

Научная статья
УДК 623.4
DOI: [10.34759/trd-2022-127-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-16)

СПОСОБ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ЮСТИРОВКИ БОРТОВЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Александр Николаевич Глушков¹, Сергей Николаевич Моисеев²✉,
Аманбай Аватович Испулов³, Андрей Владимирович Филиппов⁴,
Сергей Владимирович Николаев⁵

^{1,2,3,4}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж)», Россия
⁵929 Государственный летно-испытательный центр Министерства обороны Российской Федерации имени В.П. Чкалова, Ахтубинск, Астраханская область, Россия

¹angl243@yandex.ru

²sepgeimoiseev007@yandex.ru✉

⁴sholts290@rambler.ru

Аннотация. В настоящей работе предложен способ оперативной оценки ошибок юстировки радиолокационных и оптико-электронных станций, используемых в прицельно-навигационных комплексах воздушных судов. Ее актуальность связана с тем, что точность юстировки локационных систем определяет потенциальную эффективность авиационных комплексов, поскольку ошибки юстировки вызывают необходимость увеличения полей зрения локационных систем и, как следствие,

приводят к снижению потенциальной эффективности воздушных судов. Их минимизация позволит при сохранении поисковых возможностей локаторов сузить поля их зрения и за счет снижения интегральной фоновой засветки, повысить обнаруживающую способность и пространственное разрешение оптико-электронных систем. В результате будут увеличены дальность обнаружения и вероятность распознавания объектов. Разработанные к настоящему времени способы оценки ошибок юстировки не позволяют в реальных условиях работы оперативно осуществлять коррекцию взаимного расположения диаграмм направленности бортовых локационных систем прицельно-навигационных комплексов, что требует разработки новых методов оценки. Естественными требованиями к этим методам является возможность получения оценок в реальном масштабе времени или близком к нему, а также возможность использования данных оценок для коррекции взаимного расположения полей зрения локаторов. Разработанные к настоящему времени методы оценки не удовлетворяют этим требованиям, что определяет актуальность решаемой задачи. Задача оценки ошибок юстировки бортовых локационных систем поставлена и решена как задача фильтрации, поскольку в общем случае объект исследования является нестационарным. Разработан алгоритм математической формализации поведения ошибок юстировки в процессе полета воздушного судна, позволяющий по полученным значениям их оценок осуществлять коррекцию положения диаграмм направленности локационных систем в реальном масштабе времени. Проведены модельные эксперименты, подтверждающие правильность разработанных решений.

Ключевые слова: воздушное судно, локация, радиолокационная станция, юстировка.

Для цитирования: Глушков А.Н., Моисеев С.Н., Испулов А.А., Филиппов А.В., Николаев С.В. Способ оценки точности юстировки бортовых локационных систем воздушных судов // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-16)

Original article

METHOD FOR ASSESSING THE ACCURACY OF THE ALIGNMENT OF ONBOARD RADAR SYSTEMS OF AIRCRAFT

Alexander N. Glushkov¹, Sergey N. Moiseev²✉, Amanbay A. Ispulov³,
Andrey V. Filippov⁴, Sergey V. Nikolaev⁵

^{1,2,3,4}Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh), Russia

⁵929 State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation named after V.P. Chkalova, Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

¹angl243@yandex.ru

²sepgeimoiseev007@yandex.ru✉

⁴sholts290@rambler.ru

Abstract. The presented article proposes a method for the errors operational evaluation in the alignment of radar and optoelectronic stations applied in navigation and weapon-aiming aircraft complexes. Its actuality is associated with the fact that the alignment accuracy of the location systems determines potential effectiveness of the aviation complexes, since the alignment errors cause the need to increase the location systems fields of vision and, as the result, lead to the aircraft in the potential efficiency decrease. These errors minimization will allow narrowing their fields of vision, while preserving radars search capabilities, and enhancing detecting

capability and spatial resolution of optoelectronic systems by the integral background illumination reduction. As the result, both detection range and the probability of objects recognizing will be enhanced. The currently developed methods for the alignment errors evaluating do not allow performing operational correction of the of directional patterns relative position of the onboard location systems of navigation and weapon-aiming complexes in real operating conditions, which requires new evaluation methods development. Natural requirements for these methods are the possibility of obtaining evaluations in real time or close to it, as well as the possibility of employing these evaluations for correcting relative location of the radars fields of view. Evaluation methods developed as of today do not meet these requirements, which stresses the relevance of the problem being solved. The problem of errors evaluation in the alignment of the onboard location systems is set and solved as a filtration problem, since in general case the object of the study is non-stationary. The authors developed an algorithm for mathematical formalization of the alignment errors behavior during the flight of an aircraft, allowing performing correction of the directional diagrams position of location systems in real time based on the values of their evaluation. Model experiments were conducted to confirm correctness of the developed solutions.

Keywords: aircraft, location, radar station, alignment

For citation: Glushkov A.N., Moiseev S.N., Ispulov A.A., Filippov A.V., Nikolaev S.V. Method for assessing the accuracy of the alignment of onboard radar systems of aircraft.

Trudy MAI, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-16)

Введение. Разработка способа оценки ошибок юстировки радиолокационных и оптико-электронных станций (РЛС и ОЭС соответственно), входящих в состав прицельно-навигационных комплексов (ПНК) воздушных судов (ВС) обусловлено тем, что точность юстировки РЛС и ОЭС определяет потенциальную эффективность ВС [1]. Разработанные к настоящему времени способы оценки точности юстировки не позволяют осуществлять коррекцию взаимного расположения диаграмм направленности бортовых локационных систем ПНК [2].

Актуальность. Совершенствование бортовых ПНК определяет необходимость минимизации их ошибок юстировки [3]. Минимизация ошибок юстировки локационных систем ПНК позволит при сохранении его поисковых возможностей сузить поля зрения локаторов и тем самым, за счет снижения интегральной фоновой засветки, повысить обнаружительную способность и пространственное разрешение ОЭС [4, 5]. Это способствует повышению дальности обнаружения и вероятности распознавания объектов [6]. Решение сформулированной задачи требует разработки (совершенствования) способов оценки ошибок юстировки локационных систем ВС.

Одним из требований к таким способам является возможность получения оценок в реальном масштабе времени (или близком к нему), а также возможность их использования для коррекции взаимного расположения полей зрения локаторов ПНК [7]. Существующие способы оценки не удовлетворяют этим требованиям, что определяет актуальность решаемой задачи [2, 8].

Цель работы состоит в разработке способа оценки ошибок юстировки бортовых РЛС и ОЭС ПНК ВС в процессе его полета.

Задачу оценки ошибок юстировки бортовых РЛС и ОЭС естественно ставить и решать, как задачу фильтрации, поскольку в общем случае объект исследования является нестационарным [9, 10]. Будем рассматривать ее решение применительно к оцениванию по одной координате (углу места β), поскольку по второй, оценивание выполняется аналогично. Опираясь на результаты исследований, опубликованные в [11] и показавшие, что ошибка юстировки бортовых РЛС и ОЭС определяет смещение оценки их разностной ошибки сопровождения цели, в качестве источника информации об искомом параметре будем использовать реализацию упомянутой оценки. Действительно, в соответствии с теорией линейных систем [12] ошибки сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС определяются следующей формулой:

$$\bar{\mathbf{X}}(t) = \bar{\mathbf{X}}_{РЛС}(t) + \bar{\mathbf{X}}_{ОЭС}(t), \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{X}}_{РЛС}(t)$, $\bar{\mathbf{X}}_{ОЭС}(t)$ – векторы, характеризующие ошибки формирования управляющих воздействий бортовыми РЛС и ОЭС.

Учитывая, что для эффективного управления локационными системами достаточно информации о разности между векторами $\bar{\mathbf{X}}_{РЛС}(t)$, $\bar{\mathbf{X}}_{ОЭС}(t)$ на основании (1) оценивание вектора $\bar{\mathbf{X}}$ требует нахождения оценок векторов $\bar{\mathbf{X}}_{РЛС}(t)$, $\bar{\mathbf{X}}_{ОЭС}(t)$ и последующего определения их разности в совпадающие моменты времени. В полете это может быть реализовано с привлечением измерений по вспомогательной цели при условии перевода значений $\bar{\mathbf{X}}_{РЛС}(t)$, $\bar{\mathbf{X}}_{ОЭС}(t)$ в одну систему координат [11]. Одним из эффективных способов нахождения оценки $\bar{\mathbf{X}}$ является фильтр Калмана (ФК) [8]. Это связано с тем, что ФК обладает высокой точностью по критерию минимума

среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценивания [11, 13]. Для своей реализации ФК требует задания моделей движения объекта и измерения его координат.

Обычно в качестве моделей движения объекта для ФК используют модели на основе стохастических конечно разностных уравнений, которые для марковских случайных процессов (наиболее адекватно отражающих ошибки линейных следящих систем) имеют вид [11]:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \xi_y(t), \quad (2)$$

где \mathbf{F} – динамическая матрица состояния; $\xi_y(t)$ – вектор случайных возмущений (формирующий шум), который обычно описывают гауссовским белым шумом с нулевым математическим ожиданием; $\mathbf{X} = [\Delta\beta \Delta\omega]^T$ – вектор состояния.

В задачах оптимального линейного управления измерения обычно описываются уравнением [11]:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t) + \xi_u(t), \quad (3)$$

где $\xi_u(t)$ – шум измерений, принимаемый, как и гауссовский белый шум $\xi_y(t)$, с нулевым математическим ожиданием; \mathbf{H} – матрица связей.

Для уравнений (2) и (3) оценку искомого параметра формируют с помощью ФК, используя следующий алгоритм [4]:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \tilde{\mathbf{X}}_{k+1} - \mathbf{D}_{k+1}, \quad \mathbf{R}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \tilde{\mathbf{I}}_{k+1}, \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_k, \quad \tilde{\mathbf{I}}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{R}_{k+1} \mathbf{\Phi}_k^T + \mathbf{Q}_k, \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \tilde{\mathbf{I}}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1}^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \tilde{\mathbf{X}}_{k+1}, \quad \mathbf{\Theta}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \tilde{\mathbf{I}}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{z_{k+1}}, \quad (7)$$

где $\hat{x}_{k|k}$ – вектор экстраполированных оценок; K – матрица коэффициентов усиления «невязок»; R – корреляционная матрица ошибок фильтрации; $\hat{\Sigma}_k$ – корреляционная матрица ошибок экстраполированных оценок; Φ – фундаментальная матрица; Q – корреляционная матрица формирующих шумов; R_z – корреляционная матрица погрешностей измерений; Θ – корреляционная матрица экстраполированных измерений; I – единичная матрица.

Получение оценок с использованием приведенного алгоритма требует привлечения следующих априорных сведений:

- начального вектора состояния x_0 и корреляционную матрицу ошибок фильтрации начальных оценок;

- матрицу формирующих шумов $Q_{pm} = \langle \xi_y^T \xi_y \rangle$;

- матрицу связей H .

Модели, их описывающие, использованы из [3] и в данной статье не приводятся.

В соответствие с приведенным алгоритмом ФК (4–7) с использованием моделей [12, 14] были проведены исследования результатов фильтрации разностных ошибок сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС ПНК ВС [15].

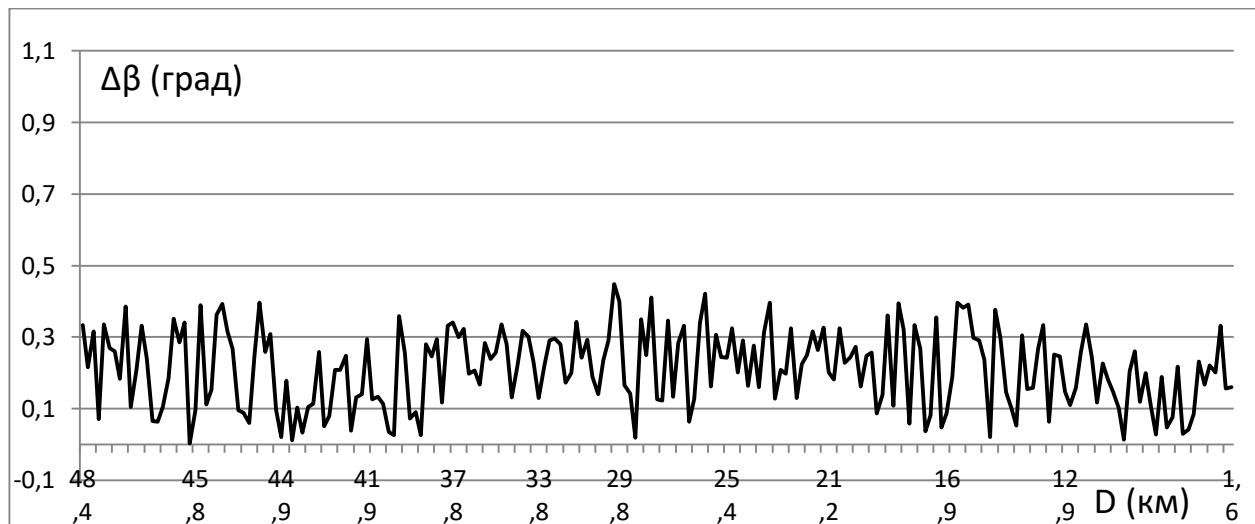
Истинное значение ошибки, формировались с использованием модели, описываемой уравнением второго порядка [16]:

$$\Delta\beta(t) = At^2 + Bt + C.$$

где A, B, C – некоторые коэффициенты полинома.

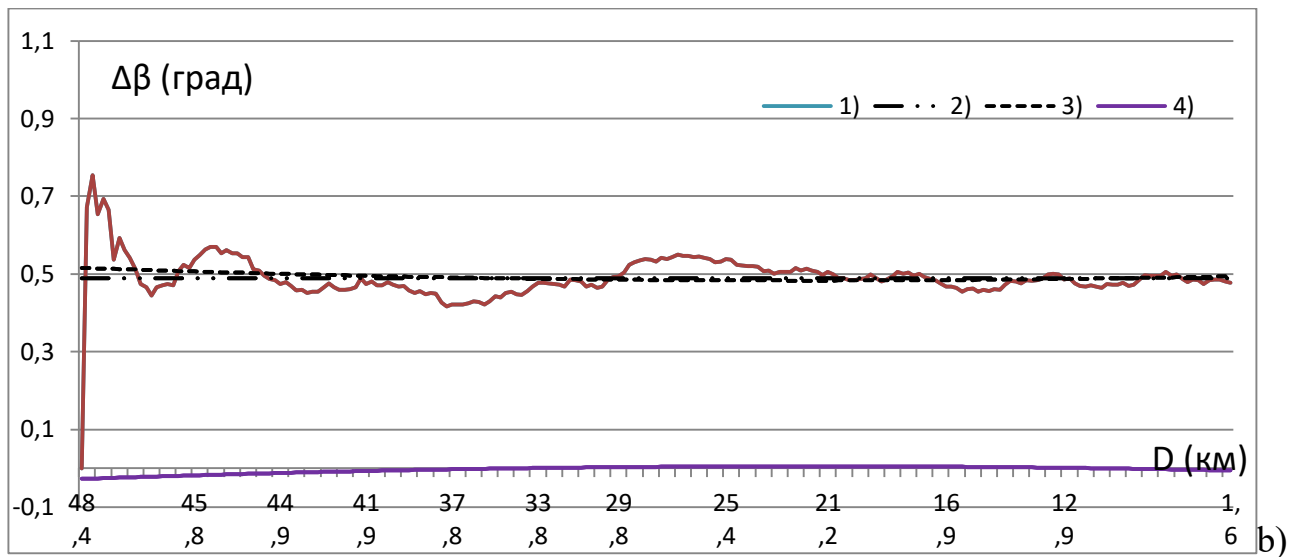
Исходные реализации представлены на рисунках 1, 2, 3 (а). Результаты фильтрации разностных ошибок сопровождения и их исходные значения при различных значениях дисперсии ошибок измерений $\sigma_{изм}^2$ представлены на рисунках 1–3 (b, c, d)

На рисунках 1–3 приняты следующие обозначения: 1 – реализация на выходе ФК; 2 – сглаженное значение разностной ошибки сопровождения; 3 – реализация ошибки оценивания точности юстировки РЛС и ОЭС; 4 – разность между сглаженным значением разностной ошибки сопровождения и ошибкой оценивания точности юстировки РЛС и ОЭС.

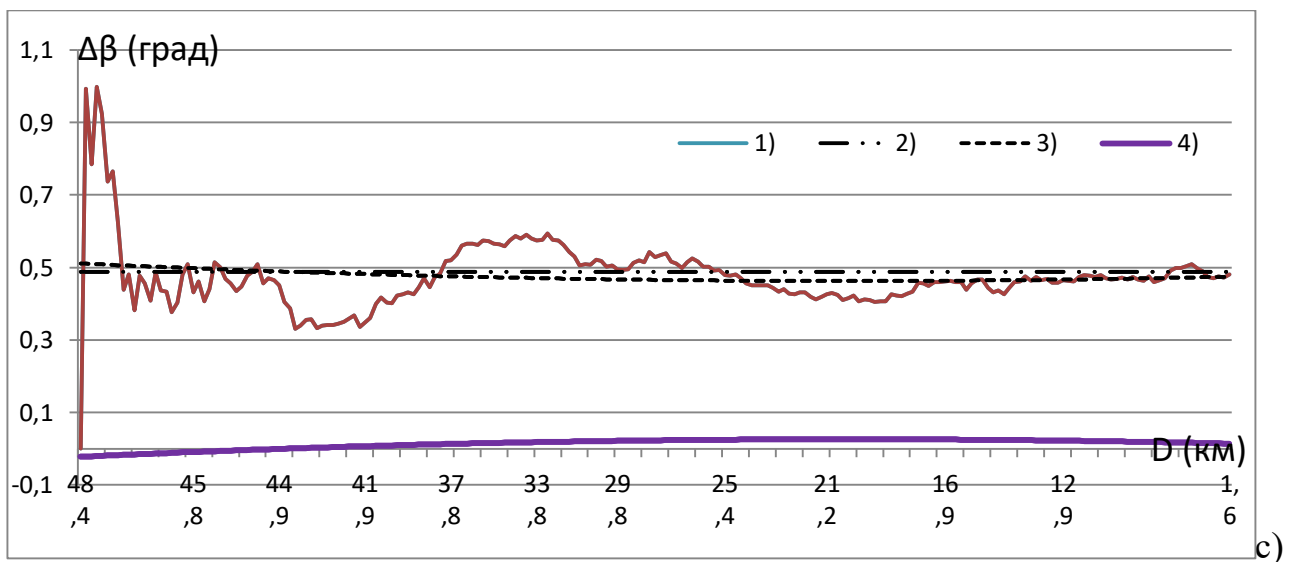


а) Исходная реализация разностной ошибки сопровождения цели РЛС и ОЭС ВС

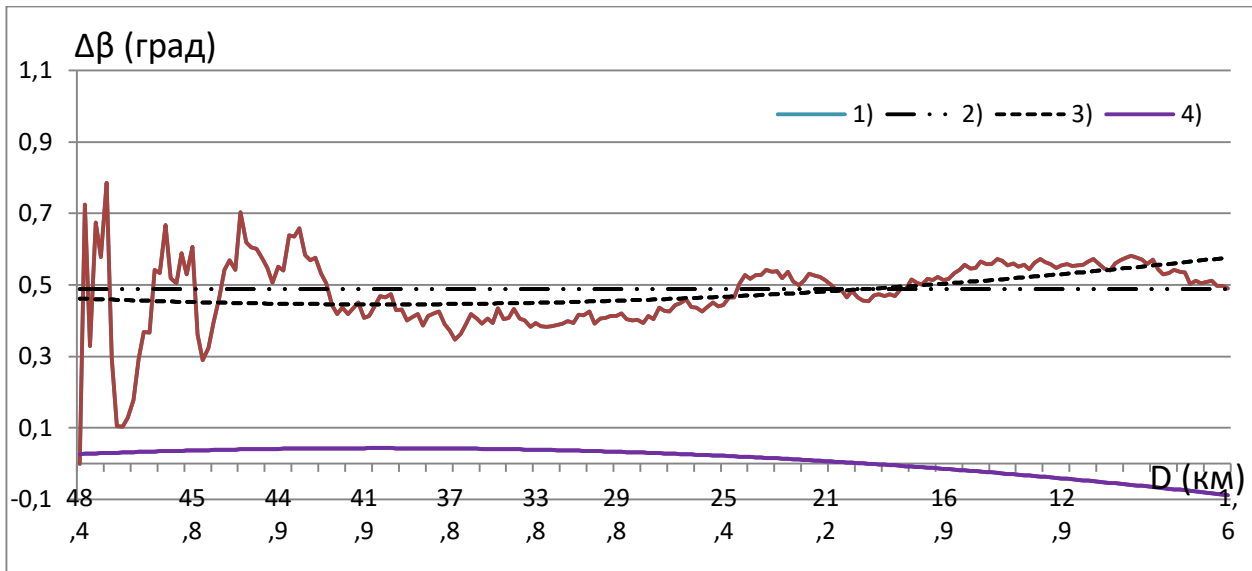
$$\text{при } \Delta\beta(t) = C, A = 0, B = 0$$



Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,1$ град

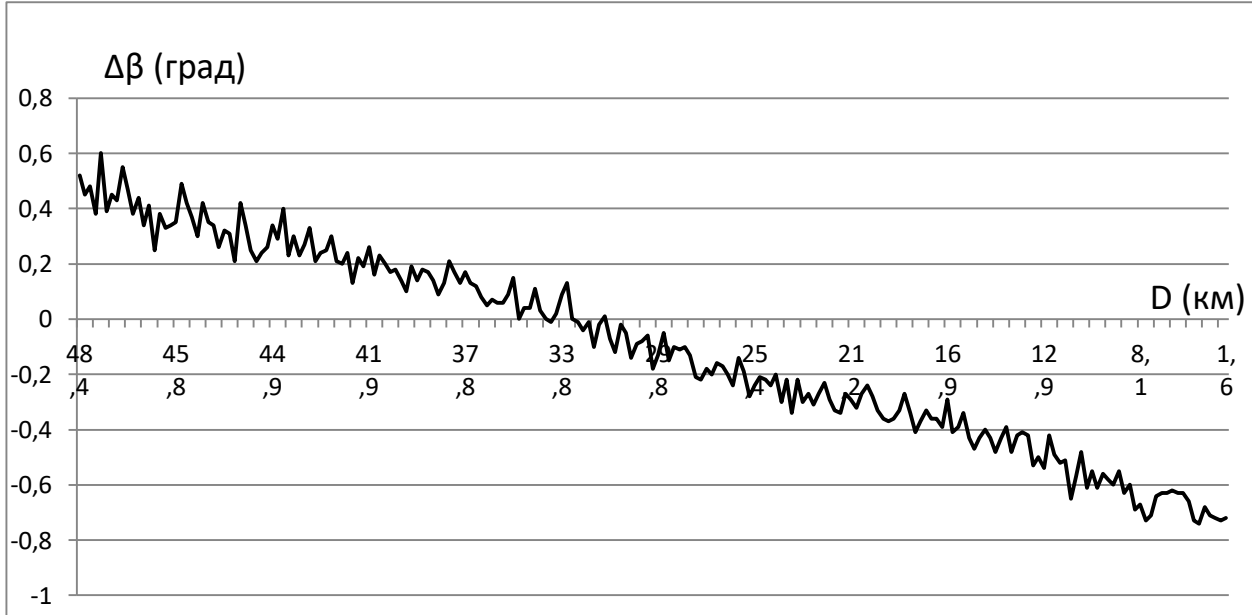


Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,3$ град



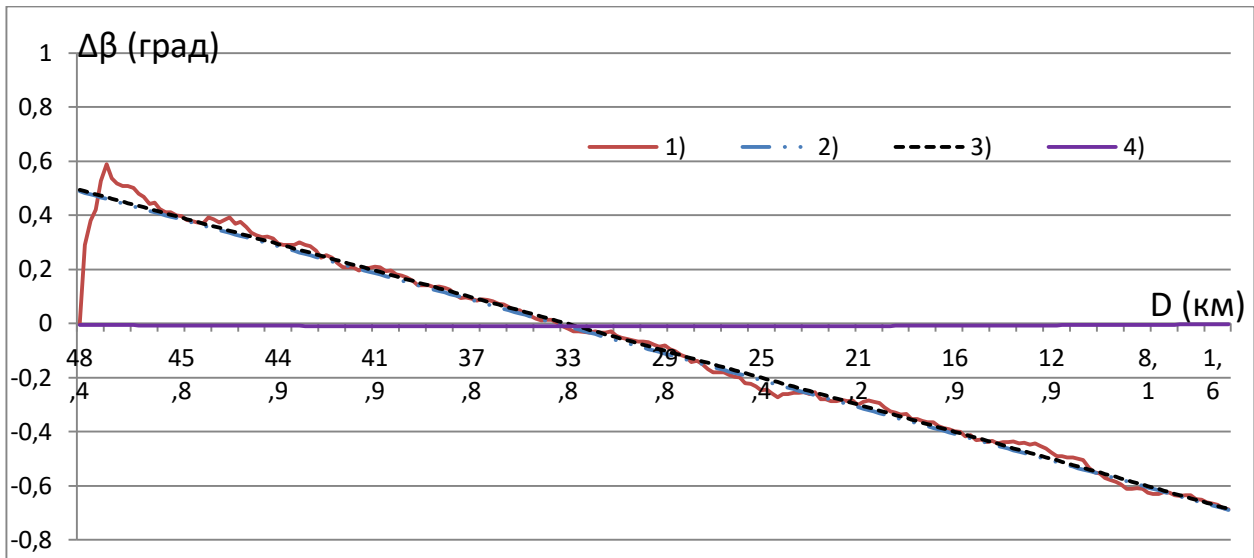
d) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,5$ град

Рисунок 1. Результаты исследований ошибки оценки точности юстировки бортовых РЛС и ОЭС ВС при $A = 0, B = 0$

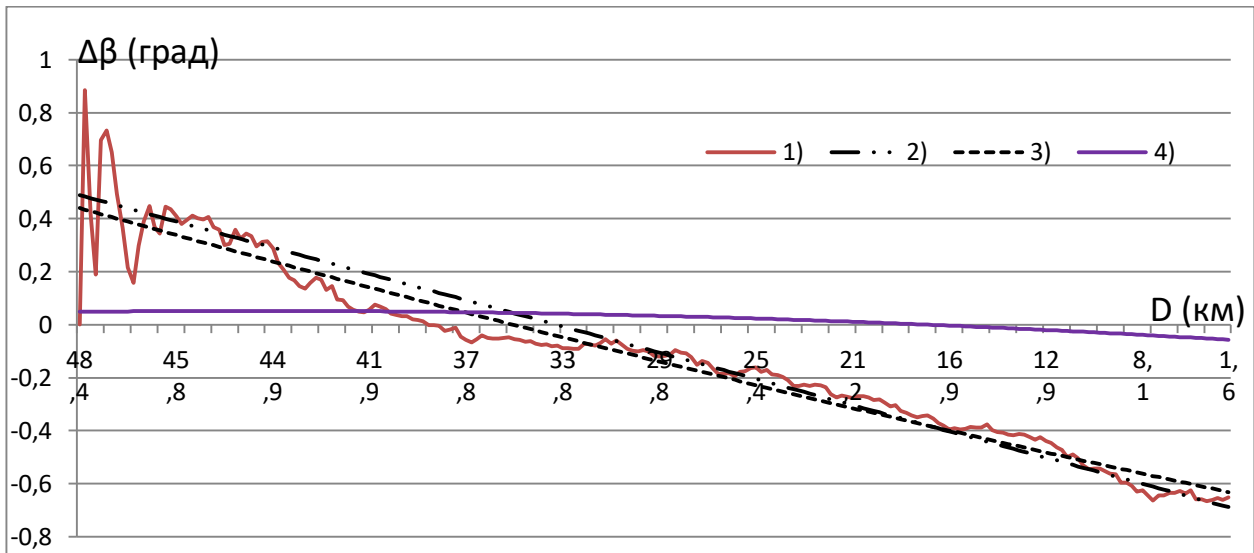


a) Исходная реализация разностной ошибки сопровождения цели РЛС и ОЭС ВС

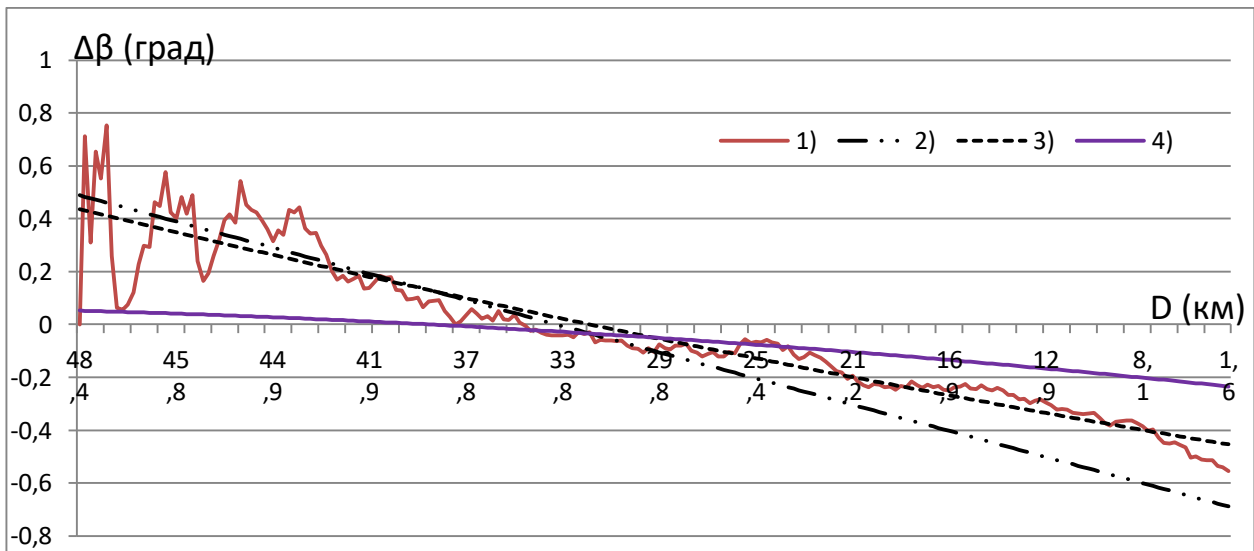
при $\Delta\beta(t) = Bt + C$



б) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,1$ град



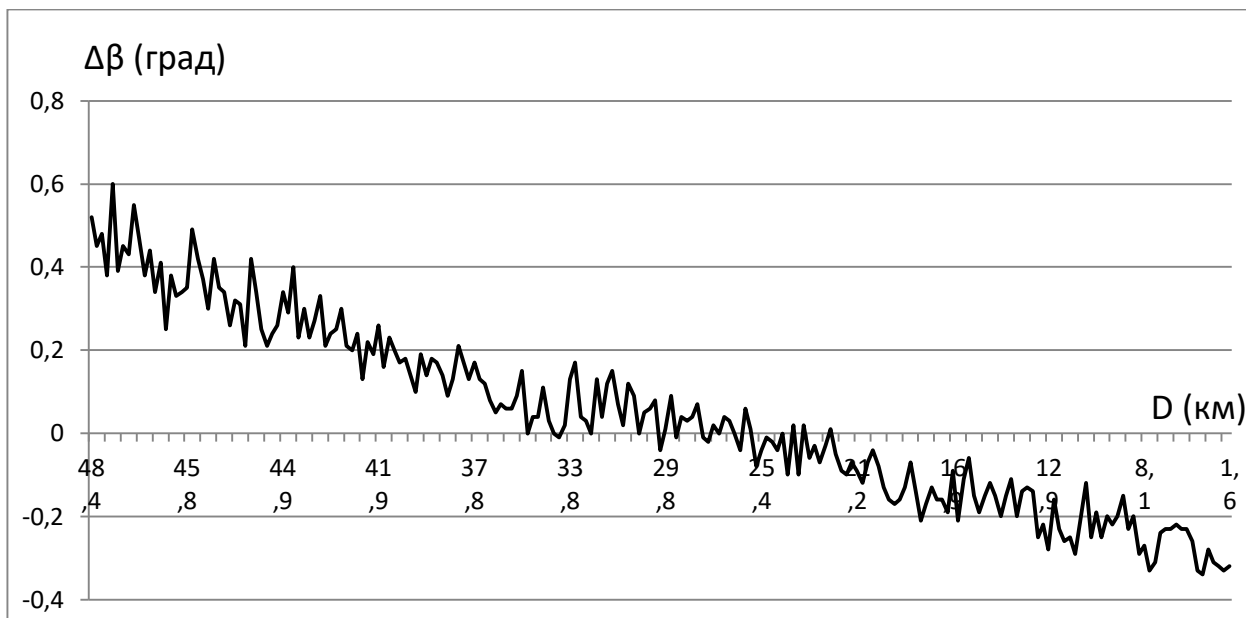
с) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,3$ град



д) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,5$ град

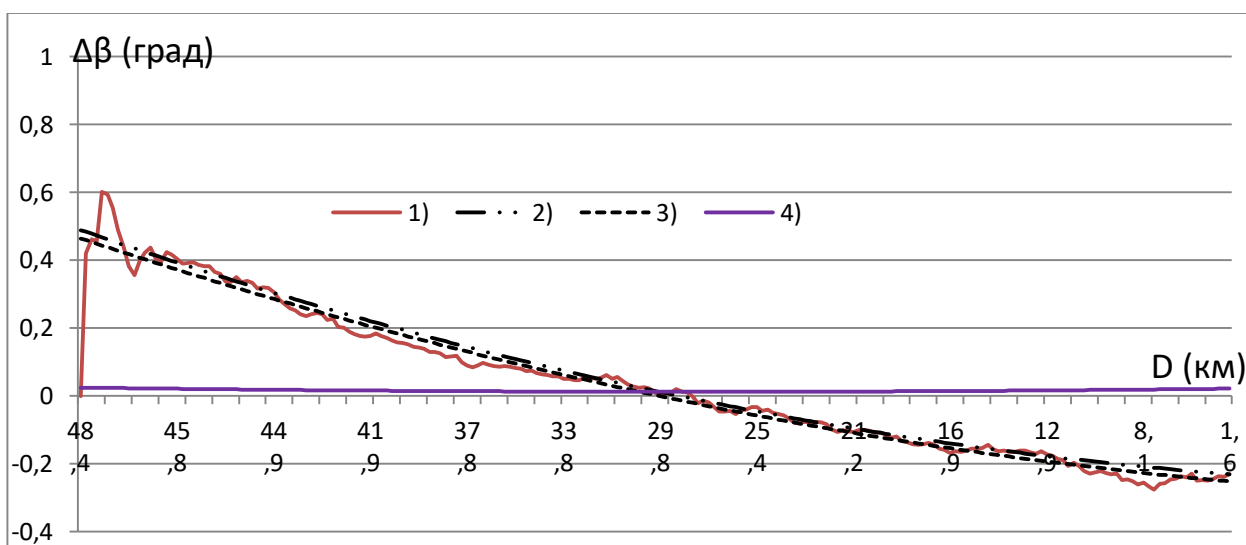
Рисунок 2. Результаты исследований ошибки оценки точности юстировки бортовых

РЛС и ОЭС ВС при $\Delta\beta(t) = Bt + C$

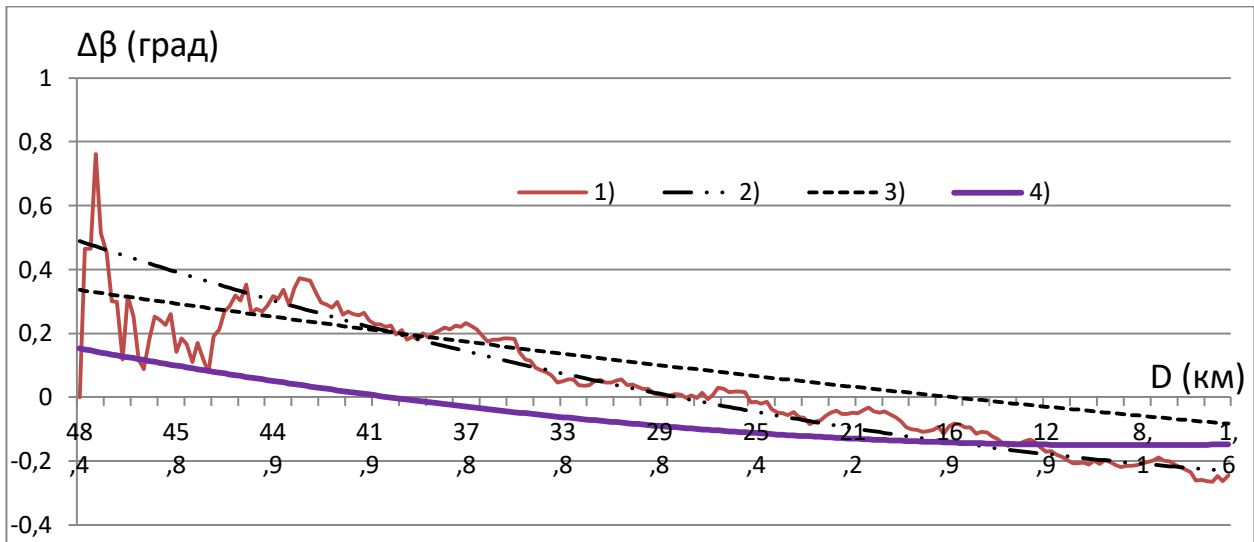


а) Исходная реализация разностной ошибки сопровождения цели РЛС и ОЭС ВС

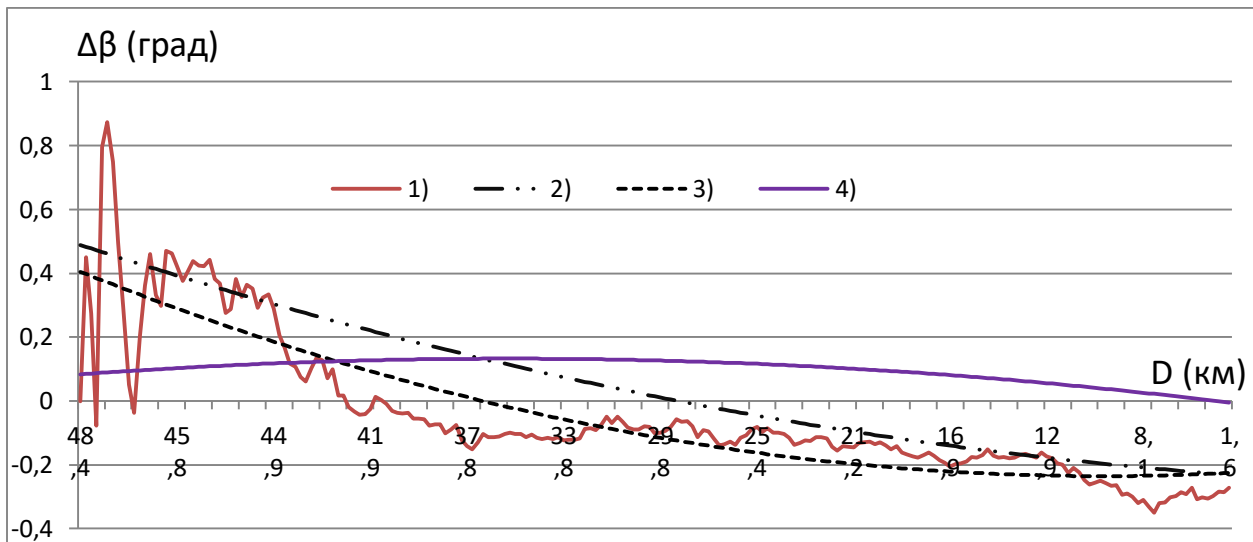
при $\Delta\beta(t) = At^2 + Bt + C$



б) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,1$ град



с) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,3$ град



б) Результат фильтрации разностных ошибок сопровождения при $\sigma = 0,5$ град

Рисунок 3. Результаты исследований ошибки оценки точности юстировки бортовых

$$\text{РЛС и ОЭС ВС при } \Delta\beta(t) = At^2 + Bt + C$$

Из рисунков 1–3 видно, что в результате фильтрации разностной ошибки сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС происходит сглаживание высокочастотных составляющих ошибки при этом поведение ее низкочастотных составляющих (смещения) для принятой модели $\Delta\beta(t)$ сохраняется. Учитывая, что

ошибки юстировки бортовых РЛС и ОЭС являются медленно меняющимися функциями времени, то в «чистом виде» результат фильтрации для минимизации упомянутых ошибок использовать нецелесообразно и желательно иметь уравнения, отражающие поведение упомянутых ошибок в зависимости от параметров обрабатываемых реализаций. С целью формализации этих уравнений проведем сглаживание результатов фильтрации разностных ошибок сопровождения цели с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [17, 18]. В таблице 1 представлены значения коэффициентов A, B, C аппроксимирующего уравнение движения полинома и результаты их оценки с помощью МНК (соответственно $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$).

Представленные данные нормированы на размер по соответствующей координате квадрата поля оцифровки локационной информации ПНК. Величина $m_{оц}$ в таблице представляет ошибку оценки точности юстировки, которая определялась по формуле: $m_{оц} = x - \hat{x}$, где x, \hat{x} – истинное (заданное) и формализованное с помощью МНК значение ошибки юстировки.

Разработанный способ оценки точности юстировки бортовых РЛС и ОЭС заключается в следующем [19–22].

Таблица 1. Точность оценки ошибок юстировки бортовых РЛС и ОЭС ВС

$\sigma_{изм}$, град	A / \hat{A}	B / \hat{B}	C / \hat{C}	$m_{оц}$
0,1	$10^{-5} / 9,056 \cdot 10^{-6}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -5,283 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,464	$\leq 0,02$
	$0 / -5,45 \cdot 10^{-7}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -5,395 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,494	$\leq 0,01$

	$0 / 1,781 \cdot 10^{-6}$	$0 / -4,829 \cdot 10^{-4}$	0,4885/0,516	$\leq 0,005$
0,3	$10^{-5} / -2,0611 \cdot 10^{-6}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -2,4 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,336	$\leq 0,08$
	$0 / 3,321 \cdot 10^{-6}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -5,718 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,44	$\leq 0,02$
	$0 / 2,369 \cdot 10^{-6}$	$0 / -6,768 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,511	$\leq 0,01$
0,5	$10^{-5} / 1,767 \cdot 10^{-5}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -6,727 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,405	$\leq 0,22$
	$0 / 3,607 \cdot 10^{-6}$	$-5,5 \cdot 10^{-3} / -4,931 \cdot 10^{-3}$	0,4885/0,436	$\leq 0,14$
	$0 / 5,251 \cdot 10^{-6}$	$0 / -5,897 \cdot 10^{-4}$	0,4885/0,462	$\leq 0,08$

Для измерения привлекаются два ВС. После взлета и набора высоты они, двигаясь друг за другом, расходятся на расстояние, определяемое предельной дальностью взаимного обнаружения ОЭС. Высота полета определяется из условия минимального влияния атмосферы (туман, дымка, облачность) на дальность обнаружения ОЭС. Затем ВС с юстируемой локационной системой, двигаясь прямолинейно и равномерно начинает сближение с крейсерской скоростью полета с ВС целью. Сближение осуществляется до минимальной дальности работы локационных средств. В бортовых ЭВМ осуществляется регистрация реализаций ошибок автосопровождения. По зарегистрированным реализациям на борту каждого ВС определяется разностная ошибка сопровождения цели. В реализации, которой оценивается высокочастотная составляющая, после чего с использованием МНК в предположении, что разностная ошибка описывается уравнением второго порядка, осуществляется сглаживание отфильтрованных значений разностных ошибок и определяются значения коэффициентов полиномов уравнения, описывающего поведение ошибок в зависимости от дальности измерения [12, 23, 24]. Для каждого

ВС, участвовавшего в измерениях полученные уравнения формализуют поведение ошибок юстировки бортовых РЛС и ОЭС в зависимости от дальности до цели. При обеспечении точности измерения разностной ошибки $\sigma_{изм} \leq 0,3$ потенциальная точность оценки будет не превышать 8 % от размера квадранта поля оцифровки локационной информации.

Выводы. Полученные результаты показывают, что точность оценки ошибки юстировки бортовых РЛС и ОЭС воздушного судна по величине их разностной ошибки сопровождения цели тем выше, чем точнее описана модель ошибки. Так при $\sigma_{изм} \leq 0,3$ погрешность оценивания ошибки юстировки бортовых РЛС и ОЭС не превышает 8 % от размера квадранта поля оцифровки локационной информации. Это позволяет использовать для оценки точности юстировки локационных датчиков ПНК ВС информацию о величине разностной ошибки сопровождения ими цели.

Список источников

1. Першин Н.А. Оценка эффективности авиационных комплексов различных типов. – Иркутск: ИВАИИ, 2005. – 84 с.
2. Лебедев Л.А., Федоров В.В. Источники ошибок и пути поддержания заданных точностных характеристик применения авиационных средств поражения самолетами военного назначения // Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях»: сборник статей. – Люберцы, НИЦ ЦНИИ ВВС МО РФ, 2018. С. 88-93.

3. Краснов А.М. Авиационные прицельные системы. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. – 523 с.
4. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. – М.: Советское радио, 1991. – 232 с.
5. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. – М.: Машиностроение, 1991. – 234 с.
6. Моисеев С.Н., Потапов А.Н. Анализ методов исследования точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения воздушных целей // XXXX Военно-научная конференция НИЦ ЦНИИ ВВКО Минобороны России: научно-методический сборник. – Тверь: НИЦ ЦНИИ ВВКО Минобороны России, 2014. – С. 109-118.
7. Каменский К.В. Влияние траекторных неустойчивостей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
8. Моисеев С.Н., Потапов А.Н. Проблемные вопросы летных исследований точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения воздушных целей // Всероссийская научно–практическая конференция курсантов, слушателей, молодых ученых, посвященная Дню образования войск связи: сборник статей. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2013. С. 246-251.
9. Краснов А.М. Основы анализа авиационных прицельно-навигационных систем. – М.: ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2009. – 318 с.

10. Лукин В.Н., Чечиков Ю.Б., Секретарев В.Е., Дзюбенко А.Л., Алтухова Н.Ф. Проблемы сопровождения аппаратно-программных комплексов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165573>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-21)
11. Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан А.О. Обработка изображений в пассивных обзорно-поисковых оптико-электронных системах. - Минск: Белорусская наука, 2014. – 116 с.
12. Зингер Р. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная электроника. 1971. № 8. С. 40-57.
13. Летфуллин И.Р. Стандарты и технологии беспроводных сетей связи ближнего радиуса действия // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167069>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-14)
14. Леонов С.А. Основы теории точности радиолокационных измерений подвижных объектов. – Л.: Судостроение, 1991. – 167 с.
15. Герасимов И.В., Кирпичников А.С., Моисеев С.Н., Олешко В.С., Потапов А.Н., Ткаченко Д.П. Математическая модель процесса исследований точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения воздушных целей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 23. С. 235-241.
16. Моисеев С.Н. Моделирование разностной ошибки сопровождения целей бортовыми радиолокационными и оптико-электронными станциями // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167071>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-16)

17. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиопреуправления. Т. 1. Принципы построения систем радиопреуправления. Основы синтеза и анализа. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высшая школа, 1999. – С. 351–356.
19. Ананьев А.В., Иванников К.С., Кажанов А.П. Модель авиационного поражения целей на основе нестационарных марковских случайных процессов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165564>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)
20. Бар-Шалом Я., Ли Х.-Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: пер. с англ. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. Ч. 1. - 271 с.
21. Демин Д.С., Кононенко П.И., Лебедеико В.И., Прилуцкий А.А., Резниченко В.И., Сидорчук Е.А., Сысоев В.К., Хмель Д.С. Концепция бортового радиолокатора на основе АФАР с использованием рефлектора с отверждаемым пневмокаркасом // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159790>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-12)
22. Моисеев С.Н., Филиппов А.В., Лебедев В.В., Глушков А.Н., Мещеряков А.В., Боровков А.А., Моисеев П.А. Способ юстировки бортовых радиолокационной и оптико-электронной станций летательного аппарата. Патент RU 2757679, 20.10.2021.
23. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)

24. Картуков А.В., Меркишин Г.В., Назаров А.Н., Егоров В.В. Использование изображений объектов для анализа параметров воздушной среды в окрестности движущихся объектов // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116371>. DOI: DOI: [10.34759/TRD-2020-112-12](https://doi.org/10.34759/TRD-2020-112-12)

References

1. Pershin N.A. *Otsenka effektivnosti aviatsionnykh kompleksov razlichnykh tipov* (Evaluation of the effectiveness of aviation complexes of various types), Irkutsk, IVAIL, 2005, 84 p.
2. Lebedev L.A., Fedorov V.V. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy ekspluatatsii aviatsionnoi tekhniki v sovremennykh usloviyakh»*: sbornik statei, Lyubertsy, NITs TsNII VVS MO RF, 2018, pp. 88-93.
3. Krasnov A.M. *Aviatsionnye pritsel'nye sistemy* (Aviation sighting systems), Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 2006, 523 p.
4. Maizel's E.N., Torgovanov V.A. *Izmerenie kharakteristik rasseyaniya radiolokatsionnykh tselei* (Measurement of scattering characteristics of radar targets), Moscow, Sovetskoe radio, 1991, 232 p.
5. Babich O.A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* (Information processing in navigation systems), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 234 p.
6. Moiseev S.N., Potapov A.N. *XXXX Voенно-nauchnaya konferentsiya NITs TsNII VVKO Minoborony Rossii: nauchno-metodicheskii sbornik*, Tver', NITs TsNII VVKO Minoborony Rossii, 2014, pp. 109-118.

7. Kamenskii K.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
8. Moiseev S.N., Potapov A.N. *Vserossiiskaya nauchno–prakticheskaya konferentsiya kursantov, slushatelei, molodykh uchenykh, posvyashchennaja Dnyu obrazovaniya voisk svyazi: sbornik statei*, Voronezh, VUNTs VVS «VVA im. professora N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina», 2013, pp. 246-251.
9. Krasnov A.M. *Osnovy analiza aviatsionnykh pritsel'no-navigatsionnykh system* (Fundamentals of analysis of aviation sighting and navigation systems), Moscow, VVIA im. professora N.E. Zhukovskogo, 2009, 318 p.
10. Lukin V.N., Chechikov Yu.B., Sekretarev V.E., Dzyubenko A.L., Altukhova N.F. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165573>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-21)
11. Artem'ev V.M., Naumov A.O., Kokhan A.O. *Obrabotka izobrazhenii v passivnykh obzorno-poiskovykh optiko-elektronnykh sistemakh* (Image processing in passive surveillance and search optoelectronic systems), Minsk, Belorusskaya nauka, 2014, 116 c.
12. Zinger R. *Zarubezhnaya elektronika*, 1971, no. 8, pp. 40-57.
13. Letfullin I.R. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167069>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-14)
14. Leonov S.A. *Osnovy teorii tochnosti radiolokatsionnykh izmerenii podvizhnykh ob"ektov* (Fundamentals of the theory of accuracy of radar measurements of moving objects), Leningrad, Sudostroenie, 1991, 167 p.

15. Gerasimov I.V., Kirpichnikov A.S., Moiseev S.N., Oleshko V.S., Potapov A.N., Tkachenko D.P. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 23, pp. 235-241.
16. Moiseev S.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167071>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-16)
17. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya. Vol. 1. Printsipy postroeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiza* (Aircraft radio control systems. Vol. 1. Principles of building radio control systems. Fundamentals of synthesis and analysis), Moscow, Radiotekhnika, 2003, 192 p.
18. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* (Probability theory), Moscow, Vysshaya shkola, 1999, pp. 351–356.
19. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S., Kazhanov A.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165564>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)
20. Bar-Shalom Ya., Li H.-R. *Traektoraya obrabotka. Printsipy, sposoby i algoritmy* (Trajectory processing. Principles, methods and algorithms), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2011, Part. 1, 271 p.
21. Demin D.S., Kononenko P.I., Lebedenko V.I., Prilutskii A.A., Reznichenko V.I., Sidorchuk E.A., Sysoev V.K., Khmel' D.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159790>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-12)
22. Moiseev S.N., Filippov A.V., Lebedev V.V., Glushkov A.N., Meshcheryakov A.V., Borovkov A.A., Moiseev P.A. *Patent RU 2757679*, 20.10.2021.
23. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V., Maljutina O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)

24. Kartukov A.V., Merkishin G.V., Nazarov A.N., Egorov V.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116371>. DOI: [10.34759/TRD-2020-112-12](https://doi.org/10.34759/TRD-2020-112-12)

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

Статья после доработки 23.10.2022

Одобрена после рецензирования 30.09.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 20.09.2022; approved after reviewing on 30.09.2022; accepted for publication on 26.12.2022