



Научная статья

УДК 621.396

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187457>

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

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ БПЛА ПО ДВУМ ДАЛЬНОСТЯМ ДО НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

С.Б. Шалунов  

Общество с ограниченной ответственностью «Специальный Технологический Центр»,

г. Санкт-Петербург, Россия

 sshalunov@stc-spb.ru

Цитирование: Шалунов С.Б. Алгоритм определения координат бпла по двум дальностям до наземных станций //Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187457>

Аннотация. Развитие беспилотных летательных аппаратов требует создания надёжных средств навигации, обеспечивающих точное определение координат в условиях ограниченной инфраструктуры, включая зоны с недоступностью или затруднённым приёмом сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Такие условия могут возникать при полётах в городской застройке, горной местности, внутри помещений или в зонах преднамеренного подавления навигационных сигналов. Одним из перспективных решений в таких условиях является использование локальных навигационных систем, основанных на измерении расстояний до фиксированных наземных станций.

Известен метод определения положения беспилотного летательного аппарата по двум наклонным дальностям и барометрической высоте, обеспечивающий возможность позиционирования в плоскости при наличии всего двух наземных опорных пунктов. Данный подход характеризуется минимальными требованиями к инфраструктуре по сравнению с традиционными многопозиционными системами и может быть реализован на базе относительно простого оборудования. Однако для практической реализации данного метода требуется разработка эффективного алгоритма, способного функционировать в

реальном времени, учитывать погрешности измерений, разрешать геометрическую неоднозначность решений и обеспечивать устойчивость в условиях внешних возмущений. Особую важность приобретает возможность реализации алгоритма на вычислительных платформах с ограниченными ресурсами, характерных для бортовых систем управления беспилотного аппарата.

Статья посвящена построению и исследованию алгоритма реализации дальномерного метода определения координат беспилотного летательного аппарата. В отличие от классических вероятностных подходов, оперирующих эллипсоидами ошибок, предлагаемый метод использует детерминированную геометрическую модель с последующей фильтрацией выбросов. Такой подход позволяет получить точечное решение с контролем достоверности через механизмы проверки физической реализуемости, что особенно важно для систем реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами. Модульная архитектура алгоритма обеспечивает возможность его адаптации к различным аппаратным платформам и условиям эксплуатации без существенной переработки базовых вычислительных процедур.

Ключевые слова: БПЛА, локальная навигационная система, определение координат, дальномерный метод, позиционирование, устойчивость, фильтрация выбросов

ALGORITHM FOR A UAV POSITIONING METHOD USING TWO RANGES TO GROUND STATIONS

S.B. Shalunov  

Special Technology Center LLC, Saint Petersburg, Russia

 sshalunov@stc-spb.ru

Citation: Shalunov S.B. Algorithm for a uav positioning method using two ranges to ground stations // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187457>

Abstract. Global navigation satellite systems include various parts, such as control stations, Earth and space monitoring stations, and mobile navigation systems. The main results of the global navigation satellite system are the determination of time, location

and control of navigation methods. Based on the vertical guidance approach procedure, local and global satellite navigation systems are used for positioning and precision approach in aviation instead of modern instrumental landing systems, as instrumental landing systems have errors in positioning and speed measurement. Differential corrections are determined using one or more reference stations. The concept of a single support station is simple, but the accuracy of position determination is lower. This article compares the methods of error correction of differential systems.

Keywords: global navigation satellite system, satellite, navigation, differential systems, refraction, navigation signal, spacecraft

Введение

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует создания надёжных средств навигации, обеспечивающих точное определение координат в условиях ограниченной инфраструктуры, включая зоны с недоступностью или затруднённым приёмом сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1, 2]. Одним из перспективных решений в таких условиях является использование локальных навигационных систем [1], основанных на измерении расстояний до фиксированных наземных станций.

Известен метод определения положения БПЛА по двум наклонным дальностям и барометрической высоте, обеспечивающий возможность позиционирования в плоскости при наличии всего двух наземных опорных пунктов [3, 4]. Однако для практической реализации данного метода требуется разработка эффективного алгоритма, способного функционировать в реальном времени, учитывать погрешности измерений, разрешать геометрическую неоднозначность решений и обеспечивать устойчивость в условиях внешних возмущений.

Настоящая статья посвящена построению и исследованию алгоритма реализации дальномерного метода определения координат БПЛА. В отличие от классических вероятностных подходов, оперирующих эллипсоидами ошибок, предлагаемый метод использует детерминированную геометрическую модель с последующей фильтрацией выбросов. Такой подход позволяет получить точечное

решение с контролем достоверности через механизмы проверки физической реализуемости, что особенно важно для систем реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами.

Постановка задачи

Исследуемые методы [3, 4] определения координат беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе измерения дальностей до двух наземных станций служит теоретической основой для локальной навигационной системы, предназначенной для эксплуатации в условиях ограниченной инфраструктуры и недоступности глобальных навигационных спутниковых систем. Метод опирается на математическую модель, учитывающую геометрию расположения опорных пунктов и погрешности исходных измерений [5].

Однако, для практической реализации данного метода в составе локальной навигационной системы требуется разработка специализированного алгоритма обработки измерительных данных. Такой алгоритм должен обеспечивать последовательное выполнение вычислительных процедур в ограниченных по вычислительным ресурсам средах и формировать навигационную информацию с учётом изменяющихся условий эксплуатации.

Исходные данные

Алгоритм функционирует на основе ограниченного набора входных параметров, включающих координаты наземных станций (широта, долгота, высота), измеренные дальности до БПЛА, а также барометрическую высоту аппарата. Эти данные формируют основу для вычисления текущего положения БПЛА и поступают в алгоритм в режиме реального времени.

Ограничения и особенности условий функционирования

Работа алгоритма осуществляется при ограниченном числе наземных станций – двух опорных пунктов, что приводит к возникновению неоднозначности координатного решения [6]. Для устранения данной неопределённости в алгоритме реализуются механизмы выбора корректного положения БПЛА на основе априорных данных о маршруте полёта.

Точность вычислений зависит от геометрической конфигурации станций, стабильности радиоканала и характеристик измерительного оборудования [7]. Существенное влияние оказывают такие факторы, как расстояние между станциями, скорость полёта БПЛА и возможные радиопомехи в зоне измерений. Перечисленные особенности обуславливают необходимость учёта данных факторов при проектировании алгоритмической архитектуры [7].

Цель алгоритма

Целью разработки является создание вычислительного алгоритма, реализующего предложенный метод определения координат БПЛА на основе минимального набора измерений. Основное назначение алгоритма – интеграция в систему управления аппаратом и формирование актуальной навигационной информации.

Требования к алгоритму

Ключевые требования к алгоритму включают:

- выполнение вычислений в реальном времени [8];
- обеспечение адаптации к качеству входных данных [9];
- реализацию контроля достоверности координатного решения [10];
- оптимизацию вычислительных процедур с учётом ограничений аппаратной платформы [8, 11].

В рамках обеспечения надёжности функционирования алгоритм должен предусматривать обработку некорректных или аномальных данных, обусловленных внешними воздействиями, и обеспечивать своевременное обновление выходной информации.

Архитектура алгоритма

Архитектура алгоритма построена на модульной основе и включает следующие блоки: приём исходных данных, проверка их допустимости, преобразование координат наземных станций в декартову систему, вычисление координат БПЛА на основе пересечения сфер, выбор корректного решения, преобразование в географическую систему координат и формирование выходных данных. Такое построение обеспечивает последовательность обработки данных и возможность адаптации алгоритма под различные аппаратные и программные платформы. Модульность структуры упрощает внедрение дополнительных функций,

таких как фильтрация измерений или адаптация к специфическим условиям эксплуатации. Такая структура соответствует требованиям модульности и гибкости, характерным для навигационных алгоритмов, реализуемых в составе встраиваемых систем управления БПЛА.

Основные этапы алгоритма

Алгоритм реализует последовательность этапов, представленную на рисунке 1.

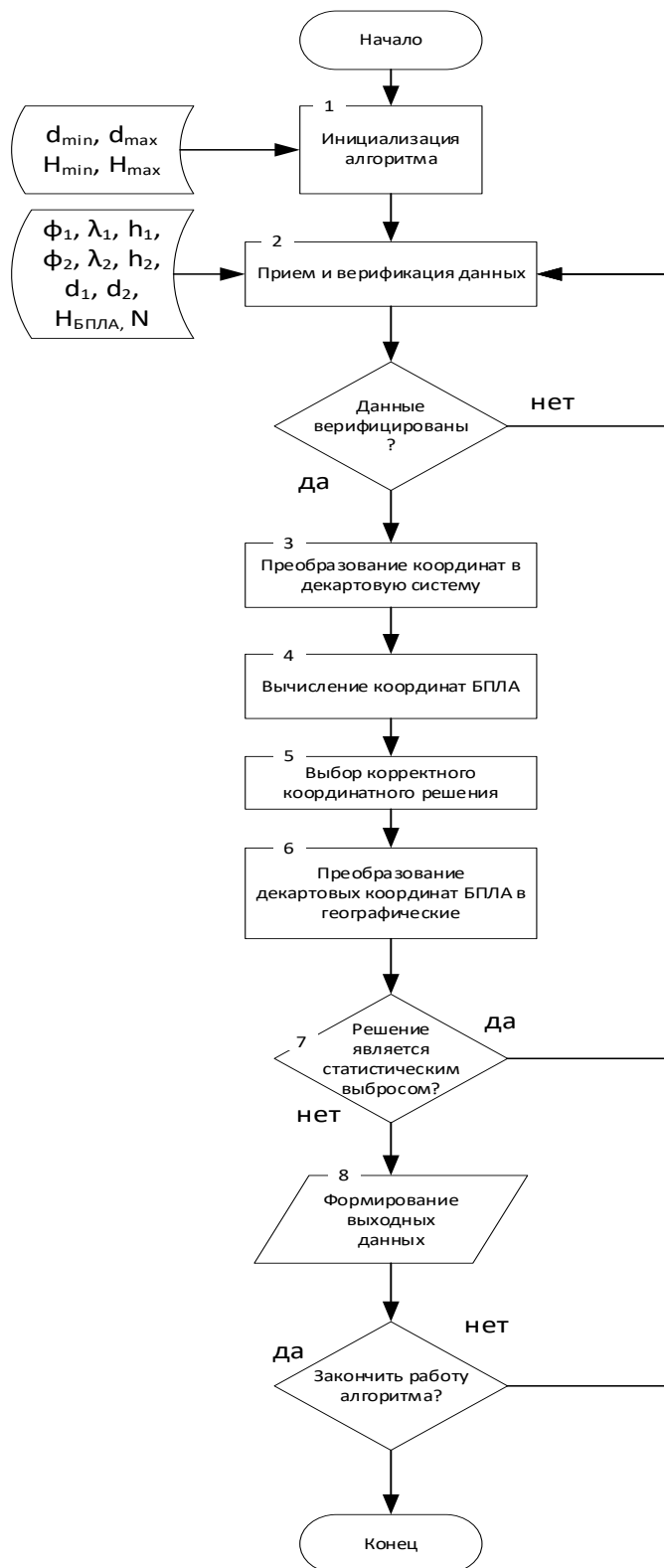


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма определения координат БПЛА

Ниже приведено детальное описание каждого блока схемы с соответствующими формулами. Структура алгоритма учитывает особенности применения ограниченного количества наземных станций и необходимость функционирования в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Блок 1. Инициализация алгоритма

Этап инициализации включает подготовку внутренних структур хранения данных и установку исходных параметров обработки измерений. В рамках этого этапа задаются предельные значения допустимых погрешностей входных данных, таких как дальности d_i и высота БПЛА $H_{\text{БПЛА}}$. Пороговые значения определяются выражениями:

$$d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max}, H_{\min} \leq H_{\text{БПЛА}} \leq H_{\max} \quad (1)$$

Кроме того, осуществляется инициализация координат наземных станций, задаваемых в виде географических координат:

$$(\varphi_1, \lambda_1, h_1), (\varphi_2, \lambda_2, h_2) \quad (2)$$

где φ_i – широта станции, λ_i – долгота, h_i – высота над уровнем моря.

Также на этапе инициализации производится вычисление расстояния между станциями d_{12} , выражаемого формулой:

$$d_{12} = R_{\text{Земли}} \arccos (\sin (\varphi_1) \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos (\lambda_2 - \lambda_1)) \quad (3)$$

где $R_{\text{Земли}}$ – радиус Земли, принимаемый постоянным значением.

Устанавливается допустимый диапазон значений межстанционного расстояния:

$$d_{12 \min} \leq d_{12} \leq d_{12 \max} \quad (4)$$

Этот шаг позволяет предотвратить использование конфигураций с недостаточным или избыточным расстоянием между станциями, влияющим на устойчивость работы алгоритма. Важно отметить, что, хотя алгоритм оперирует точечными оценками координат, учёт погрешностей осуществляется:

- через пороговую фильтрацию входных данных (проверка допустимости дальностей и высот);
- контроль геометрической согласованности решений (расчёт параметра δ);
- механизмы сглаживания траектории.

Это обеспечивает устойчивость решения без перехода к полному вероятностному анализу, что соответствует требованиям реального времени.

Блок 2. Приём и верификация исходных данных

На данном этапе осуществляется сбор входной информации, включающей координаты наземных станций $(\varphi_1, \lambda_1, h_1), (\varphi_2, \lambda_2, h_2)$, измеренные дальности от БПЛА до каждой из станций d_1, d_2 , а также барометрическую высоту БПЛА $H_{\text{БПЛА}}$. Для обеспечения достоверности вычислительного процесса выполняется проверка полноты набора данных:

$$D = \{ d_1, d_2, H_{\text{БПЛА}}, \varphi_1, \lambda_1, h_1, \varphi_2, \lambda_2, h_2 \} \quad (5)$$

В случае отсутствия одного или нескольких параметров инициируется повторный запрос информации. Кроме того, проводится проверка соответствия дальностей и высоты установленным диапазонам допустимых значений (см. формулы 1 и 4).

Процедура верификации:

1. Проверка полноты данных D , если любой из параметров отсутствует производится повторный запрос.
2. Проверка диапазонов дальностей (см. формулу 1), высот (см. формулу 1) и расстояний между станциями (см. формулу 4).

При выходе значений за пределы допустимых диапазонов данные отвергаются и происходит запрос новых данных.

Блок 3. Процедура преобразования координат наземных станций в декартову систему

Для упрощения последующих вычислений исходные географические координаты наземных станций (широта, долгота, высота) преобразуются в декартову систему координат с выбором одной из станций в качестве начала отсчёта. Это позволяет выполнять расчёты в плоскости, удобной для аналитических операций. Преобразование географических координат второй станции (φ_2, λ_2) относительно опорной станции (φ_1, λ_1) осуществляется по приближённой модели сферической формы Земли:

$$x_2 = R_{\text{Земли}} \cos(\varphi_1) (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{\pi}{180} \quad (6)$$

$$y_2 = R_{\text{Земли}} (\varphi_2 - \varphi_1) \frac{\pi}{180} \quad (7)$$

Такие преобразования позволяют использовать декартову систему координат в горизонтальной плоскости при сохранении достаточной точности в пределах рассматриваемых расстояний между станциями и БПЛА.

Шаги процедуры:

1. Выбор начала координат.
2. Расчёт координат второй станции (см. формулы 6 и 7).
3. Результаты передаются в Блок 4.

Блок 4. Процедура вычисления координат БПЛА

На данном этапе алгоритма осуществляется расчёт положения БПЛА на основе геометрического пересечения двух сфер, центры которых расположены в наземных станциях, а радиусы равны измеренным дальностям до БПЛА. С учётом известной барометрической высоты аппарата пересечение сфер сводится к определению координат пересечения окружностей в горизонтальной плоскости.

Пусть (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – декартовы координаты наземных станций, полученные путём преобразования географических координат (широта, долгота) по формулам:

$$r_1 = \sqrt{d_1^2 - (H_{\text{БПЛА}} - h_1)^2} \quad (8)$$

$$r_2 = \sqrt{d_2^2 - (H_{\text{БПЛА}} - h_2)^2} \quad (9)$$

Горизонтальные окружности задаются уравнениями:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \quad (10)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \quad (11)$$

Вычитая одно (см. формулу 11) уравнение из другого (см. формулу 10), устраняем квадратичные члены и получаем линейное уравнение, описывающее прямую, вдоль которой расположены возможные решения пересечения окружностей:

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 \quad (12)$$

Для удобства дальнейших вычислений используется параметр α – это коэффициент, определяющий положение основания перпендикуляра к хорде, соединяющей два возможных положения БПЛА, вдоль линии между станциями. Этот параметр рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d_{12}^2}{2 d_{12}^2} \quad (13)$$

где d_{12} – расстояние между станциями:

$$d_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (14)$$

Значение параметра α определяет долю расстояния между станциями, на которой расположена точка X_0, Y_0 , лежащая на линии между станциями и являющаяся основанием перпендикуляра к хорде между двумя точками пересечения:

$$X_0 = x_1 + \alpha (x_2 - x_1) \quad (15)$$

$$Y_0 = y_1 + \alpha (y_2 - y_1), \quad (16)$$

Для определения двух симметричных решений относительно этой линии вычисляется расстояние от точки (X_0, Y_0) до точек пересечения окружностей:

$$\delta = \sqrt{r_1^2 - (\alpha d_{12})^2} \quad (17)$$

Окончательные координаты двух возможных положений БПЛА:

$$X_{\text{БПЛА}}^{(1,2)} = X_0 \pm \delta \frac{y_2 - y_1}{d_{12}} \quad (18)$$

$$Y_{\text{БПЛА}}^{(1,2)} = Y_0 \pm \delta \frac{x_2 - x_1}{d_{12}} \quad (19)$$

Таким образом, пересечение окружностей в горизонтальной плоскости приводит к двум возможным симметричным решениям для положения БПЛА. Выбор корректного положения осуществляется на следующем этапе алгоритма.

Шаги процедуры:

1. Расчёт горизонтальных расстояний (см. формулу 8 и 9).
2. Определение линии пересечения окружностей: (см. формулы 10, 11 и 12).
3. Вычисление параметров решения (см. формулы 13 – 16).
4. Определение возможных координат БПЛА (см. формулы 18 и 19).

Выходные данные $X_{\text{БПЛА}}^{(1,2)}$ и $Y_{\text{БПЛА}}^{(1,2)}$ передаются в Блок 5 (выбор корректного решения).

Блок 5. Выбор корректного координатного решения

Результат пересечения двух окружностей в горизонтальной плоскости приводит к получению двух симметричных относительно прямой, соединяющей наземные станции, возможных положений БПЛА $(X_{\text{БПЛА}}^1, Y_{\text{БПЛА}}^1)$ и $(X_{\text{БПЛА}}^2, Y_{\text{БПЛА}}^2)$. В соответствии с алгоритмом осуществляется выбор единственного корректного положения на основании априорной информации о предполагаемом маршруте полёта БПЛА либо заранее заданных ограничений на рабочую область.

Для определения стороны, на которой расположено каждое из решений относительно линии между станциями, используется псевдоскалярное произведение векторов, определяющее ориентацию точки относительно этой линии. Рассмотрим вектор между станциями:

$$\vec{d}_{12} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (20)$$

И вектор от первой наземной станции и до возможного положения БПЛА:

$$\vec{d}_{\text{БПЛА}}^i = (X_{\text{БПЛА}}^i - x_1, Y_{\text{БПЛА}}^i - y_1) \quad (21)$$

Ориентация каждого решения определяется по знаку псевдоскалярного произведения этих векторов:

$$S^i = (x_2 - x_1)(Y_{\text{БПЛА}}^i - y_1) - (y_2 - y_1)(X_{\text{БПЛА}}^i - x_1) \quad (22)$$

Если $S^i > 0$, то точка расположена с одной стороны от прямой между станциями, а если $S^i < 0$, то – с другой стороны. На основании априорной информации (например, ожидаемой стороны полёта БПЛА относительно линии между станциями) выбирается соответствующее решение.

Шаги процедуры:

1. Расчёт векторов (см. формулы 20 и 21).
2. Определение ориентации (см. формулу 22).
3. Выбор координатного решения.

Выходные данные (корректные координаты БПЛА $X_{\text{БПЛА}}^i$ и $Y_{\text{БПЛА}}^i$) передаются в Блок 6 (преобразование декартовых координат в географические).

Блок 6. Преобразование декартовых координат в географические

После вычисления положения БПЛА в декартовой системе координат $X_{\text{БПЛА}}, Y_{\text{БПЛА}}$, относительно первой наземной станции, осуществляется обратное преобразование этих координат в географическую систему (широта, долгота). Данное преобразование необходимо для последующего использования результатов в навигационных системах и выполняется по приближённой модели сферической формы Земли с использованием следующих выражений:

$$\varphi_{\text{БПЛА}} = \varphi_1 + \frac{Y_{\text{БПЛА}}}{R_{\text{Земли}}} \frac{180}{\pi} \quad (23)$$

$$\lambda_{\text{БПЛА}} = \lambda_1 + \frac{X_{\text{БПЛА}}}{R_{\text{Земли}} \cos(\varphi_1)} \frac{180}{\pi} \quad (24)$$

Это преобразование позволяет перевести результаты вычислений из вспомогательной декартовой системы в географическую систему координат, применяемую в навигационных приложениях.

Выполняемые в блоке шаги:

1. Расчёт широты БПЛА (см. формулу 23).
2. Расчет долготы БПЛА (см. формулу 24).

Результаты передаются в Блок 7 (контроль точности).

Блок 7. Контроль точности координатного решения

Для обеспечения достоверности результатов вычислений алгоритм реализует процедуру контроля координатного решения, основанную на анализе последовательности предыдущих значений. Основная цель – выявление аномальных скачков координат БПЛА, не соответствующих физическим возможностям его движения.

В рамках контроля текущие координаты сравниваются не с предыдущим значением, а с усреднённым значением по скользящему окну из N последних достоверных координатных решений.

Это позволяет снизить вероятность ложного срабатывания при возникновении единичных выбросов.

Среднее значение координат БПЛА в декартовой системе на k -ом шаге вычисляется по формулам:

$$\bar{X}_{\text{БПЛА}}^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{БПЛА}}^{k-i} \quad (25)$$

$$\bar{Y}_{\text{БПЛА}}^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{\text{БПЛА}}^{k-i} \quad (26)$$

Текущие координаты $(X_{\text{БПЛА}}^k, Y_{\text{БПЛА}}^k)$ сравниваются с этими усреднёнными значениями. Отклонение определяется как евклидово расстояние:

$$\Delta d = \sqrt{(X_{\text{БПЛА}}^k - \bar{X}_{\text{БПЛА}}^k)^2 + (Y_{\text{БПЛА}}^k - \bar{Y}_{\text{БПЛА}}^k)^2} \quad (27)$$

Если отклонение превышает заданный порог:

$$\Delta d > \Delta d_{\text{max}} \quad (28)$$

то координатное решение признаётся выбросом и не включается в окно усреднения. В случае, если в течение N последовательных шагов зафиксировано N выбросов подряд, алгоритм переопределяет среднее значение, принимая текущие координаты за новое достоверное положение. Это позволяет корректно реагировать на резкие изменения реального положения БПЛА, например, после восстановления связи или при резком манёвре.

Шаги осуществления контроля точности координатного решения:

1. Расчёт скользящего среднего (см. формулы 25 и 26).
2. Определение отклонения (см. формулу 27).
3. Проверка на выброс (см. формулу 28).
4. Адаптация к резким изменениям.

Отфильтрованные координаты БПЛА передаются в Блок 8 (формирование выходных данных).

Блок 8. Формирование выходных данных

После успешного завершения предыдущих блоков обработки координатное решение формируется в виде выходного сообщения, включающего географические координаты БПЛА – широту $\varphi_{\text{БПЛА}}$ и долготу $\lambda_{\text{БПЛА}}$.

Формат выходных данных обеспечивает совместимость с системой управления БПЛА и средствами логирования навигационной информации. Передача сообщения осуществляется по стандартным коммуникационным каналам, принятым в архитектуре системы управления аппаратом.

Циклическое выполнение

Алгоритм функционирует в режиме непрерывного цикла, обеспечивая постоянное обновление навигационной информации о положении БПЛА. По завершении всех вычислительных процедур, включая определение координат и контроль их достоверности, алгоритм автоматически возвращается к этапу приёма и верификации новых исходных данных.

Такой режим работы обеспечивает непрерывность позиционирования БПЛА в реальном времени, позволяя своевременно учитывать изменения в положении аппарата и адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды. Временные параметры цикла (например, частота обновления данных) определяются возможностями измерительного оборудования и требованиями системы управления.

Таким образом, алгоритм реализации дальномерного метода определения координат БПЛА по двум измеренным дальностям до наземных станций может быть представлен в виде блок-схемы, отражающей последовательность выполнения основных вычислительных процедур (см. рис. 1). Блок-схема иллюстрирует структуру обработки данных, включая этапы инициализации параметров, верификации входных измерений, вычисления координатного решения и контроля его точности с последующим формированием выходной навигационной информации.

Алгоритмическая устойчивость

Алгоритмическая устойчивость в контексте рассматриваемой задачи понимается как способность алгоритма сохранять корректность координатного решения при воздействии внешних возмущающих факторов, характерных для условий эксплуатации БПЛА. Под устойчивостью подразумевается сохранение работоспособности и допустимой точности определяемых координат БПЛА при изменении геометрии расположения наземных станций, наличии погрешностей измерений дальностей и барометрической высоты, а также в условиях воздействия радиопомех или многолучевого распространения сигнала. Устойчивость алгоритма обеспечивает надёжность его функционирования при

варьирующихся параметрах среды и нестабильности входных данных, позволяя получать достоверные навигационные решения в широком диапазоне эксплуатационных ситуаций.

Устойчивость алгоритма может нарушаться под воздействием различных факторов, характерных для условий эксплуатации БПЛА. Основными из них являются:

- Сильное сближение наземных станций, приводящее к ухудшению геометрического фактора точности. При малом расстоянии между станциями увеличивается неопределённость координатного решения, обусловленная уменьшением чувствительности системы к изменениям положения БПЛА.

- Ошибки измерения дальностей d_1 и d_2 и барометрической высоты $H_{\text{БПЛА}}$. Неточности в данных могут вызывать смещение координатного решения от истинного положения БПЛА, особенно при значительных величинах погрешностей.

- Высокая скорость движения БПЛА, приводящая к резким изменениям дальностей в короткие интервалы времени. Это повышает вероятность несвоевременной адаптации алгоритма к изменению положения аппарата и увеличивает риск принятия недостоверных координатных решений.

- Потеря радиосигнала или возникновение радиопомех и многолучевого распространения. Эти явления могут вызывать искажения измеренных дальностей или их полное отсутствие, что нарушает устойчивость работы алгоритма.

Механизмы обеспечения устойчивости

Для повышения устойчивости алгоритма при воздействии возмущающих факторов в его структуре реализован ряд механизмов, обеспечивающих надёжность и корректность координатного решения:

1. **Верификация входных данных.** На этапе приёма информации осуществляется проверка полноты поступающих данных и их соответствия установленным диапазонам допустимых значений. Это позволяет своевременно

выявлять и исключать некорректные или аномальные измерения, предотвращая их влияние на дальнейшие вычисления.

2. Контроль геометрии расположения станций. В процессе инициализации производится вычисление расстояния между наземными станциями с последующей проверкой на соответствие допустимому диапазону. Это предотвращает использование конфигураций с недостаточным или избыточным расстоянием между станциями, что позволяет сохранить благоприятные условия для формирования устойчивого координатного решения.

3. Контроль координатного решения с использованием скользящего окна усреднения. Для предотвращения принятия разовых выбросов за достоверные координаты реализован механизм сравнения текущего координатного решения с усреднённым значением по окну из N предыдущих достоверных решений. Это снижает чувствительность алгоритма к кратковременным возмущениям и обеспечивает стабильность выходных данных.

4. Адаптация к новым условиям за счёт переопределения среднего. В случае регистрации последовательных выбросов в течение N циклов алгоритм переопределяет значение среднего, принимая текущие координаты за новое достоверное положение. Это обеспечивает адаптивность алгоритма к резким изменениям положения БПЛА (например, при восстановлении связи или после манёвра).

Выводы

Алгоритм реализации дальномерного метода определения координат БПЛА по двум измеренным дальностям до наземных станций демонстрирует устойчивую работу в широком диапазоне эксплуатационных условий. Устойчивость обеспечивается за счёт встроенных механизмов верификации входных данных, контроля геометрической конфигурации наземных станций, фильтрации координатного решения с применением скользящего окна усреднения, а также адаптации к изменяющимся условиям за счёт переопределения среднего при обнаружении последовательных выбросов. Это позволяет поддерживать надёжность и корректность координатного решения

даже в условиях варьирующихся характеристик измерений и внешних возмущающих факторов.

Моделирование работы алгоритма

Для численной проверки работоспособности разработанного алгоритма был реализован программный модуль, выполняющий имитационное моделирование процесса определения координат БПЛА в условиях варьирующихся параметров измерений и помех. Программа написана на языке Python и реализует полный цикл обработки измерений, начиная от генерации траектории БПЛА и заканчивая формированием оценённых координат с последующей визуализацией результатов.

Программная реализация включает следующие функциональные блоки:

1. Генератор траектории

Служит для пошагового вычисления положения БПЛА с учётом заданной скорости, частоты дискретизации и угла движения. Траектория моделируется как прямолинейная с постоянной высотой.

2. Модуль вычисления наклонных дальностей

Выполняет преобразование географических координат в декартову систему с последующим определением наклонных дальностей от текущего положения БПЛА до каждой из наземных станций. Расчёты производятся в локальной прямоугольной системе координат, связанной с первой станцией.

3. Модуль моделирования измерений

Осуществляет наложение нормально распределённых ошибок на истинные значения дальностей и высоты, что имитирует реальные условия измерений, включая влияние шумов, аппаратных погрешностей измерения дальности и барометрических датчиков.

4. Алгоритм координатного решения

На основе двух искажённых дальностей и заданной высоты выполняется вычисление координат БПЛА в декартовой плоскости по аналитическому решению системы, описывающей пересечение двух сфер. Полученное двузначное

решение разрешается с использованием ориентации вектора БПЛА относительно линии между станциями, что позволяет выбрать корректную точку.

5. Модуль верификации и фильтрации

Для повышения устойчивости алгоритма реализован механизм скользящего среднего: текущее координатное решение сравнивается с усреднёнными координатами по N предыдущим шагам. Если отклонение превышает допустимый порог, решение считается выбросом. При последовательности из N выбросов текущая координата принимается за новое достоверное положение.

6. Обратное преобразование координат

Полученные координаты БПЛА в декартовой системе преобразуются в географическую систему (широта, долгота), что обеспечивает совместимость выходных данных с форматами навигационных протоколов.

7. Регистрация результатов и визуализация

Программа сохраняет последовательность оценённых и истинных координат в лог-файл, а также формирует графики:

- траектории движения БПЛА (истинной, оценённой и сглаженной),
- абсолютной ошибки между оценённой и реальной координатой,
- гистограммы распределения ошибки сглаженной координаты.

Программа функционирует в режиме итерационного цикла с частотой, определяемой параметром дискретизации. На каждом шаге производится полный цикл вычислений, включая:

- генерацию положения БПЛА;
- расчёт истинных дальностей;
- моделирование шумов;
- координатное решение;
- фильтрацию и оценку ошибки.

Реализация алгоритма выполнена в среде общего назначения (Python), что обеспечивает удобство отладки и анализа получаемых результатов. Расчётные процедуры, включая преобразование координат и определение положения БПЛА по измеренным дальностям, реализованы в аналитической форме. Алгоритм

организован в виде итерационного цикла, в котором на каждом шаге производится обработка входных измерений, расчёт координатного решения, контроль его достоверности и формирование выходных данных. Исходные параметры моделирования, используемые в реализации, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры численного эксперимента,
используемые при моделировании координатного решения

№	Обозначение параметра	Значение	Единицы измерения	Описание параметра
1	$R_{\text{Земли}}$	6 371 000	м	Средний радиус Земли
2	D_{min}	2 000	м	Минимально допустимая дальность до БПЛА
3	D_{max}	70 000	м	Максимально допустимая дальность до БПЛА
4	H_{min}	30	м	Минимально допустимая высота полёта БПЛА
5	H_{max}	3 000	м	Максимально допустимая высота полёта БПЛА
6	δd	10	м	Среднеквадратичное отклонение погрешности дальности
7	δH	10	м	Среднеквадратичное отклонение погрешности высоты
8	V	50	м/с	Скорость движения БПЛА
9	f	10	Гц	Частота измерений дальности (частота обновления)
10	A	75	град	Угол движения БПЛА относительно оси координат
11	Сторона	"right"	-	Предполагаемая сторона нахождения БПЛА относительно оси базиса
12	$\Delta_{\text{Порог}}$	30	м	Порог отклонения для фильтрации выбросов
13	φ_1	60.000	град	Географическая широта первой наземной станции
14	λ_1	30.000	град	Географическая долгота первой наземной станции
15	h_1	100	м	Высота первой наземной станции
16	φ_2	60.001272	град	Географическая широта второй наземной станции
17	λ_2	30.002545	град	Географическая долгота второй наземной станции
18	h_2	100	м	Высота второй наземной станции
19	φ_0	60.005	град	Начальная широта БПЛА
20	λ_0	30.010	град	Начальная долгота БПЛА
21	H_0	500	м	Начальная высота полёта БПЛА

Хотя текущая реализация ориентирована на исследовательские задачи, архитектура алгоритма допускает последующую адаптацию под вычислительные платформы с ограниченными ресурсами, включая реализацию на языке С/С++ или перенос на микроконтроллерные системы. Это возможно за счёт модульной структуры, отделяющей блоки преобразований, фильтрации и логики выбора координатного решения.

Анализ результатов моделирования и интерпретация графических данных

На рисунках 2–5 представлены графические результаты моделирования работы алгоритма позиционирования БПЛА. Каждый рисунок содержит три элемента: график траектории движения БПЛА, график абсолютной ошибки координат и гистограмму распределения ошибки. На графике траектории отображены три линии: истинная траектория движения БПЛА, координаты, полученные в результате работы алгоритма, и сглаженное координатное решение после применения фильтрации. График абсолютной ошибки отражает изменение расстояния между оценённой и истинной координатой БПЛА на каждом шаге моделирования. Гистограмма показывает распределение величины ошибки сглаженных координат за весь период моделирования, что позволяет визуально оценить разброс значений. Анализ графических материалов позволяет сделать следующие наблюдения:

При значении $N=5$ и $M=40$ (рисунок 2) наблюдается высокая чувствительность алгоритма к единичным выбросам. Это выражается в значительном разбросе оценённых координат и широком распределении ошибки. Алгоритм демонстрирует низкую устойчивость в условиях интенсивных шумов.

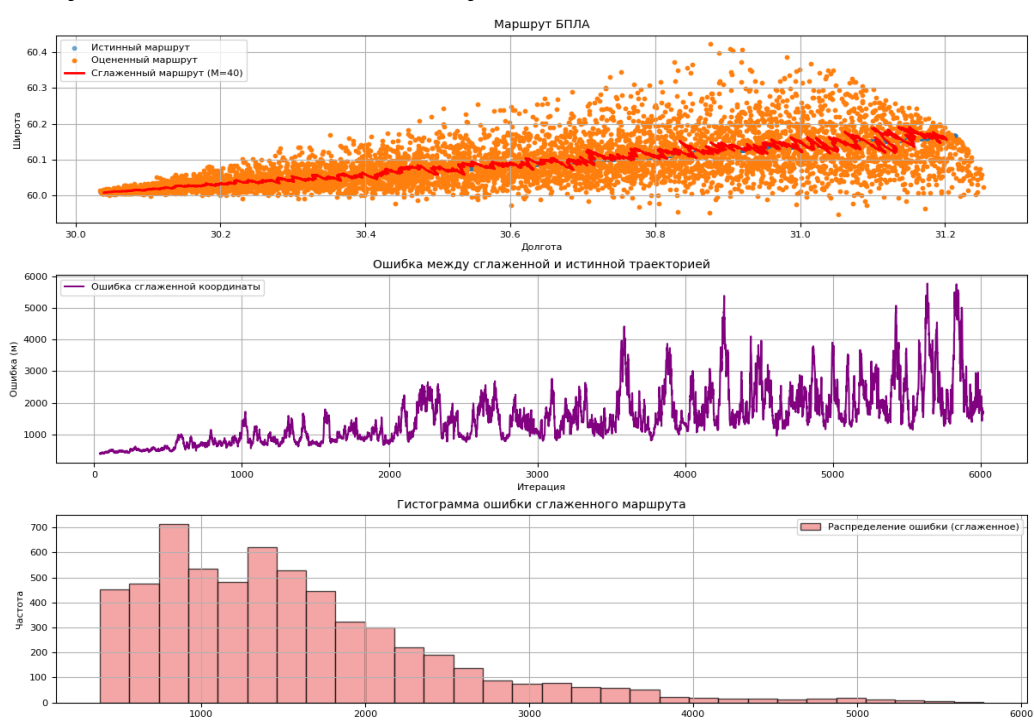


Рисунок 2 – Результаты моделирования при параметрах фильтрации $N=5$, $M=40$

Увеличение значения N до 20 при фиксированном $M=40$ (рисунок 3) приводит к существенному снижению амплитуды колебаний ошибки и более узкому распределению на гистограмме. Это свидетельствует о повышении устойчивости координатного решения за счёт более строгой фильтрации выбросов.

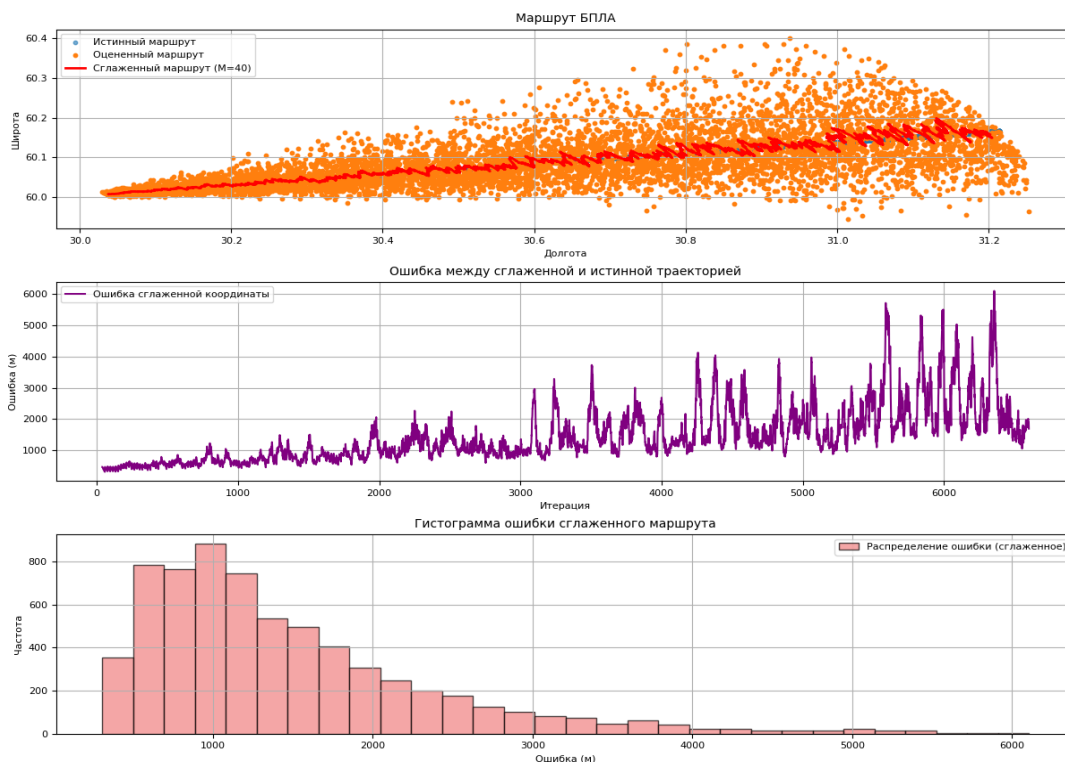


Рисунок 3 – Результаты моделирования при параметрах фильтрации $N=20$, $M=40$

При увеличении окна сглаживания до $M=120$ при $N=20$ (рисунок 4) наблюдается дальнейшее улучшение качества оценивания. Сглаженная траектория максимально приближена к истинной, а гистограмма ошибки характеризуется выраженным пиком и низкой дисперсией.

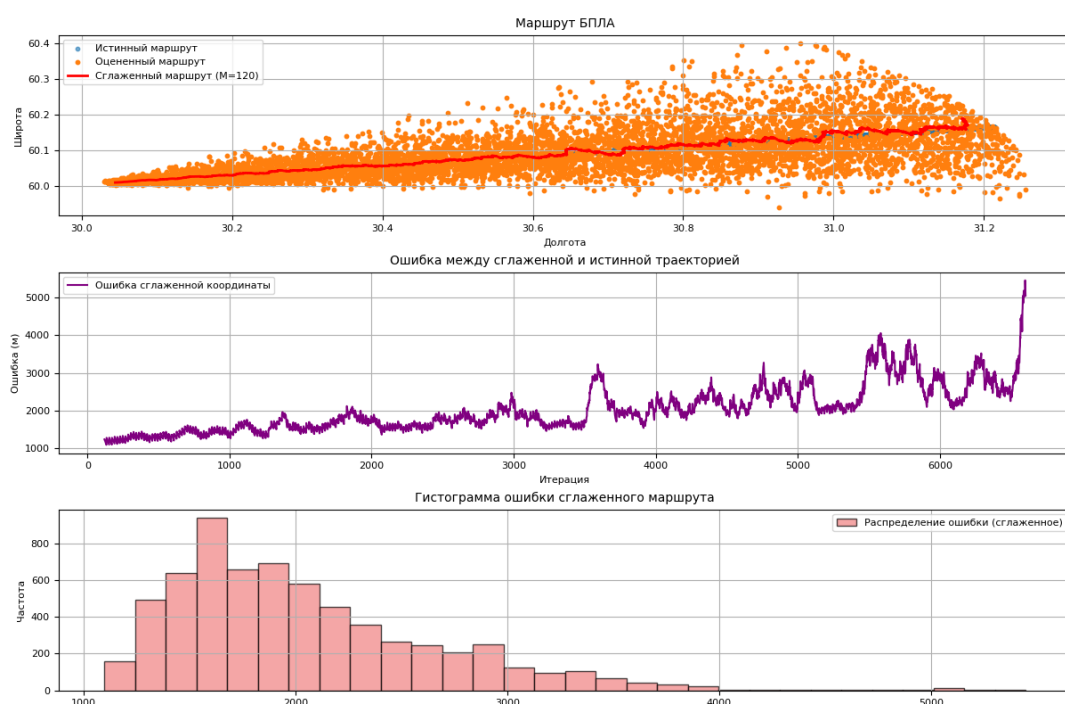


Рисунок 4 – Результаты моделирования при параметрах фильтрации $N=20$, $M=120$

В то же время, при $N=100$, $M=40$ (рисунок 5), система демонстрирует инерционность в реагировании на изменение положения БПЛА. Избыточная фильтрация приводит к потере чувствительности при манёврах, что потенциально снижает оперативность навигационного решения.

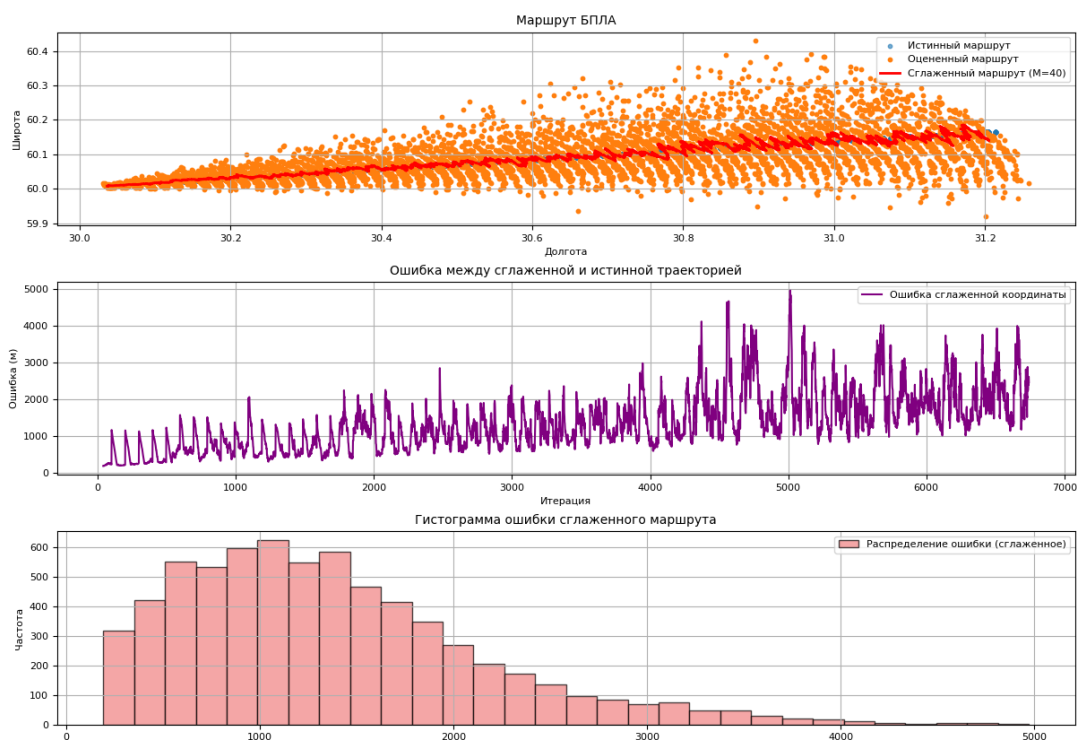


Рисунок 5 – Результаты моделирования при параметрах фильтрации $N=100$, $M=40$

Заключение

В представленной работе разработан и реализован алгоритм определения координат беспилотного летательного аппарата на основе измерения дальностей до двух наземных станций и заданной высоты. Алгоритм построен по модульному принципу, включает механизмы фильтрации выбросов и сглаживания координат, и предназначен для функционирования в условиях ограниченного объёма исходных данных и ограниченных вычислительных ресурсов.

Численное моделирование подтверждает корректность и работоспособность алгоритма в широком диапазоне параметров. Проведённый анализ результатов показал, что точность координатного решения в значительной степени зависит от выбора параметров фильтрации: длины окна отбора достоверных решений N и ширины окна сглаживания M . Оптимальные значения этих параметров подбираются с учётом конкретных условий эксплуатации и характеристик БПЛА.

Следует отметить, что значения параметров, использованные в ходе моделирования (в том числе географические координаты, высоты и уровни погрешностей), заданы искусственно, в исследовательских целях, и не соответствуют реальным характеристикам конкретной аппаратной платформы. Они были выбраны исключительно для демонстрации корректности логики работы алгоритма и оценки его устойчивости в условиях воздействия шумов и неоднозначностей координатного решения.

Уточнение параметров фильтрации, выбор диапазонов допустимых значений, а также адаптация архитектуры алгоритма под реальные условия эксплуатации должны производиться на этапе интеграции в конкретную навигационную систему. Такой этап должен учитывать динамику полёта, характеристики каналов связи, частоту обновления измерений и свойства используемого оборудования. Таким образом, представленная реализация может рассматриваться как обобщённая заготовка, пригодная для последующей настройки и адаптации «по месту» – в зависимости от особенностей конкретной системы управления беспилотного летательного аппарата.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Щербинин В. В. и др. Автономный навигационный комплекс для роботизированных наземных и летательных аппаратов //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – №. 3 (152). – С. 234-243.
2. Waheed, A., Goyal, M., Gupta, D., Khanna, A., Hassanien, A. E., & Pandey, H. M. (2020). An optimized dense convolutional neural network model for disease recognition and classification in corn leaf. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105456. doi:10.1016/j.compag.2020.105456

3. Пат. RU 2258242 С2 Российская Федерация. Способ определения местоположения подвижного объекта / В. И. Еремеев, Е. С. Киселёв, Е. А. Алексеев; заявитель и патентообладатель ОАО «НПП "Радиосвязь"». – № 2003123840; заявл. 11.08.2003; опубл. 27.07.2005. – Бюл. № 21.

4. Пат. RU 2309420 С1 Российская Федерация. Способ определения координат подвижного объекта / С. А. Анисимов, А. А. Клёсов, В. А. Борисов; заявитель и патентообладатель Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого. – № 2005129025; заявл. 22.09.2005; опубл. 27.10.2007. – Бюл. № 30.

5. Способ определения направления на источник радиоизлучения методом анализа области относительно оси симметрии двух рупорных антенн // Патент РФ № RU2593835С2 22.10.2014 / Титков И.В., Ермаков Д.О.

6. Логинов Ю. И. и др. ДАЛЬНОМЕРНО-РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И РЕАЛИЗУЮЩЕЕ ЕГО УСТРОЙСТВО. – 2014.

7. Алешечкин А. М. и др. Исследование методов определения относительных координат группы объектов //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2013. – №. 3 (49). – С. 114-118.

Липанов И. Д., Хомоненко А. Д., Молодкин И. А. Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов //Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – №. 1 (41). – С. 27-36.

9. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems / P. D. Groves. – 2nd ed. – Norwood : Artech House, 2013. – xxii, 800 p. : ill. – ISBN 978-1-60807-005-3.

. Селятыцкий А. А., Гомма М. А. Влияние несоответствия принятой модели реальному объекту измерения на достоверность результатов координатного. –

11. Khattak S., Papachristos C. Energy-and-perception-aware planning and navigation framework for unmanned aerial vehicles // Advances in Mechanical Engineering. - April 2023. - Vol. 15, no. 4. - DOI: 10.1177/16878132231169688.

References

1. Shcherbinin, V. V., & others. (2014). Autonomous navigation complex for robotic ground and aerial vehicles. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie Nauki [News of the Southern Federal University. Technical Sciences]*, (3), 234-243.
2. Waheed, A., Goyal, M., Gupta, D., Khanna, A., Hassanien, A. E., & Pandey, H. M. (2020). An optimized dense convolutional neural network model for disease recognition and classification in corn leaf. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105456. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105456>
3. Yermeev, V. I., Kiselev, E. S., & Alekseev, E. A. (2005). RU Patent No. 2258242 C2. Method for determining the position of a moving object. Russian Agency for Patents and Trademarks (Rospatent).
4. Anisimov, S. A., Klyosov, A. A., & Borisov, V. A. (2007). RU Patent No. 2309420 C1. Method for determining coordinates of a moving object. Russian Agency for Patents and Trademarks (Rospatent).
5. Titkov, I. V., & Ermakov, D. O. (2014). RU Patent No. 2593835C2. Method for determining the direction to a radio source by analyzing the region relative to the axis of symmetry of two horn antennas. Russian Agency for Patents and Trademarks (Rospatent).
6. Loginov, Yu. I., & others. (2014). Range-difference-ranging method for determining the coordinates of radio emission sources and a device for its implementation.
7. Aleshechkin, A. M., & others. (2013). Research of methods for determining relative coordinates of a group of objects. *Siberian Aerospace Journal*, 3(49), 114-118.
8. Lipanov, I. D., Khomonenko, A. D., & Molodkin, I. A. (2025). Comparative analysis of methods for precise positioning of unmanned aerial vehicles. *Intellectual Technologies on Transport [Intelligent Technologies in Transport]*, 1(41), 27-36.
9. Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems* (2nd ed.). Artech House.
10. Selyatitsky, A. A., & Gomma, M. A. (2024). The influence of the discrepancy between the adopted model and the real object of measurement on the reliability of coordinate results.

11. Khattak, S., & Papachristos, C. (2023). Energy-and-perception-aware planning and navigation framework for unmanned aerial vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(4). <https://doi.org/10.1177/16878132231169688>

Информация об авторах

Сергей Борисович Шалунов, соискатель научной степени кандидата технических наук, начальник направления разработки систем радиосвязи ООО «Специальный Технологический Центр», г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 8350-7822; AuthorID: 1257963; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8734-7070>; e-mail: sshalunov@stc-spb.ru

Information about the authors

Sergey B. Shalunov, Doctoral Student, Head of Radio Communication Systems Development Department, Special Technology Center LLC, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 8350-7822; AuthorID: 1257963; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8734-7070>; e-mail: sshalunov@stc-spb.ru

Получено 25 сентября 2025 • Принято к публикации 17 февраля 2026 • Опубликовано 27 февраля 2026

Received 25 September 2025 • Accepted 17 February 2026 • Published 27 February 2026
