

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ГНСС НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ

С.С. Лысов, lysovss@susu.ru

Н.В. Дударев, dudarevnn@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8374-5435>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Полетные миссии требуют высокой точности управления аппаратом, особенно на этапах взлета и посадки. Это во многом относится к рассмотрению влияния размещения антенн ГНСС на цилиндрическом корпусе ЛА и связанной с этим точности определения углового положения, что критически важно для успешного выполнения миссии. **Цель работы:** повышение точности определения углового положения (крена, тангажа и рыскания) летательного аппарата на критических этапах полета, таких как посадка, за счет оптимизации взаимного расположения антенн спутниковой навигационной системы на его цилиндрическом корпусе. Исследование направлено на минимизацию влияния шума измерений координат на результирующую ошибку вычисления углов ориентации. **Материалы и методы.** Для решения задачи оптимизации применялись и сравнивались два алгоритма: «жадный» алгоритм, направленный на выбор максимально удаленных друг от друга точек размещения, и RANSAC-алгоритм, основанный на устойчивой выборке случайных подмножеств. Критерием оптимизации служила минимизация стандартного отклонения ошибки определения углов Эйлера. Эффективность полученных конфигураций оценивалась методом статистического моделирования со 100 итерациями для различных уровней шума координат. Зависимость ошибки ориентации от ошибки позиционирования анализировалась с помощью линейной регрессии и коэффициента детерминации. Проведено сравнение коэффициентов передачи шума с теоретической оценкой для неоптимизированного размещения. **Результаты.** Проведено сравнение «жадного» алгоритма оптимизации размещения антенн приемников ГНСС и RANSAC-алгоритма. Найдена наилучшая конфигурация, обеспечивающая снижение коэффициента передачи по сравнению с теоретической оценкой. Выявлена близкая к линейной зависимость ошибки определения углов от ошибки измерения координат. **Заключение.** Показана важность оптимизации взаимного расположения приемников для точного определения ориентации летательного аппарата. Наиболее эффективным и надежным методом для размещения приемников на цилиндрическом корпусе признан «жадный» алгоритм. Его применение позволяет существенно повысить точность определения углового положения на этапах полета, чувствительных к ошибкам ориентации, таких как взлет и посадка. Результаты работы формируют практические рекомендации для повышения надежности систем ориентации.

Ключевые слова: радионавигация, угловое положение, глобальные навигационные спутниковые системы, летательный аппарат, алгоритмы оптимизации, посадка, шум измерений

Благодарности. Работа проводилась в рамках государственного задания № FENU-2024-0004 (2024024ГЗ).

Для цитирования: Лысов С.С., Дударев Н.В. Влияние взаимного расположения приемников ГНСС на точность определения углового положения летательного аппарата на этапе посадки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 61–71. DOI: 10.14529/ctcr260105

THE EFFECT OF THE RELATIVE POSITION OF THE GNSS RECEIVERS ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE ANGULAR POSITION OF THE AIRCRAFT AT THE LANDING STAGE

S.S. Lysov, lysovss@susu.ru

N.V. Dudarev, dudarevnnv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8374-5435>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Flight missions require high precision control of the vehicle, especially during the takeoff and landing stages. This largely relates to the consideration of the influence of the placement of GNSS antennas on the cylindrical body of the aircraft and the associated accuracy of determining the angular position, which is critically important for the successful completion of the mission. **The purpose of the work.** Improving the accuracy of determining the angular position (roll, pitch and yaw) of an aircraft at critical stages of flight, such as landing, by optimizing the relative position of the satellite navigation system antennas on its cylindrical body. The research is aimed at minimizing the effect of coordinate measurement noise on the resulting error in calculating orientation angles. **Materials and methods.** To solve the optimization problem, two algorithms were used and compared: a “greedy” algorithm aimed at selecting the most distant placement points from each other, and a RANSAC algorithm based on a stable sample of random subsets. The optimization criterion was the minimization of the standard deviation of the error in determining the Euler angles. The effectiveness of the obtained configurations was evaluated by statistical modeling with 100 iterations for various levels of coordinate noise. The dependence of the orientation error on the positioning error was analyzed using linear regression and the coefficient of determination. The noise transmission coefficients are compared with the theoretical estimate for an unoptimized placement. **Results.** A comparison is made between the “greedy” algorithm for optimizing the placement of GNSS receiver antennas and the RANSAC algorithm. The best configuration has been found, providing a reduction in the transmission coefficient compared to the theoretical estimate. A close to linear dependence of the error in determining angles on the error in measuring coordinates has been revealed. **Conclusion.** The importance of optimizing the relative position of the receivers for accurately determining the orientation of the aircraft is shown. The “greedy” algorithm is recognized as the most effective and reliable method for placing receivers on a cylindrical body. Its use makes it possible to significantly improve the accuracy of determining the angular position at flight stages sensitive to orientation errors, such as takeoff and landing. The results of the work form practical recommendations for improving the reliability of orientation systems.

Keywords: radio navigation, angular position, global navigation satellite systems, aircraft, optimization algorithms, landing, measurement noise

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of state assignment No. FENU-2024-0004 (2024024GZ).

For citation: Lysov S.S., Dudarev N.V. The effect of the relative position of the GNSS receivers on the accuracy of determining the angular position of the aircraft at the landing stage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(1):61–71. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260105

Введение

Современные аэрокосмические задачи предъявляют исключительно высокие требования к точности и надежности управления полетом. Ключевым аспектом их успешного решения является непрерывный и высокоточный мониторинг параметров движения аппарата. В частности, наибольшее внимание к отслеживанию и мониторингу состояния летательного аппарата (ЛА) требуется на этапах взлета и посадки. Наряду с определением местоположения критически важным становится знание углового положения (ориентации) ЛА в пространстве, описываемого углами крена, тангажа и рыскания. Точность определения этих параметров напрямую влияет на эффективность работы системы управления, корректность выполнения маневров, расход топлива и, в конечном счете, на успех всей миссии [1, 2].

Основным инструментом для решения навигационных задач на этапах взлета и посадки является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). Однако стандартные ГНСС-приемники предоставляют данные исключительно о координатах и скорости своей антенны, что недостаточно для полноценного определения ориентации объекта. Для получения информации об угловом положении применяются функциональные дополнения, а именно – алгоритмы пространственного кинематического позиционирования, использующие данные с нескольких антенн, жестко закрепленных на корпусе летательного аппарата. Взаимное расположение этих антенн формирует так называемые базы, анализ разности фаз сигналов или их квазидальностей на которых позволяет с высокой точностью вычислить углы ориентации аппарата.

Точность определения углового положения оказывается в прямой зависимости от двух основных факторов: уровня шумов измерений координат самими приемниками и геометрического фактора – взаимного расположения этих приемников на конструкции ракеты-носителя [3]. Данное исследование посвящено анализу второго фактора. В работе моделируется влияние различных конфигураций размещения антенн ГНСС на цилиндрическом корпусе ракеты-носителя на итоговую точность оценивания ее углов Эйлера, что является критически важным для обеспечения надежного контроля на этапах взлета и посадки летательных аппаратов [4].

Моделирование расположения приемников ГНСС на борту ЛА

Тело ЛА, на котором можно разместить приемники ГНСС, в приближении можно рассматривать как цилиндр. Возьмем в качестве примера цилиндр радиуса 275 см и длины 3000 см.

На борту ЛА необходимо расположить 3 приемника ГНСС в заранее определенных точках таким образом, чтобы расстояние между любыми двумя соседними приемниками ГНСС, называемое базой, было больше среднеквадратичного отклонения (СКО) измерений по всем трем координатам, и при этом три приемника не должны находиться на одной линии (рис. 1а, б) [5]. В примерах на рис. 1 приемники A, B, C образуют базы AB, BC, CA и векторную плоскость S .

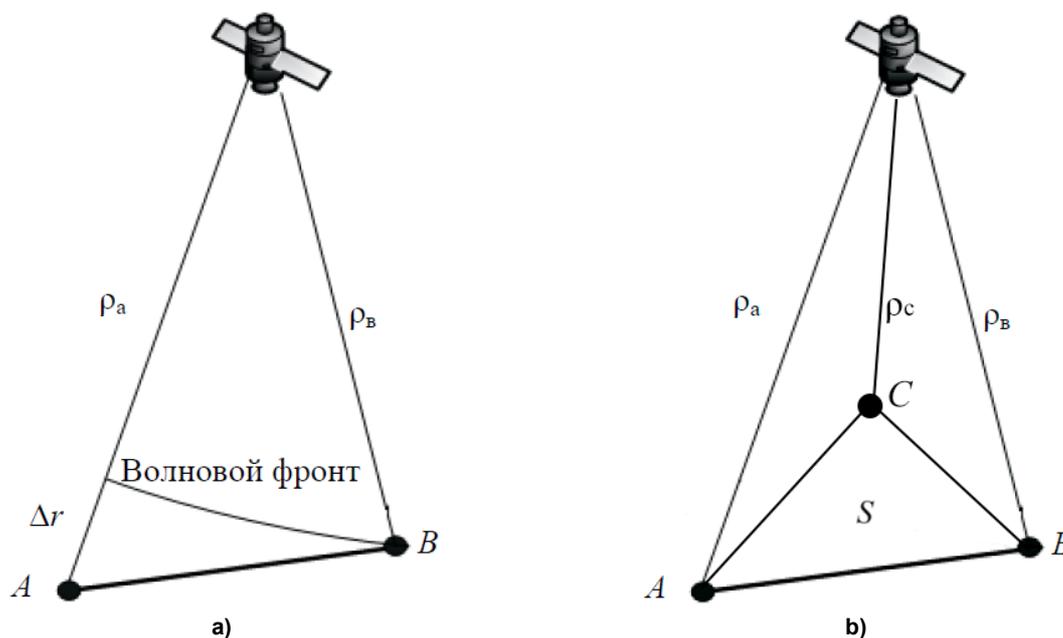


Рис. 1. Базы приемников: а – база двух приемников; б – базы трех приемников
Fig. 1. Axis of receivers: a – axis of two receivers; b – axis of three receivers

Тогда необходимо подобрать базы трех приемников таким образом, чтобы они давали наименьшую погрешность в определении угловых положений ЛА, то есть углов Эйлера [6]. Для этого необходимо применить алгоритмы оптимизации размещения приемников ГНСС на поверхности тела ЛА с критерием оптимизации – наименьшее влияние шума определения координат на шум определения углов Эйлера:

$$\sigma_{\varphi, \gamma, \theta} = f(\sigma_{x, y, z}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\sigma_{\varphi, \gamma, \theta}$ – СКО шума определения углов Эйлера ЛА; $\sigma_{x, y, z}$ – СКО шума определения координат приемников ГНСС в системе координат ENU: East – Восток (координата x), North – Север (координата y), Up – Верх (координата z).

Были применены два алгоритма: «жадный» алгоритм и RANSAC-алгоритм. В результате были подобраны по три точки на теле ЛА, где будет наилучшим образом выполняться критерий (1).

Описание «жадного» алгоритма [7, 8].

Требуется выбрать три неколлинеарные опорные точки, максимально удаленные друг от друга. Алгоритмические шаги:

1. Выбор первой точки A . Берется точка с минимальной координатой x :

$$A = \arg(\min_i(x_i)), \quad (2)$$

где x_i – координата i -й точки перебора; $\arg(\min(f(x)))$ – значение минимума функции.

2. Выбор второй точки B . Берется наиболее удаленная от первой точки A точка:

$$B = \arg\left(\max_i(\|p_i - p_A\|)\right), \quad (3)$$

где p_i – координаты i -й точки перебора; p_A – координаты точки A ; $\arg(\max(f(x)))$ – значение максимума функции.

3. Выбор третьей точки C . Выбирается точка, которая, во-первых, максимизирует минимальное расстояние до первых двух точек, во-вторых, неколлинеарна с ними:

$$C = \arg\left(\max_{i \notin \{A, B\}}(\min(\|p_i - p_A\|, \|p_i - p_B\|))\right) \Bigg|_{\|p_B - p_A\| \times \|p_i - p_A\| > 10^{-6}}, \quad (4)$$

где p_B – координаты точки B .

Описание алгоритма RANSAC [9].

Требуется найти тройку точек, которая дает наилучшее совмещение с шумными данными через максимизацию числа инлайеров.

Инлайеры – это точки, для которых евклидово расстояние между преобразованной точкой N и ее зашумленной версией меньше заданного порога τ :

$$\|R(p_i - N_{\text{оп}}) + N_{\text{шум}} - q_i\| < \tau, \quad (5)$$

где τ – заданный порог. В работе принимается равным 5 как единица шага полигональной сетки тела ЛА; $N_{\text{оп}}$ – опорная точка; $N_{\text{шум}}$ – зашумленная точка; R – матрица поворота; p_i – преобразованная матрицей поворота точка $N_{\text{оп}}$; q_i – преобразованная матрицей поворота точка $N_{\text{шум}}$.

Алгоритмические шаги:

1. Для каждой итерации $k = \{1, \dots, N\}$ случайно выбирается тройка точек $T_k = \{i, j, l\}$, где i, j, l – значения x, y, z точки T_k в системе координат ENU.

2. С помощью алгоритма Кабсха вычисляется матрица поворота R_k между опорными точками p_i, p_j, p_l и зашумленными точками q_i, q_j, q_l [10]:

$$N_{\text{оп}} = \frac{1}{3} \sum_{\tau \in T_k} p_{\tau}; \quad (6)$$

$$N_{\text{шум}} = \frac{1}{3} \sum_{\tau \in T_k} q_{\tau}; \quad (7)$$

$$H = \sum_{\tau \in T_k} (p_{\tau} - N_{\text{оп}})(q_{\tau} - N_{\text{шум}})^T; \quad (8)$$

$$H = U \Sigma V^T; \quad (9)$$

$$R = V U^T \Big|_{\det(R) \neq -1}; \quad (10)$$

$$R = V \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det(V U^T) \end{pmatrix} U^T \Bigg|_{\det(R) = -1}. \quad (11)$$

(6), (7) – центрирование точек;

(8) – ковариационная матрица H ;

(9) – SVD-разложение ковариационной матрицы H на матрицы U, Σ, V ;

(10), (11) – вычисление матрицы поворота R .

3. Оценка инлайеров и сохранение троек точек с наибольшим числом инлайеров:

$$q'_i = R(p_i - N_{оп}) + N_{шум}; \tag{12}$$

$$I = \sum_{i=1}^n (\|q'_i - q_i\| < \tau), \tag{13}$$

где q'_i – преобразованная зашумленная i -я точка; I – инлайер.

При моделировании бралось тело ЛА, поверхность которого была представлена в виде массива точек.

При применении двух алгоритмов, «жадного» и RANSAC, к телу ЛА получены две картины расположения приемников ГНСС (рис. 2а, б).

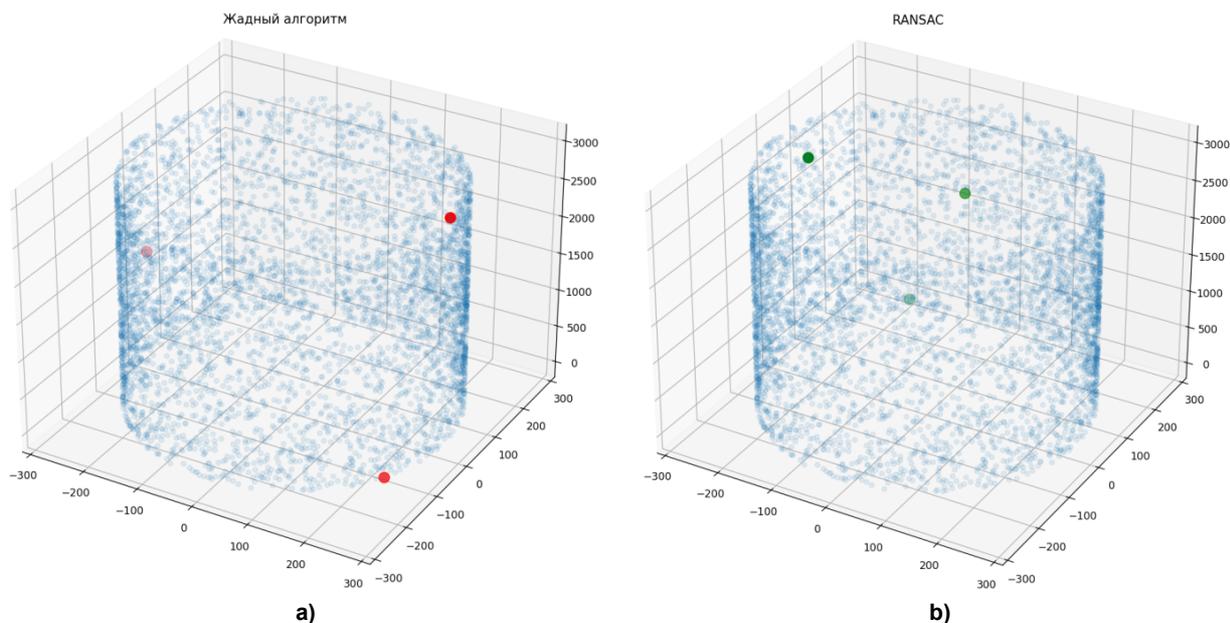


Рис. 2. Применение алгоритмов оптимизации размещения приемников ГНСС: а – применение «жадного» алгоритма; б – применение RANSAC-алгоритма
Fig. 2. Application of algorithms for optimizing the placement of GNSS receivers: а – application of the “greedy” algorithm; б – application of the RANSAC algorithm

Тогда можно сравнить СКО ошибки определения углов Эйлера ЛА после применения данных алгоритмов (рис. 3).

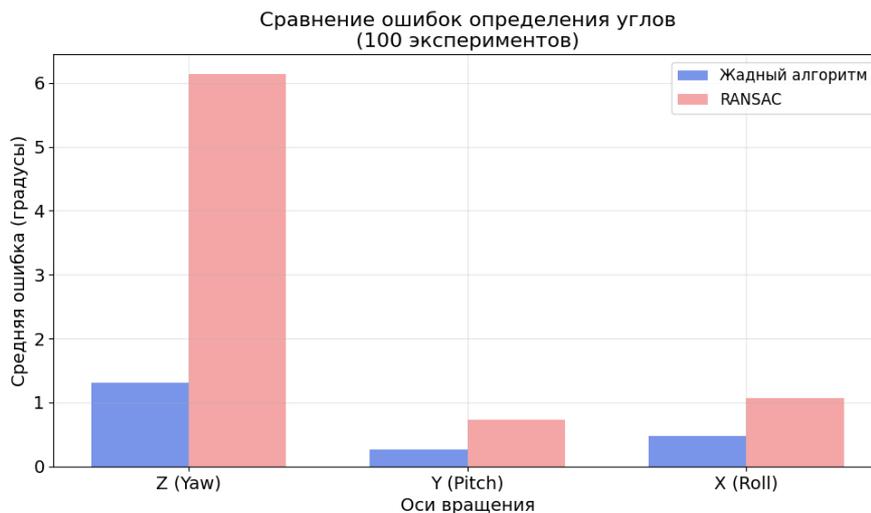


Рис. 3. Сравнение ошибок определения углов Эйлера ЛА после применения «жадного» алгоритма и RANSAC-алгоритма
Fig. 3. Comparison of errors in determining Euler angles after applying the “greedy” algorithm and the RANSAC algorithm

Путем компьютерного моделирования после ста применений двух алгоритмов было выяснено, что «жадный» алгоритм достаточно устойчив и показывает схожие друг с другом результаты, в то время как RANSAC-алгоритм абсолютно неустойчив и каждый раз выдает абсолютно разные и непредсказуемые результаты выбора трех точек для размещения приемников ГНСС. Более того, СКО ошибки определения углов Эйлера у «жадного» алгоритма в абсолютном большинстве случаев ниже, чем у RANSAC-алгоритма, а разброс значений данных СКО у «жадного» алгоритма в абсолютном большинстве случаев гораздо меньше, чем у RANSAC [11].

На основании выводов после многократного применения двух алгоритмов можно выдвинуть гипотезу о том, что неустойчивость RANSAC-алгоритма в данном случае связана с отсутствием выраженных особенностей геометрии на цилиндре, которым в исследовании приближают тело ЛА. «Жадный» алгоритм, напротив, использует глобальные геометрические свойства поверхности, что делает его более стабильным в таких условиях.

Таким образом, в данных условиях наиболее применим «жадный» алгоритм нахождения точек для крепления приемников ГНСС на борту ЛА. Его следует использовать в работе. Дальнейшие операции с алгоритмами определения углового положения ЛА в пространстве будут происходить после применения именно «жадного» алгоритма.

Нахождение зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат

Далее требуется определить и аппроксимировать влияние шума определения координат приемников на СКО шума определения углов Эйлера. Также нахождение данной зависимости поможет оценить, как работает алгоритм нахождения оптимального расположения приемников ГНСС и каков его результат [12].

Для каждого уровня СКО шума определения координат приемников ГНСС просчитывается среднее значение СКО шума определения углов Эйлера на 100 итераций:

$$\overline{\sigma_{\varphi, \gamma, \theta}} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} f_i(\sigma_{x, y, z}), \quad (14)$$

где $\overline{\sigma_{\varphi, \gamma, \theta}}$ – среднее СКО шума определения углов Эйлера ЛА; i – итерация.

СКО шума определения углов Эйлера вычисляется по формуле [13]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{100} (\Phi_i)^2}, \quad (15)$$

где Φ_i – i -й угол Эйлера.

Аппроксимация зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат вычисляется по методу линейной регрессии с параметрами k и b на основе метода наименьших квадратов. Этот метод минимизирует сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми значениями y и предсказанными значениями y' , используя ковариацию между x и y и дисперсию их массивов, которые вычисляются по формуле [14]

$$y' = kx + b; \quad (16)$$

$$b = y' - kx'; \quad (17)$$

где x' – среднее значение массива значений x ; y' – среднее значение массива значений y .

Линейность определенной выше зависимости численно выражается с помощью коэффициента детерминации R^2 , равного квадрату коэффициента корреляции r [15]:

$$R^2 = r^2 = \left(\frac{\text{Cov}(x, y)}{\sqrt{\text{Var}(x) \cdot \text{Var}(y)}} \right)^2. \quad (18)$$

Принято считать значение коэффициента детерминации $R^2 \geq 0,98$ достаточным для констатации линейности зависимости x от y [16].

Зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат, линейной регрессии и коэффициента детерминации представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 показывает, что полученные во время моделирования данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, коэффициент детерминации построенных регрессионных моделей составляет $R^2 \geq 0,98$.

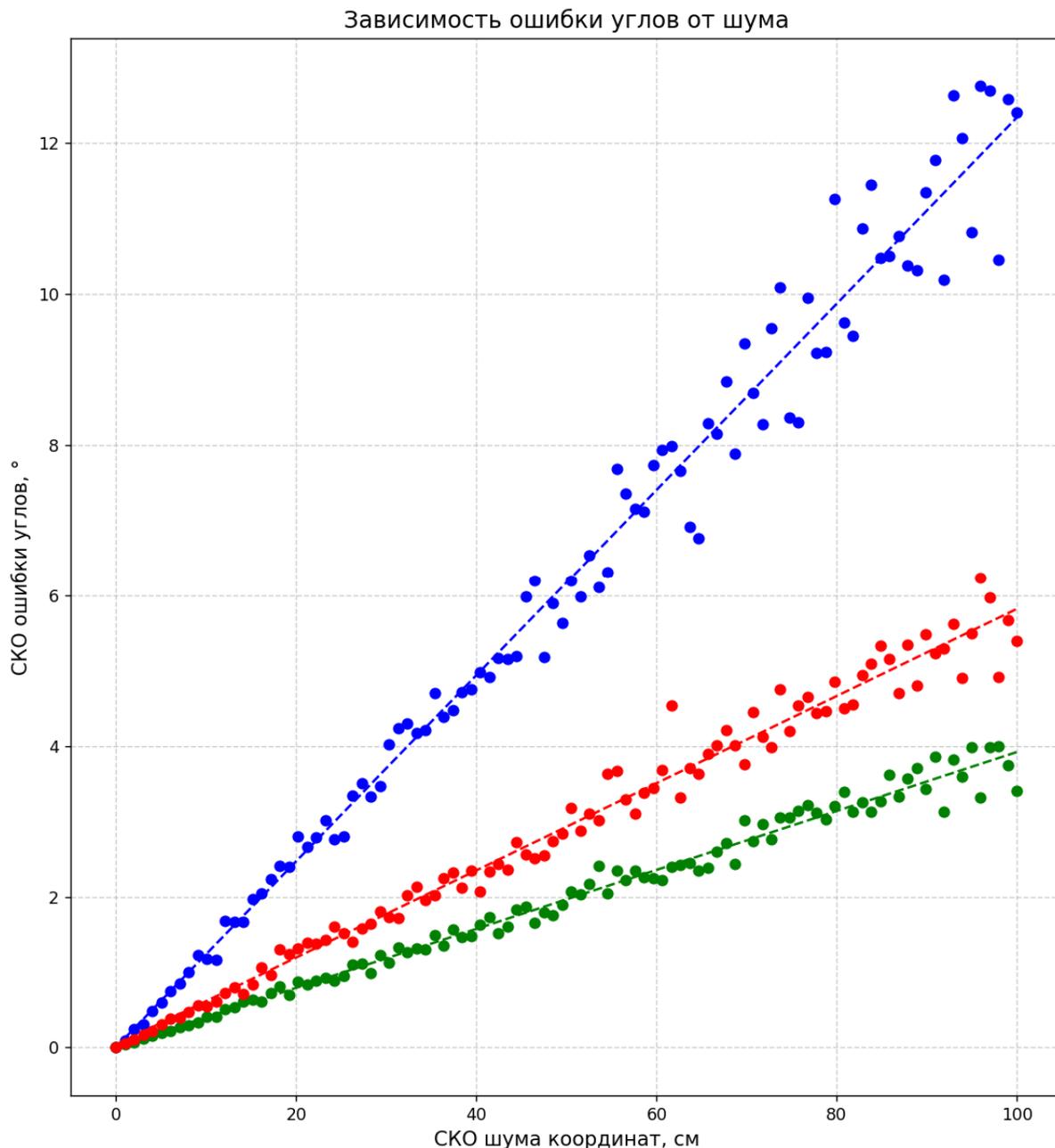


Рис. 4. Зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат, линейная аппроксимация этих зависимостей и коэффициент детерминации (линейности)
 Fig. 4. The dependence of the SD of the determination of the Euler angles on the SD of the noise of the coordinates, the linear approximation of these dependencies and the coefficient of determination (linearity)

В таблице представлены параметры и коэффициенты выявленных линейных зависимостей.

**Параметры и коэффициенты зависимостей
 Parameters and coefficients of dependencies**

Угол Эйлера	Аппроксимированная функция	Коэффициент k	Коэффициент b	Коэффициент R^2
Крена	$y = 0,123x + 0$	0,123	0	0,981
Курса	$y = 0,039x + 0,01$	0,039	0,01	0,985
Тангажа	$y = 0,058x + 0,04$	0,058	0,04	0,982

Общая ошибка определения углового положения ЛА в пространстве теоретически определяется формулой [17]

$$k_{\text{теор}} = \arctg\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (19)$$

где $r = 275$ см – радиус цилиндра, приближающего тело ЛА.

После применения «жадного» алгоритма оптимизации размещения приемников ГНСС на ЛА получим приближенную линейную функцию зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат приемников и сравним ее с теоретической (рис. 5).

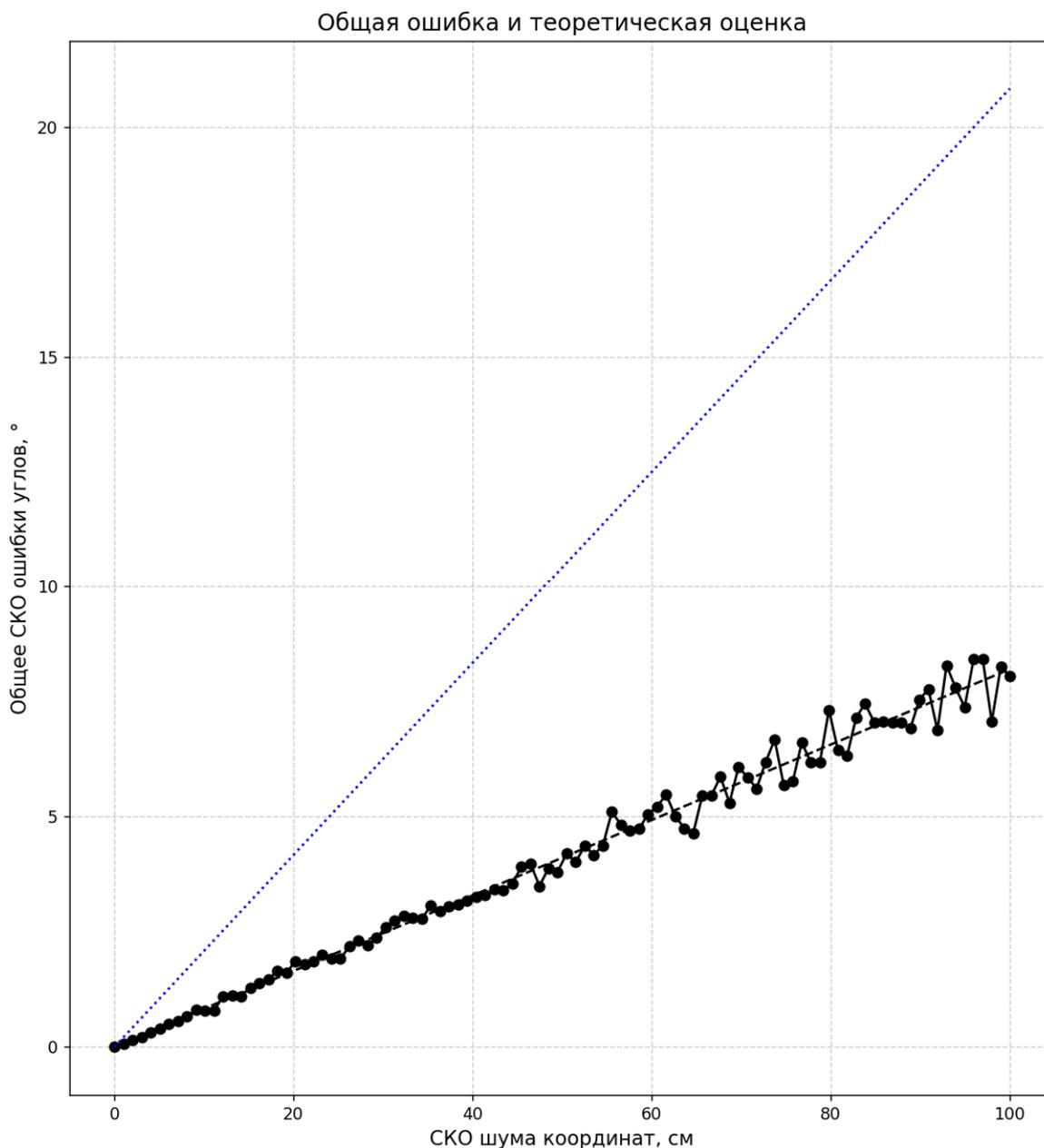


Рис. 5. Общая ошибка и теоретическая оценка
Fig. 5. General error and theoretical assessment

На рис. 5 пунктиром показана теоретическая линейная функция зависимости СКО шума в определении углов Эйлера от СКО шума определения местоположения приемника ГНСС, сплошной линией – результат моделирования при определении данной зависимости, а штриховой линией – аппроксимация данной зависимости, полученной в результате моделирования:

$$y = 0,082x + 0,01; \quad R^2 = 0,993. \quad (20)$$

Моделирование наглядно показывает, что после применения оптимизации размещения приемников ГНСС по «жадному» алгоритму удалось уменьшить влияние шума данных о координатах более чем в 2,5 раза по сравнению с теоретической оценкой, что явно свидетельствует о работоспособности и эффективности выбранных алгоритмов.

Заключение

Моделирование показало, что «жадный» алгоритм, основанный на выборе максимально удаленных друг от друга точек расположения антенн приемников ГНСС, демонстрирует высокую устойчивость и повторяемость результатов. В отличие от него, RANSAC-алгоритм оказался абсолютно неустойчивым для данной геометрии, выдавая каждый раз различные и непредсказуемые конфигурации точек.

Установлено, что зависимость ошибки определения углов Эйлера от ошибки измерения координат является линейной. Наилучшая конфигурация, найденная «жадным» алгоритмом, позволила более чем в 2,5 раза уменьшить коэффициент передачи шума по сравнению с теоретической оценкой для неоптимизированного размещения.

Проведенное исследование демонстрирует критическую важность оптимального взаимного расположения приемников для точного определения ориентации. Наиболее эффективным и надежным методом для размещения приемников ГНСС на цилиндрическом корпусе ракеты-носителя является «жадный» алгоритм. Его применение позволяет существенно повысить точность определения углового положения ЛА на критичных этапах полета, таких как взлет и посадка.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность А.Л. Шестакову за профессиональное руководство по государственному заданию, ценные рекомендации и внимание к деталям на всех этапах работы.

Особую благодарность авторы адресуют Е.Н. Прохоровой за стилистическое выверение и аккуратное оформление текста, повысившие качество представленного материала.

Список литературы

1. Аполлонов А.А. Улучшение точностных и надежностных характеристик аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в высоких широтах // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 158. С. 91–96.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2016617951. Расчет характеристик навигационного сеанса системы ГЛОНАСС / О.Н. Скрыпник, Р.О. Арефьев, Н.Г. Арефьева. Опубл. 19.07.2016.
3. Скрыпник О.Н., Арефьев Р.О., Астраханцева Н.Г. Методика построения и анализ полей точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221 (11). С. 43–50.
4. Арефьев Р.О., Скрыпник О.Н., Межетов М.А. Исследование помехоустойчивости мульти-системного GNSS приемника // CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 2 (37). С. 28–43. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28
5. Акулова Е.А. Применение картометрического метода при выполнении кадастровых работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 28–34.
6. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. URL: <https://glonass-iac.ru/guide/> (дата обращения: 13.10.2025).
7. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
8. Арене В.Д., Федоров С.М., Хитрик М.С. Динамика систем управления ракет с бортовыми цифровыми вычислительными машинами. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.

9. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // *Communications of the ACM*. 1981. Vol. 24, no. 6. P. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692
10. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40, № 2. С. 258–265. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265
11. Лабораторные микротомографы: конструкция и алгоритмы обработки данных / А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.А. Золотов и др. // *Кристаллография*. 2018. Т. 63, № 6. С. 1007–1011. DOI: 10.1134/S0023476118060073
12. Сосновский А.А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация: справ. М.: Транспорт, 1980. 264 с.
13. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем / под ред. Г.Н. Глазова. Томск: Томская государственная академия систем управления и радиоэлектроники, 1994. 144 с.
14. Стрижов В.В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. М.: ВЦ РАН. 2008. 55 с.
15. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика: начальный курс. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2007. 504 с. ISBN 978-5-7749-0473-0
16. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления: пер. с англ. М.: Мир, 1977. 650 с.
17. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Ю.Л. Козирацкий, Е.М. Афанасьева, А.И. Гревцев и др. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.

References

1. Apollonov A.A. Increase of safety of flights in polar regions with use of pseudolites. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*. 2010;(158):91–96. (In Russ.)
2. Skrypnik O.N., Arefyev R.O., Arefyeva N.G. *Raschet kharakteristik navigatsionnogo seansa sistemy GLONASS* [Calculation of GLONASS Navigation Session Characteristics]. Certificate of state registration of computer program RU 2016617951, 2016. (In Russ.)
3. Skrypnik O.N., Aref'ev R.O., Astrakhanceva N.G. Technique of construction and analysis of GLONASS fields of accuracy in the given zone of airspace. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*. 2015;221(11):43–50. (In Russ.)
4. Arefyev R.O., Skrypnik O.N., Mezhetov M.A. The research of the immunity of the multisystem GNSS receiver. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2023;2(37):28–43. (In Russ.) DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28
5. Akulova E.A. [Application of the Cartometric Method in Cadastral Works]. In: *Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress, April 8–18, 2014, Novosibirsk. Vol. 2*. Novosibirsk, Siberian State Geodetic Academy, 2014. P. 28–34. (In Russ.)
6. GLONASS Application Consumer Center. Information and Analytical Center for Coordinate-Timing and Navigation Support. Available at: <https://glonass-iac.ru/guide/> (accessed 13.10.2025).
7. Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya filtratsiya* [Inertial Navigation and Optimal Filtering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (In Russ.)
8. Arene V.D., Fedorov S.M., Khitrik M.S. *Dinamika sistem upravleniya raket s bortovymi tsifrovymi vychislitel'nymi mashinami* [Dynamics of Control Systems for Rockets with Onboard Digital Computers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 272 p. (In Russ.)
9. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*. 1981;24(6):381–395. DOI: 10.1145/358669.358692
10. Efimov AI, Novikov AI. An algorithm for multistage projective transformation adjustment for image superimposition. *Computer Optics*. 2016;40(2):258–265. (In Russ.) DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265
11. Buzmakov A.V., Asadchikov V.E., Zolotov D.A. et al. Laboratory microtomographs: design and data processing algorithms. *Crystallography Reports*. 2018;63(6):1057–1061. DOI: 10.1134/S106377451806007X

12. Sosnovskiy A.A., Khaymovich I.A. *Aviatsionnaya radionavigatsiya: spravochnik* [Aviation Radio Navigation. Handbook]. Moscow: Transport Publ., 1980. 264 p. (In Russ.)
13. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of Phase Measuring Systems]. Ed. by G.N. Glazov. Tomsk: Tomsk State Academy of Control Systems and Radioelectronics Publ., 1994. 144 p. (In Russ.)
14. Strizhov V. V. *Metody induktivnogo porozhdeniya regressionnykh modeley* [Methods of Inductive Generation of Regression Models]. Moscow: Computing Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2008. 55 p. (In Russ.)
15. Magnus Ya.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. *Ekonometrika: nachal'nyy kurs* [Econometrics. An Introductory Course]. 8th ed., rev. and suppl. Moscow: Delo Publ., 2007. 504 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7749-0473-0.
16. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. Transl. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1977. 650 p. (In Russ.)
17. Koziratskiy Yu.L., Afanas'eva E.M., Grevtsev A.I., et al. *Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-elektronnykh sredstv, otsenka parametrov ikh signalov* [Detection and Coordinate Measurement of Optoelectronic Means, Estimation of Their Signal Parameters]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2015. 456 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Лысов Станислав Сергеевич, преподаватель кафедры радиоэлектроники и систем связи, аспирант кафедры информационно-измерительной техники Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lysovss@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи Высшей школы электроники и компьютерных наук, dudarevvn@susu.ru.

Information about the authors

Stanislav S. Lysov, Lecturer of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, Postgraduate Student of the Department of Information and Measurement Technology of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lysovss@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevvn@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025

The article was submitted 10.11.2025