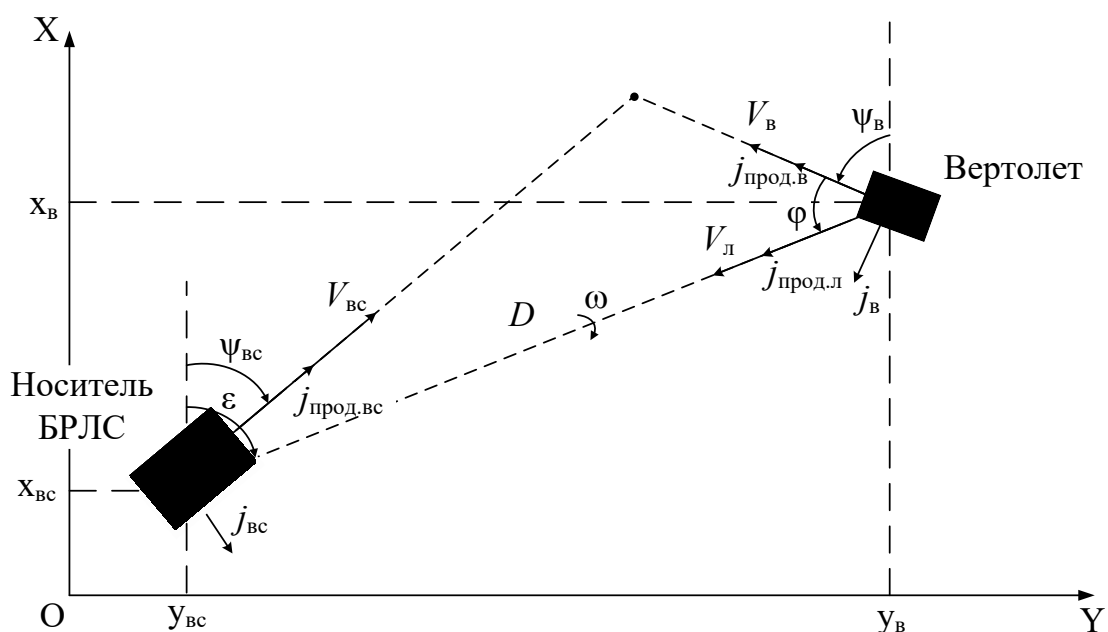


Рисунок 2 – Взаимное расположение ВС – носителя БРЛС и вертолета

На рисунке 2 обозначено:

D – расстояние между ВС и вертолетом;

ω – угловая скорость вращения линии визирования между ВС и вертолетом;

$V_{\text{вс}}, V_{\text{в}}$ – текущие скорости ВС и вертолета соответственно;

$j_{\text{прод.вс}}, j_{\text{прод.в}}$ – продольные к линии визирования ускорения ВС и вертолета соответственно;

$j_{\text{вс}}, j_{\text{в}}$ – поперечные к линии визирования ускорения ВС и вертолета соответственно;

ε – угол визирования в системе «ВС-вертолет»;

φ – текущее значение бортового пеленга вертолета с ВС;

$\psi_{\text{р}}$ и $\psi_{\text{в}}$ – текущие значения курсов полета ВС и вертолета соответственно;

$(x_{\text{в}}, y_{\text{в}})$ – координаты вертолета;

$(x_{\text{вс}}, y_{\text{вс}})$ – координаты ВС.

Алгоритм оценивания координат состояния должен устойчиво формировать следующие оценки:

- дальность D между ВС и фюзеляжем вертолета и скорость \dot{D} ее изменения;
- пеленг φ вертолета с ВС;
- угловая скорость ω вращения линии визирования «ВС – вертолет»;
- поперечное ускорение $j_{\text{в}}$ фюзеляжа вертолета, либо продольное ускорение $j_{\text{прод.в}}$ вертолета, обусловленное изменением линейной скорости вращения наступающей лопасти несущего винта вертолета $V_{\text{л}}$.

Постановка задачи на синтез

В условиях, когда результаты измерений \mathbf{z} , необходимые для формирования в сигналах управления \mathbf{u} оптимальных оценок требуемых $\hat{\mathbf{x}}_T$ и текущих $\hat{\mathbf{x}}$ координат состояния, приходят относительно редко, а управление должно формироваться непрерывно, то для оценивания целесообразно использовать алгоритм оптимальной линейной фильтрации [12, 13] в дискретном виде.

Для дискретных процессов

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k-1)\mathbf{u}(k-1) + \xi_x(k-1), \quad (1)$$

при наличии измерений

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_n(k), \quad (2)$$

где $\mathbf{\Phi}(k, k-1)$ – переходная матрица состояния размерности $n \times n$;

$\mathbf{B}(k-1)$ – матрица эффективности управления на предыдущем шаге дискретизации;

$\mathbf{H}(k)$ – матрица связи обобщенного вектора состояния $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_r^T \ \mathbf{x}^T]^T$ с m -мерным вектором \mathbf{z} наблюдений (измерений) ($m \leq n$);

ξ_x , ξ_n – дискретные белые шумы с матрицами дисперсий \mathbf{D}_x и \mathbf{D}_n ;

алгоритм оптимальной линейной фильтрации определяется рекуррентными уравнениями [6, 7, 12, 13]

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}_y(k) + \mathbf{K}_\Phi(k)[\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_y(k)], \hat{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_y(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{B}(k-1)\mathbf{u}(k-1), \mathbf{x}_y(0) = \mathbf{x}_{y0}, \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_\Phi(k) = \mathbf{D}(k)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{D}_n^{-1}(k) = \mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) \times \\ \times \left[\mathbf{H}(k)\mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{D}_n(k) \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{D}(k) = [\mathbf{E} - \mathbf{K}_\Phi(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{D}(k, k-1), \mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0, \quad (6)$$

$$\mathbf{D}(k, k-1) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{\Phi}^T(k, k-1) + \mathbf{D}_x(k-1), \quad (7)$$

где также обозначено:

$\mathbf{K}_\Phi(k)[\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k)]$ – коррекция результатов прогноза, состоящая из матричного коэффициента усиления $\mathbf{K}_\Phi(k)$, и невязки $[\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k)]$, характеризующей степень несоответствия результатов прогноза наблюдения $\mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k)$ и конкретных измерений $\mathbf{z}(k)$;

$\mathbf{D}(k)$ и $\mathbf{D}(k, k-1)$ – апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации соответственно, размерности $n \times n$ (n – размерность вектора состояния);

\mathbf{E} – единичная матрица.

Для сокращения вычислительных затрат можно использовать принцип декомпозиции исходного вектора состояния и синтезировать отдельно фильтры скоростного и угломерного каналов [13].

Синтез алгоритма оценивания координат состояния

Для обеспечения непрерывного (стабильного) наблюдения вертолета в БРЛС при различном характере его полета по скорости помимо формирования оценки доплеровской частоты, обусловленной отражениями от фюзеляжа вертолета, необходимо формирование оценки доплеровской частоты, обусловленной отражениями от вращающихся лопастей несущего винта вертолета [9, 10]. Следовательно, динамическая модель фюзеляжной и лопастной составляющих

спектра сигнала при взаимном перемещении носителя БРЛС и вертолета будет иметь вид:

– состояния:

$$\begin{cases} \Delta \dot{D}_\phi(t) = V_\phi(t); \\ \Delta \dot{V}_\phi(t) = j_{\text{прод}\phi}(t); \\ \dot{j}_{\text{прод}\phi}(t) = -\alpha_\phi j_{\text{прод}\phi}(t - \beta_\phi \Delta V_\phi(t) + \sqrt{2\alpha_\phi \sigma_{j_{\text{прод}\phi}}^2} n_\phi(t); \\ \Delta \dot{D}_\text{л}(t) = V_\text{л}(t); \\ \Delta \dot{V}_\text{л}(t) = j_{\text{прод}\text{л}}(t); \\ \dot{j}_{\text{прод}\text{л}}(t) = -\alpha_\text{л} j_{\text{прод}\text{л}}(t) - \beta_\text{л} \Delta V_\text{л}(t) + \sqrt{2\alpha_\text{л} \sigma_{j_{\text{прод}\text{л}}}^2} n_\text{л}(t), \end{cases} \quad (8)$$

– измерений:

$$\begin{cases} z_{D_\phi}(t) = D_\phi(t) + n_\phi(t); \\ z_{V_\phi}(t) = V_\phi(t) + n_\phi(t); \\ z_{D_\text{л}}(t) = D_\text{л}(t) + n_\text{л}(t); \\ z_{V_\text{л}}(t) = V_\text{л}(t) + n_\text{л}(t), \end{cases} \quad (9)$$

где $\beta_\phi = (2\pi f_\phi)^2$, $\beta_\text{л} = (2\pi f_\text{л})^2$ – квадрат частоты f собственных колебаний автокорреляционной функции, которые обусловлены скоростными (индексы «ф» – фюзеляжная, «л» – лопастная составляющие спектра сигнала) флюктуациями взаимного перемещения ВС – носителя БРЛС и вертолета;

$$\sigma_{j_{\text{прод}\phi}}^2 = \sigma_{V_\phi}^2 (\alpha_\phi^2 + (2\pi f_\phi)^2), \quad \sigma_{j_{\text{прод}\text{л}}}^2 = \sigma_{V_\text{л}}^2 (\alpha_\text{л}^2 + (2\pi f_\text{л})^2)$$

соответствующие дисперсии ускорений;

$$\alpha_\phi = \frac{1}{\tau_\phi}, \quad \alpha_\text{л} = \frac{1}{\tau_\text{л}} \quad \text{– параметры характеризующие расширение}$$

фюзеляжных и лопастных составляющих спектра сигнала соответственно;

$n_{\phi}(t)$, $n_{\text{л}}(t)$ – формирующие белые гауссовские шумы с нулевыми средними значениями и единичными интенсивностями;

$\sigma_{V_{\phi}}^2$, $\sigma_{V_{\text{л}}}^2$ – соответствующие дисперсии скорости.

В целом неадекватность этой динамической модели не превышает 10% [14].

$\tau_{\phi(\text{л})}$, $f_{\phi(\text{л})}$, $\sigma_{V_{\phi}}^2$ являются параметрами автокорреляционной функции траекторий радиальных скоростей, которые задаются либо находятся в результате корреляционного анализа реальных траекторий радиальных скоростей сближения [14].

В векторно-матричном виде систему дифференциальных уравнений (8), описывающих полет вертолета при наличии «фюзеляжных» и «лопастных» составляющих скорости, можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{N}, \quad (10)$$

где \mathbf{X} – истинный вектор состояния;

\mathbf{N} – матрица шумов;

\mathbf{A} и \mathbf{G} – матрицы коэффициентов.

В данном случае матрицы выражения (10) будут иметь следующие значения

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \Delta \dot{D}_{\phi}(t) \\ \Delta \dot{V}_{\phi}(t) \\ \dot{j}_{\text{прод.}\phi}(t) \\ \Delta \dot{D}_{\text{л}}(t) \\ \Delta \dot{V}_{\text{л}}(t) \\ \dot{j}_{\text{прод.л}}(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_{\phi} & -\alpha_{\phi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{\text{л}} & -\alpha_{\text{л}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} D_{\phi}(t) \\ V_{\phi}(t) \\ j_{\text{прод.}\phi}(t) \\ D_{\text{л}}(t) \\ V_{\text{л}}(t) \\ j_{\text{прод.л}}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2\alpha_\phi \sigma_{j_{\text{прод.}\phi}}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2\alpha_\lambda \sigma_{j_{\text{прод.}\lambda}}^2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_\phi(t) \\ 0 \\ 0 \\ n_\lambda(t) \end{bmatrix}.$$

Для реализации алгоритма дискретной калмановской фильтрации, описываемого выражениями (3) – (7), необходимо представить выражение (10) в дискретном виде, тогда

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{GN}(k), \quad (11)$$

где $\mathbf{\Phi}(k)$ – истинный вектор состояния;

$\mathbf{X}(k)$, $\mathbf{X}(k+1)$ – значения параметра на k и $k+1$ шаге соответственно.

Матрицы выражения (11) имеют следующий вид

$$\mathbf{X}(k+1) = \begin{bmatrix} D_\phi(k+1) \\ \Delta V_\phi(k+1) \\ j_{\text{прод.}\phi}(k+1) \\ D_\lambda(k+1) \\ \Delta V_\lambda(k+1) \\ j_{\text{прод.}\lambda}(k+1) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} D_\phi(k) \\ \Delta V_\phi(k) \\ j_{\text{прод.}\phi}(k) \\ D_\lambda(k) \\ \Delta V_\lambda(k) \\ j_{\text{прод.}\lambda}(k) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{\Phi}(k) = \mathbf{E} + \mathbf{AT} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_\phi T & 1 - \alpha_\phi T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_\lambda T & 1 - \alpha_\lambda T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2\alpha_\phi \sigma_{j_{\text{прод.}\phi}}^2} T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2\alpha_\lambda \sigma_{j_{\text{прод.}\lambda}}^2} T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_\phi(k) \\ 0 \\ 0 \\ n_\lambda(k) \end{bmatrix},$$

где T – интервал дискретизации;

E – единичная матрица.

Таким образом, динамическая модель (8) в дискретном виде будет иметь вид

– состояния:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{D}_\phi(k+1) = D_\phi(k) + T\Delta V_\phi(k); \\ \Delta \dot{V}_\phi(k+1) = \Delta V_\phi(k) + Tj_{\text{прод.}\phi}(k); \\ \dot{j}_{\text{прод.}\phi}(k+1) = -\beta_\phi(k)T\Delta V_\phi(k) + (1 - \alpha_\phi T)j_{\text{прод.}\phi}(k) + n_\phi(k)T\sqrt{4\alpha_\phi \sigma_{j_{\text{прод.}\phi}}^2}; \\ \Delta \dot{D}_\lambda(k+1) = D_\lambda(k) + T\Delta V_\lambda(k); \\ \Delta \dot{V}_\lambda(k+1) = \Delta V_\lambda(k) + Tj_{\text{прод.}\lambda}(k); \\ \dot{j}_{\text{прод.}\lambda}(k+1) = -\beta_\lambda(k)T\Delta V_\lambda(k) + (1 - \alpha_\lambda T)j_{\text{прод.}\lambda}(k) + n_\lambda(k)T\sqrt{4\alpha_\lambda \sigma_{j_{\text{прод.}\lambda}}^2}, \end{array} \right. \quad (12)$$

– измерений:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{D_\phi}(k) = D_\phi(k) + n_\phi(k); \\ z_{V_\phi}(k) = V_\phi(k) + n_\phi(k); \\ z_{D_\lambda}(k) = D_\lambda(k) + n_\lambda(k); \\ z_{V_\lambda}(k) = V_\lambda(k) + n_\lambda(k). \end{array} \right. \quad (13)$$

Далее получаемые значения будут являться входными данными для алгоритма оптимальной линейной фильтрации (фильтра Калмана) [14].

Правило формирования оценок в дальномерном канале заключается в следующем. Поставив в соответствие модель состояния (12) и обобщенную модель (1), а также модель измерений (13) и (2), определяются

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} D_\phi(k) \\ \Delta V_\phi(k) \\ j_{\text{прод.}\phi}(k) \\ D_\pi(k) \\ \Delta V_\pi(k) \\ j_{\text{прод.}\pi}(k) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_\phi T & 1-\alpha_\phi T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_\pi T & 1-\alpha_\pi T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_\phi T & 1-\alpha_\phi T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_\pi T & 1-\alpha_\pi T \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{D}_x(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{j_{\text{прод.}\phi}}(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{j_{\text{прод.}\pi}}(k) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$n_x(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_\phi(k) \sqrt{2\alpha_\phi \sigma_{j_{\text{прод.}\phi}}^2} T \\ 0 \\ 0 \\ n_\pi(k) \sqrt{2\alpha_\pi \sigma_{j_{\text{прод.}\pi}}^2} T \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{u} = 0, \quad \mathbf{B} = \mathbf{O}_6, \quad (18)$$

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} z_{D_\phi}(k) \\ z_{V_\phi}(k) \\ z_{D_\pi}(k) \\ z_{V_\pi}(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{D}_H(k) = \begin{bmatrix} D_{V_\phi}(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{\Delta V_\phi}(k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{V_\pi}(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\Delta V_\pi}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Подставив (14) – (20) в (3), правило формирования оценок будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{D}_{\text{вс-}\phi}(k) = D_{\text{вс-}\phi_3}(k) + K_{\phi D11}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\phi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D12}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\phi}}(k); \hat{D}_{\text{вс-}\phi}(0) = \hat{D}_{\text{вс-}\phi 0}; \\ \hat{V}_{\text{вс-}\phi}(k) = V_{\text{вс-}\phi_3}(k) + K_{\phi D21}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\phi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D22}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\phi}}(k); \hat{V}_{\text{вс-}\phi}(0) = \hat{V}_{\text{вс-}\phi 0}; \\ \hat{j}_{\text{прод.}\phi}(k) = j_{\text{прод.}\phi_3}(k) + K_{\phi D31}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\phi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D32}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\phi}}(k); \hat{j}_{\text{прод.}\phi}(0) = \hat{j}_{\text{прод.}\phi 0}; \\ \hat{D}_{\text{вс-}\pi}(k) = D_{\text{вс-}\pi_3}(k) + K_{\phi D41}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\pi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D42}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\pi}}(k); \hat{D}(0) = \hat{D}_0; \\ \hat{V}_{\text{вс-}\pi}(k) = V_{\text{вс-}\pi_3}(k) + K_{\phi D51}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\pi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D52}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\pi}}(k); \hat{V}_{\text{вс-}\pi}(0) = \hat{V}_{\text{вс-}\pi 0}; \\ \hat{j}_{\text{прод.}\pi}(k) = j_{\text{прод.}\pi_3}(k) + K_{\phi D61}(k)\Delta z_{D_{\text{вс-}\pi}}(k) + \\ \quad + K_{\phi D62}(k)\Delta z_{V_{\text{вс-}\pi}}(k); \hat{j}_{\text{прод.}\pi}(0) = \hat{j}_{\text{прод.}\pi 0}, \end{array} \right. \quad (21)$$

где $K_{\phi Dij}(k)$, $i = \overline{1,6}$, $j = \overline{1,2}$ – коэффициенты матрицы $\mathbf{K}_{\phi Dij}$ усиления

невязок, вычисляемые подстановкой (14) – (20) в (5 – 7),

$$\begin{cases} \Delta z_{D_\phi}(k) = z_{D_\phi}(k) - D_\phi(k); \\ \Delta z_{V_\phi}(k) = z_{V_\phi}(k) - V_\phi(k); \\ \Delta z_{D_\pi}(k) = z_{D_\pi}(k) - D_\pi(k); \\ \Delta z_{V_\pi}(k) = z_{V_\pi}(k) - V_\pi(k). \end{cases} \quad (22)$$

– невязки по дальности и скорости,

$$\begin{cases} D_{\text{вс-ф.э}}(k) = \hat{D}_{\text{вс-ф}}(k-1) + T\hat{V}_{\text{вс-ф}}(k-1); \\ V_{\text{вс-ф.э}}(k) = \hat{V}_{\text{вс-ф}}(k-1) + T\hat{j}_{\text{прод.ф}}(k-1); \\ j_{\text{прод.ф.э}}(k) = (1 - T\alpha)\hat{j}_{\text{прод.ф}}(k-1); \\ D_{\text{вс-л.э}}(k) = \hat{D}_{\text{вс-л}}(k-1) + T\hat{V}_{\text{вс-л}}(k-1); \\ V_{\text{вс-л.э}}(k) = \hat{V}_{\text{вс-л}}(k-1) + T\hat{j}_{\text{прод.л}}(k-1); \\ j_{\text{прод.л.э}}(k) = (1 - T\alpha)\hat{j}_{\text{прод.л}}(k-1), \end{cases} \quad (23)$$

– экстраполированные значения фазовых координат, вычисляемых по правилу (4).

В случае, когда вертолет выполняет полет в режиме «висение», тогда скорость сближения обусловлена собственной скоростью полета ВС – носителя БРЛС, значения которой формируются в системе автономных датчиков, таким образом в фильтре дальномерного канала БРЛС формируются только оценки дальности D [10].

Таким же образом определяется правило формирования оценок в угломерном канале на основе модели:

– состояния:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(k) = \varphi(k-1) + \Delta t \omega(k-1) + \frac{\Delta t^2}{D(k) - D(k-1)} (j_{\text{вс}}(k-1) + j_{\phi}(k-1) + \\ + \frac{V_{\text{л}}(k) - V_{\text{л}}(k-1)}{\Delta t} - \frac{V_{\phi}(k) - V_{\phi}(k-1)}{\Delta t} \psi(k-1)); \\ \omega(k) = \omega(k-1) - \frac{2}{D(k)} (D(k) - D(k-1)) \omega(k-1) - \frac{1}{D(k)} (j_{\text{вс}}(k-1) + \\ + j_{\text{вс}}(k-1) + \frac{V_{\text{л}}(k) - V_{\text{л}}(k-1)}{\Delta t} - \frac{V_{\phi}(k) - V_{\phi}(k-1)}{\Delta t} \psi(k-1)) + \Delta t \xi_{\omega}(k); \end{array} \right. \quad (24)$$

– измерений:

$$z_{\varphi}(k) = \varphi(k) + \xi_{\varphi}(k). \quad (25)$$

Сопоставив выражение (24) с (1), а также модель измерений (25) и (4), получены следующие выражения

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \varphi(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Phi}(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 - \frac{2}{\hat{D}(k)} (\hat{D}(k) - \hat{D}(k-1)) \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\xi_x(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta t \xi_{\omega}(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_x(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_{\omega}(k) \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\mathbf{u} = \hat{j}_{\text{вс}}(k-1) + \hat{j}_{\phi}(k-1) + \frac{\hat{V}_{\text{л}}(k) - \hat{V}_{\text{л}}(k-1)}{\Delta t} - \\ - \frac{\hat{V}_{\phi}(k) - \hat{V}_{\phi}(k-1)}{\Delta t} \hat{\psi}(k-1), \quad (28)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{\hat{D}(k) - \hat{D}(k-1)} \\ -\frac{1}{\hat{D}(k)} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z}(k) = z_{\varphi}(k), \quad \mathbf{H} = [1 \quad 0], \quad (29)$$

$$\mathbf{D}_И(k) = D_{ИФ}(k). \quad (30)$$

Подставив (26) – (30) в (3), правило формирования оценок будет иметь вид

$$\begin{cases} \hat{\varphi}(k) = \varphi_3(k) + K_{\Phi y1}(k)\Delta z_{\varphi}(k); & \hat{\varphi}(0) = \hat{\varphi}_0; \\ \hat{\omega}(k) = \omega_3(k) + K_{\Phi y2}(k)\Delta z_{\omega}(k); & \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}_0, \end{cases} \quad (31)$$

где $K_{\Phi y i}(k)$, $i=1,2$ – коэффициенты матрицы $\mathbf{K}_{\Phi y}$ усиления невязок,

вычисляемые подстановкой (26) – (30) в (4) – (7),

$$\Delta z_{\varphi}(k) = z_{\varphi}(k) - \varphi_3(k); \quad (32)$$

– невязка по углу,

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_3(k) = \hat{\varphi}(k-1) + \Delta t \hat{\omega}(k-1) + \frac{\Delta t^2}{\hat{D}(k) - \hat{D}(k-1)} (\hat{j}_{вс}(k-1) + \\ + \hat{j}_{\Phi}(k-1) + \frac{\hat{V}_{\perp}(k) - \hat{V}_{\perp}(k-1)}{\Delta t} - \frac{\hat{V}_{\Phi}(k) - \hat{V}_{\Phi}(k-1)}{\Delta t} \hat{\psi}(k-1)); \\ \omega_3(k) = (1 - \frac{2}{\hat{D}(k)} (\hat{D}(k) - \hat{D}(k-1))) \hat{\omega}(k-1) - \frac{1}{\hat{D}(k)} (\hat{j}_{вс}(k-1) + \\ + \hat{j}_{\Phi}(k-1) + \frac{\hat{V}_{\perp}(k) - \hat{V}_{\perp}(k-1)}{\Delta t} - \frac{\hat{V}_{\Phi}(k) - \hat{V}_{\Phi}(k-1)}{\Delta t} \hat{\psi}(k-1)) \end{array} \right. \quad (33)$$

– экстраполированные значения фазовых координат, вычисляемых по правилу (4).

Таким образом, на основе моделей наблюдения (13) и (25) и векторов состояния (12) и (24) синтезирован алгоритм оценивания координат состояния вертолета, который, во-первых, позволяет формировать оптимальные по минимуму среднеквадратической ошибки оценки координат состояния, во-вторых, алгоритм не требует дополнительных измерителей, не накладывая тем самым ограничения на

возможность их реализации, в-третьих, алгоритм автоматически адаптируется к условиям наблюдения в зависимости от характера полета вертолета, иначе говоря, в зависимости от того, какая скорость – линейная скорость вращения наступающей лопасти несущего винта вертолета $V_{л}$, либо скорость перемещения фюзеляжа вертолета $V_{ф}$, будет измерима в данный момент времени.

Параметры собственного движения ВС – носителя БРЛС, такие как собственное ускорение $j_{вс}$, скорость $V_{вс}$, и курс полета $\Psi_{вс}$ формируются в системе автономных датчиков, представляющей собой совокупность измерителей различной физической природы.

Исследование эффективности синтезированного алгоритма

Для оценивания эффективности синтезированного алгоритма были проведены исследования потенциальной, характеризуемой решением уравнения Риккати (6) для апостериорной матрицы дисперсий ошибок фильтрации, и реальной точности оценивания координат в различных условиях применения [13-20].

В качестве входных данных использовались реальные траекторные статистические характеристики сигналов, отраженных от вертолета.

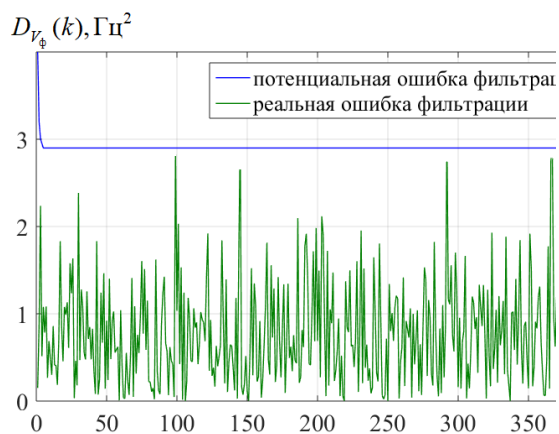
Траекторные статистические характеристики вводились в систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения функционально-связанных координат взаимного перемещения ВС – носителя БРЛС и вертолета, в результате чего получены оценки с высокой степенью адекватности.

Все виды возмущений моделировались как реализации центрированных гауссовских случайных процессов.

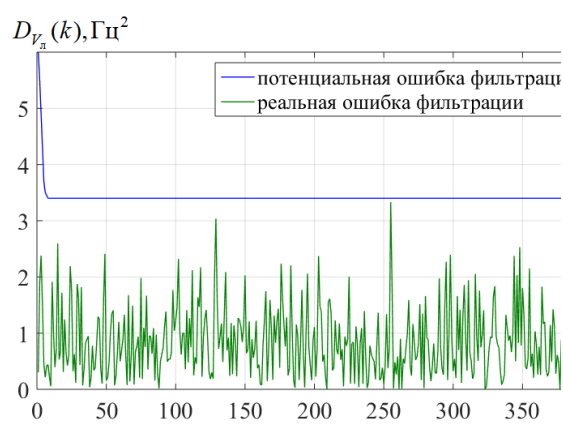
Исследования проводились при ситуации, когда вертолет первоначально находился в некоторой точке и движется с постоянной скоростью V_B и курсом Ψ_B .

Курсы вертолета Ψ_B выбирались таким образом, чтобы проверить всеракурсность алгоритма оценивания. Для каждого значения Ψ_B проводились исследования при полете вертолета в стационарном режиме, в режиме зависания, при его ускорении и торможении, когда наблюдение вертолета осуществлялось по оценкам доплеровских частот, обусловленных отражениями от фюзеляжа, а также от вращающихся лопастей винта вертолета, в зависимости от характера полета.

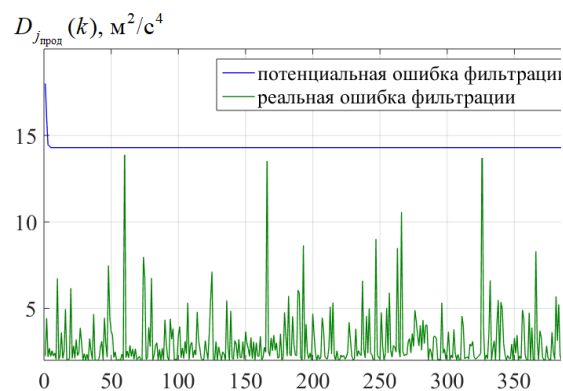
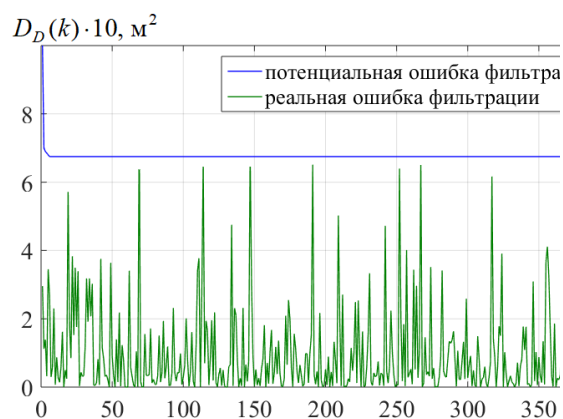
На рисунке 1 (*a – f*) представлены реализации временных зависимостей потенциальных, основанных на решении уравнений Риккати (6), и реальных дисперсий ошибок фильтрации (21) и (31) для дальномерного и угломерного каналов соответственно, наглядно показывающие точность формирования оценок координат состояния, и сходимость оптимального фильтра.



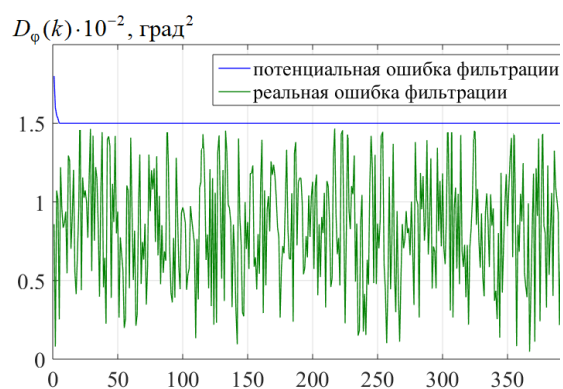
a)



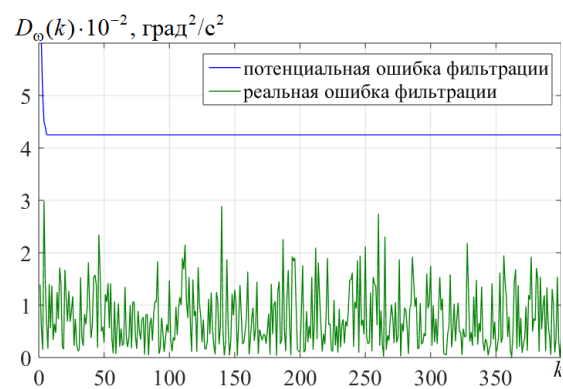
b)



c)



d)



e)

f)

Рисунок 3 – Потенциальная и реальная дисперсии ошибок оценивания

a) скорости фюзеляжа V_{ϕ} вертолета; b) линейной скорости вращения лопасти $V_{\text{л}}$ вертолета; c) дальности D ; d) продольного ускорения $j_{\text{прод}}$; e) угла пеленга ϕ ; f) угловой скорости вращения линии визирования ω

Заключение

Во-первых, в статье представлен синтезированный на основе теории оптимального оценивания алгоритм оценивания координат состояния вертолета при различном характере его полета.

Во-вторых, синтезированный алгоритм оценивания координат состояния устойчиво формирует оценки всех координат для дальномерного и угломерного каналов во всем диапазоне условий применения. При этом как на больших, так и на малых дальностях малые значения ошибок оценивания координат состояния обеспечивают формирование их высокоточных оценок. При формировании оценок линейной скорости вращения лопасти несущего винта вертолета независимо от курса его полета ошибки фильтрации так же незначительны, как при формировании оценок скорости фюзеляжа вертолета.

В-третьих, в качественном плане закон изменения реальных дисперсий ошибок фильтрации во времени повторяет характер потенциальных дисперсий ошибок, однако, реальные точности оценивания несколько хуже потенциальных. В целом, реальная точность оценивания всех координат состояния достаточно высокая.

Список источников

1. Будник А.С. Опыт применения вертолетов армейской авиации в локальных войнах и вооруженных конфликтах // Военная мысль. 2016. № 4. С. 22-26.
2. Федосов Е.А. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография. - М.: Дрофа, 2004. - 256 с.
3. Бельский А.Б., Дибижев А.К., Чобан В.М. Основные тенденции развития бортового оборудования и авиационного вооружения перспективного боевого вертолетного комплекса // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 1. С. 52–59. DOI: [10.18127/j20700784-202101-03](https://doi.org/10.18127/j20700784-202101-03)

4. Богданов А.В., Горбунов С.А., Кучин А.А., Шпортко С.А. Точностные и вероятностные характеристики алгоритма распознавания режима полета вертолета в радиолокационной системе воздушного базирования // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. № 11 (3). С. 358-370. DOI: [10.17516/1999-494X-0048](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0048)
5. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars // Information and Control Systems, 2020, no. 2, pp. 31–36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
6. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса: монография. - М.: Радиотехника, 2018. Т. 1. - 316 с.
7. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Колтышев Е.Е. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Сопровождение одиночных целей: монография. - М.: Радиотехника, 2018. Т. 2. - 486 с.
8. Вексин С.И. Обработка радиолокационных сигналов в доплеровских головках самонаведения. - М.: Изд-во МАИ, 2005. - 244 с.
9. Богданов А.В., Кучин А.А., Горбунов С.А. Экспериментальные исходные данные для синтеза алгоритмов наведения ракеты класса «воздух-воздух» с радиолокационной головкой самонаведения в интересах поражения воздушной цели класса «вертолёт» // XXX Всероссийская научно-практическая конференция школы-семинар «Передача, прием, обработка и отображение информации о

быстропротекающих процессах» (Сочи, 1-9 октября 2019): сборник статей. – М.: Изд-во «Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского», 2019. С. 138–142.

10. Богданов А.В., Горбунов С.А., Кучин А.А., Хадур А.А. Алгоритм наведения управляемой ракеты класса «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения на вертолет при различном характере его полета // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. № 13 (7). С. 829–842. DOI: [10.17516/1999-494X-0269](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0269)

11. Васильев О.В., Макаев В.Е., Щекотилов В.Г. Исследование характеристик радиолокационных сигналов, отраженных от цели типа «вертолет» / Под ред. В.Н. Антипова. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1996.

12. Меркулов В.И., Харьков В.П. Оптимизация радиоэлектронных систем управления. Методы и алгоритмы синтеза оптимального управления (обзор) // Радиотехника. 1998. № 9. С. 2-24.

13. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Робототехнические комплексы на основе БЛА: монография. - М.: Радиотехника, 2016. Кн. 2. - 824 с.

14. Богданов А.В., Закомолдин Д.В. Вероятностные характеристики алгоритма, реализующего метод идентификации уводящей по скорости помехи в бортовой импульсно-доплеровской РЛС // Вестник Военной академии воздушно-космической обороны. 2016. № 1. С. 43-50.

15. Закомолдин Д.В. Методика моделирования сопровождения по скорости воздушной цели при калмановском подходе // I Всероссийская научно-практическая

конференция «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной и противоракетной обороны, космических войск воздушно-космических сил» (Москва, 22 апреля 2016): сборник трудов. - М.: Изд-во «Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского», 2016. С. 58-67.

16. Володко А.М., Верховин М.П., Горшков В.А. Вертолеты. Справочник по аэродинамике полета, конструкции, оборудованию и технической эксплуатации. - М.: Воениздат, 1992. - 557 с.

17. Горбунов С.А., Богданов А.В., Бедрицкий А.И. и др. Способ сопровождения вертолета в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. Патент 2728278 РФ, МПК G 01 S 13/52. Бюлл. № 22, 29.07.20.

18. Лунёв Е.М., Неретин Е.С., Дяченко С.А. Дуброво А.И. Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66366>

19. Дяченко С.А. Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91966>

20. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В., Салихова М.Р. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов // Труды МАИ. 2019. № 106. <https://trudymai.ru/published.php?ID=105685>

References

1. Budnik A.S. *Voennaya mysl'*, 2016, no. 4, pp. 22-26.
2. Fedosov E.A. *Aviatsiya PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnya, zavtra* (Russian air defense aviation and scientific and technical progress: combat complexes and systems of defense, today, tomorrow), Moscow, Drofa, 2004, 256 p.
3. Bel'skii A.B., Dibizhev A.K., Choban V.M. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2021, vol. 75, no. 1, pp. 52–59. DOI: [10.18127/j20700784-202101-03](https://doi.org/10.18127/j20700784-202101-03)
4. Bogdanov A.V., Gorbunov S.A., Kuchin A.A., Shportko S.A. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2018, no. 11 (3), pp. 358-370. DOI: [10.17516/1999-494X-0048](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0048)
5. Shepeta A. P., Nenashev V. A. *Information and Control Systems*, 2020, no. 2, pp. 31–36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
6. Merkulov V.I., Verba V.S., Il'chuk A.R. *Avtomaticheskoe soprovozhdenie tselei v RLS integrirovannykh aviatsionnykh kompleksov. Teoreticheskie osnovy. RLS v sostave integrirovannogo aviatsionnogo kompleksa. Vol.1* (Automatic tracking of targets in the radar of integrated aviation complexes. Theoretical foundations. Radar as part of an integrated aviation complex. Vol. 1), Moscow, Radiotekhnika, 2018, 316 p.
7. Merkulov V.I., Verba V.S., Il'chuk A.R., Koltyshev E.E. *Avtomaticheskoe soprovozhdenie tselei v RLS integrirovannykh aviatsionnykh kompleksov. Soprovozhdenie odinochnykh tselei. Vol. 2.* (Automatic tracking of targets in the radar of integrated aviation complexes. Tracking single targets. Vol. 2), Moscow, Radiotekhnika, 2018, 486 p.

8. Veksin S.I. *Obrabotka radiolokatsionnykh signalov v doplerovskikh golovkakh samonavedeniya* (Processing of radar signals in Doppler homing heads), Moscow, Izd-vo MAI, 2005, 244 p.
9. Bogdanov A.V., Kuchin A.A., Gorbunov S.A. *XXX Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya shkoly-seminar «Peredacha, priem, obrabotka i otobrazhenie informatsii o bystroprotekayushchikh protsessakh»* sbornik statei, Moscow, Izd-vo «Voenno-vozdushnaya inzhenernaya akademiya im. N.E. Zhukovskogo», 2019, pp. 138-142.
10. Bogdanov A.V., Gorbunov S.A., Kuchin A.A., Khadur A.A. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2020, no. 13 (7), pp. 829–842. DOI: [10.17516/1999-494X-0269](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0269)
11. Vasil'ev O.V., Makaev V.E., Shchekotilov V.G. *Issledovanie kharakteristik radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot tseli tipa «vertolet»* (Investigation of the characteristics of radar signals reflected from a helicopter-type target: scientific and methodological materials), Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1996.
12. Merkulov V.I., Khar'kov V.P. *Radiotekhnika*, 1998, no. 9, pp. 2-24.
13. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Robototekhnicheskie komplekxy na osnove BLA. Vol.2.* (Complexes with unmanned aerial vehicles. Robotic complexes based on UAVs. Vol.2), Moscow, Radiotekhnika, 2016, 824 p.
14. Bogdanov A.V., Zakomoldin D.V. *Vestnik Voennoi akademii vozdushno-kosmicheskoi oborony*, 2016, no. 1, pp. 43-50.

15. Zakomoldin D.V. *I Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye voprosy razvitiya vooruzheniya, voennoi i spetsial'noi tekhniki voisk protivovozdushnoi i protivoraketnoi oborony, kosmicheskikh voisk vozdushno-kosmicheskikh sil»*, sbornik trudov, Moscow, Izd-vo «Voenno-vozdushnaya inzhenernaya akademiya im. N.E. Zhukovskogo», 2016, pp. 58-67.

16. Volodko A.M., Verkhozin M.P., Gorshkov V.A. *Vertolety. Spravochnik po aerodinamike poleta, konstruktsii, oborudovaniyu i tekhnicheskoi ekspluatatsii*, (Helicopters. Handbook of flight Aerodynamics, design, equipment and technical operation), Moscow, Voenizdat, 1992, 557 p.

17. Gorbunov S.A., Bogdanov A.V., Bedritskii A.I. et al. *Patent 2728278 RF*, MPK G 01 S 13/52, 29.07.20.

18. Lunev E.M., Neretin E.S., Dyachenko S.A. Dubrovo A.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 86.
URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66366>

19. Dyachenko S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL:
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91966>

20. Generalov A.G., Gadzhiev E.V., Salikhova M.R. *Trudy MAI*, 2019, no. 106.
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105685>

Статья поступила в редакцию 08.11.2022

Статья после доработки 10.11.2022

Одобрена после рецензирования 16.11.2022

Принята к публикации 19.12.2022

The article was submitted on 08.11.2022; approved after reviewing on 16.11.2022; accepted for publication on 19.12.2022