

# Метод определения координат БПЛА на основе измерения дальностей до двух наземных станций

С. Б. Шалунов<sup>1</sup>, О. А. Симонина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Специальный Технологический Центр»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)

*Аннотация.* В работе предложен метод определения координат беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе измерения дальностей до двух наземных станций, который может применяться для авиационной навигации, радиотехнических систем позиционирования и мониторинга воздушного пространства. Метод относится к угломерно-разностно-дальномерным и может лечь в основу локальной навигационной системы для БПЛА, используемых в труднодоступных районах. Цель работы заключается в разработке метода определения координат беспилотного летательного аппарата на основе измерения дальностей от БПЛА до ограниченного количества наземных станций и оценке погрешностей измерения, а также получения зависимостей этих погрешностей от других измеримых географических параметров полета БПЛА. В качестве методов использовались математическое моделирование и численный эксперимент на основе разработанной имитационной модели. В результате получены зависимости ошибки измерения местоположения беспилотного летательного аппарата при изменениях значений основных ошибок входных данных и геометрии расположения наземных станций. Таким образом, предложен новый метод определения координат беспилотного летательного аппарата на основе измерения дальностей до двух наземных станций и барометрической высоты, а также определены погрешности измерения для данного метода. Показано, что точность метода существенно зависит от геометрии расположения станций, точности измерения дальности и дальности между станциями и БПЛА, а наиболее благоприятным для работы метода является угловой диапазон  $30^\circ$ – $150^\circ$ , где ошибка позиционирования остаётся минимальной. Теоретическая значимость состоит в предложенной модели представления координат БПЛА, которая легла в основу метода определения местоположения. Практическая значимость состоит в представлении результатов моделирования работы метода в различных сценариях и результатов численных экспериментов, демонстрирующих особенности его применения и факторы, влияющие на точность измерений

*Ключевые слова:* измерение дальности, радиоканал, беспилотный летательный аппарат, определение местоположения, погрешности измерений

*Для цитирования:* Шалунов С. Б., Симонина О. А. Метод определения координат БПЛА на основе измерения дальностей до двух наземных станций // Вестник СибГУТИ. 2026. Т. 20, № 1. С. 57–70. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-1-57-70>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Шалунов С. Б., Симонина О. А., 2026

Статья поступила в редакцию 02.02.2026;  
переработанный вариант – 03.02.2026;  
принята к публикации 27.02.2026.

## 1. Введение

В условиях отсутствия или нестабильности работы глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) возникает необходимость разработки локальных навигационных систем для беспилотного летательного аппарата (БПЛА), которые обеспечивают компромисс

между точностью определения координат и простотой, энергоэффективностью, стоимостью и устойчивостью к внешним воздействиям. В настоящее время существует критическая зависимость от ГНСС, что затрудняет развитие использования БПЛА в сферах, в которых необходимо определять местоположение летательного аппарата в условиях отсутствия спутниковой навигации. При этом существует ряд объективных ограничений для таких систем, называемых локальными навигационными системами (ЛНС). Во-первых, ЛНС должна обеспечивать максимально возможную точность, но при этом минимизировать сложность инфраструктуры. Во-вторых, данная система должна быть максимально универсальна при развертывании вне зависимости от типа местности, а также устойчива к помеховому воздействию. Актуальной остается задача минимизации количества оборудования, размещаемого на поверхности земли или платформах, обеспечения точности определения координат, задание порогов чувствительности к внешним воздействиям, в том числе преднамеренным, а также выполнение требований по надежности системы и возможности обновления информации о местоположении.

Таким образом, существует необходимость разработки метода локальной навигационной системы, который будет отличаться низкой сложностью, минимизировать наземную инфраструктуру и требования к ней, при этом обеспечивать максимально возможную точность определения координат БПЛА.

Так как задача определения местоположения БПЛА для локальных навигационных систем является актуальной, ее активно решают большие группы авторов, особенно отечественных. Разработаны группы методов, такие как навигация с использованием компьютерного зрения [1, 2], навигационных сигналов [3, 4], в том числе в условиях отсутствия сигналов от систем глобального позиционирования [5]. Анализ существующих аэронавигационных систем подробно представлен в работе [6], также предлагается метод повышения точности измерения времени. В работе [7] предлагается методика устранения «слепых зон» и оптимизации итерационного алгоритма в рамках пассивной навигации на основе разностно-дальномерных систем, также много внимания уделяется решению задачи минимизации ошибки определения координат, особенно в случае, когда нет возможности использовать системы глобального позиционирования (или это возможно только частично) [5, 8].

Различные подходы к построению локальной навигационной системы порождают большое количество методов определения местоположения [9]. Отдельным направлением является метод измерения угловых координат, использование которого обусловлено его применимостью в условиях труднодоступной местности [10, 11]. В работе [10] предлагаются методы определения угловых координат и локализации источников радиоволн с помощью панорамного цифрового пеленгатора, который установлен на борту беспилотного летательного аппарата самолётного типа. Для измерения угловых координат объектов использовался фазовый метод, основанный на быстром преобразовании Фурье и синхронном спектральном анализе сигналов в приёмных каналах. В исследовании [12] также рассматривается возможность применения методов определения углов и координат источников радиоволн с помощью измерений фазовых сдвигов сигнала в панорамных фазометрических устройствах, установленных на беспилотных летательных аппаратах. Однако фазовые методы довольно требовательны к вычислительным ресурсам. При этом угломерно-разностно-дальномерные методы могут давать лучшие результаты при использовании одновременного измерения дальностей от объекта до нескольких наземных станций с известными координатами в локальной системе координат [5]. Отметим, что для решения задачи определения местоположения в большинстве случаев обычно используется минимум три наземные станции.

При этом существует ряд угломерно-разностно-дальномерных методов, минимизирующих количество размещаемых на поверхности земли базовых станций и необходимых измерений. Например, в работе [13] предложено пассивное определение в трехмерном пространстве с использованием гибридных измерений разницы во времени прибытия (TDOA) и угла прибытия (AOA) для двух станций. В работе [14] предлагается комбинированный метод, суть которого заключается в измерении угла прихода только на одной станции, при этом

на нескольких других (минимум двух) измеряется время прибытия. Также существует модель в MATLAB, которая позволяет определить влияние топологии расположения базовых станций на точность локализации, а также влияние геометрии на усиление ошибок измерения и аппаратных погрешностей [15].

Предлагаемый метод определения координат беспилотного летательного аппарата основан на измерении дальностей от БПЛА до двух наземных станций с использованием обмена служебными сообщениями в комбинации с барометрической высотой. Потенциально этот метод максимально дешев и прост в развертывании и может быть использован в условиях ограниченных пространственных и временных ресурсов. В основу положен классический принцип транслитерации на сфере [16], активно использующийся в ГНСС, однако в данном случае задача решается только для трех измерений: барометрической высоты и двух дальностей. В этом виде задача требует предварительной разработки модели определения координат и введения ряда ограничений. Также на основе летного эксперимента проведено исследование точности предлагаемого метода.

## 2. Метод определения координат БПЛА

Базовый метод определения координат предназначен для определения местоположения беспилотного летательного аппарата в реальном времени на основе измерения дальностей до двух наземных станций с известными координатами [17]. Метод предлагается применять в следующих случаях: авиационная навигация [18], радиотехнические системы позиционирования [19], специальные применения [20], контроль и мониторинг воздушного пространства [21]. Отмечено, что метод подходит для работы в средах с хорошей радиопрозрачностью (открытые пространства, воздушное пространство, морские и наземные операции).

Определены следующие ограничения метода:

1) Точность метода зависит от ошибок измерения дальности. Метод чувствителен к погрешностям определения дальности  $d_1$  и  $d_2$ . Даже небольшие ошибки могут привести к значительному отклонению в вычисленных координатах, особенно на больших расстояниях [20, 21].

2) Требование к геометрии станций. Станции не должны располагаться слишком близко друг к другу, иначе малые ошибки измерений приведут к большим отклонениям в координатах.

3) Ограничение по дальности. Метод эффективно работает при расстояниях в десятки километров. На очень больших дистанциях ( $>200$  км) влияние кривизны Земли и рефракция радиоволн могут сделать измеряемые значения в радиоканале недостоверными, что увеличит ошибку определения координат БПЛА [22].

4) Ограничение по скоростям движения БПЛА. При скорости выше 200-300 м/с ( $\approx 1000$  км/ч) метод может давать задержку в расчётах из-за быстрого изменения дальностей [23]. В высокоскоростных режимах требуются учёт инерционности системы, предсказательные алгоритмы и иные методы уточнения определения местоположения [24].

5) Наличие отражений и помех. В городских условиях или вблизи крупных объектов возможны многолучевые сигналы, которые могут вносить ошибки в измеренные дальности. Радиопомехи или работа комплексов РЭБ могут полностью нарушить работу метода [25].

6) Количество наземных станций. При использовании двух наземных станций, приведённая математическая модель имеет два решения местоопределения БПЛА, симметричных относительно прямой, соединяющей две наземные станции. Для симулируемых условий этого достаточно, если заранее задать, на какой стороне этой линии будет осуществляться полет БПЛА, и произвести запрет на пересечение этой линии. Данное ограничение снимается использованием трех и более наземных станций [26], однако для применения данного метода к задаче позиционирования БПЛА для двух станций необходимо внести соответствующие поправки.

## 2.1. Математическая модель определения координат

Для реализации метода определения координат БПЛА необходимы следующие начальные данные:

- 1) широта и долгота первой станции:  $(\varphi_1, \lambda_1)$ ;
- 2) широта и долгота второй станции:  $(\varphi_2, \lambda_2)$ ;
- 3) высоты станций над уровнем моря:  $h_1$  и  $h_2$ ;
- 4) измеренные по задержкам приема радиосигнала дальности от БПЛА до станций:  $d_1$  и  $d_2$ ;
- 5) барометрическая высота БПЛА над уровнем моря:  $H_{\text{БПЛА}}$

Преобразуем географические координаты  $(\varphi_1, \lambda_1)$  в декартову систему  $(X_i, Y_i)$  координат относительно опорной точки (например, первой станции с координатами  $\varphi_1, \lambda_1$ ), используя приближенные формулы [25] для сферической Земли:

$$X_i = R_{\text{Земли}} \cos(\varphi) \Delta\lambda \frac{\pi}{180}, \quad (1)$$

$$Y_i = R_{\text{Земли}} \Delta\varphi \frac{\pi}{180}, \quad (2)$$

где:

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_1, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_1. \quad (4)$$

Так как известны расстояния до станций ( $d_1$  и  $d_2$ ), БПЛА должен находиться на пересечении двух сфер с центрами в наземных станциях. Уравнения сфер с радиусами  $d_1$  и  $d_2$  можно записать в геоцентрических координатах:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (H_{\text{БПЛА}} - h_1)^2 = d_1^2, \quad (5)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (H_{\text{БПЛА}} - h_2)^2 = d_2^2, \quad (6)$$

Высота БПЛА известна, можно исключить вертикальную компоненту и перейти к горизонтальным радиусам [2]:

$$r_1 = \sqrt{d_1^2 - (H_{\text{БПЛА}} - h_1)^2}, \quad (7)$$

$$r_2 = \sqrt{d_2^2 - (H_{\text{БПЛА}} - h_2)^2}. \quad (8)$$

Окружности задаются уравнениями:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2, \quad (9)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2. \quad (10)$$

Вычитая второе уравнение из первого, получаем линейное уравнение относительно  $x$  и  $y$ . Решая систему, находим  $X$  и  $Y$  в декартовой системе:

$$X_{\text{БПЛА}} = x_1 + \alpha (x_2 - x_1), \quad (11)$$

$$Y_{\text{БПЛА}} = y_1 + \alpha (y_2 - y_1), \quad (12)$$

где  $\alpha$  вычисляется как:

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

Здесь  $d_{12}$  – расстояние между станциями, определяется как:

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

Используем обратное преобразование декартовых координат в географические [11]:

$$\varphi_{\text{БПЛА}} = \varphi_1 + \frac{Y_{\text{БПЛА}}}{R_{\text{Земли}}} \frac{180}{\pi}, \quad (15)$$

$$\lambda_{\text{БПЛА}} = \lambda_1 + \frac{X_{\text{БПЛА}}}{R_{\text{Земли}} \cos(\varphi)} \frac{180}{\pi}. \quad (16)$$

Измеренные дальности и высота БПЛА содержат ошибки: вычисленные координаты  $X_{\text{БПЛА}}$  и  $Y_{\text{БПЛА}}$  и высота  $H_{\text{БПЛА}}$  отличаются от истинных ( $X_{\text{ИСТ}}$ ,  $Y_{\text{ИСТ}}$ ,  $H_{\text{ИСТ}}$ ). Среднее квадратичное отклонение определяется как:

$$\sigma_x = \sqrt{E [(X_{\text{БПЛА}} - X_{\text{ИСТ}})^2]}, \quad (17)$$

$$\sigma_y = \sqrt{E [(Y_{\text{БПЛА}} - Y_{\text{ИСТ}})^2]}, \quad (18)$$

$$\sigma_z = \sqrt{E [(H_{\text{БПЛА}} - H_{\text{ИСТ}})^2]}. \quad (19)$$

Ошибка определения высоты возникает из-за двух факторов:

- ошибка измерения дальности  $\sigma_d$ ;
- ошибка измерения барометрической высоты  $\sigma_H$ .

Ошибка измерения дальностей  $d_1$  и  $d_2$  влияет на вычисление координат  $X$  и  $Y$  БПЛА, а ошибка определения высоты БПЛА влияет на корректировку радиусов окружностей. Если использовать аппроксимацию через частные производные, то ошибка измерения высоты будет иметь вид:

$$\sigma_H^2 \approx \left( \frac{\delta H}{\delta d_1} \sigma_{d_1} \right)^2 + \left( \frac{\delta H}{\delta d_2} \sigma_{d_2} \right)^2 + \sigma_{\text{Барометр}}^2, \quad (20)$$

где  $\sigma_{d_1}$  и  $\sigma_{d_2}$  – ошибки измерения дальностей,  $\sigma_{\text{Барометр}}^2$  – ошибка барометрического высотомера.

## 2.2. Алгоритм метода определения координат БПЛА

Метод определения координат БПЛА основан на измерении расстояний (дальностей) до двух наземных станций, имеющих известные координаты и расположенных на определённом расстоянии друг от друга. Полученные дальности позволяют определить возможные точки пересечения сфер, заданных радиусами, равными измеренным дальностям.

После нахождения пересечения сфер вычисленные декартовы координаты БПЛА переводятся в широту и долготу, соответствующие глобальной географической системе.

Алгоритм включает контроль корректности данных, обработку ошибок и повторное выполнение, если найденные координаты не удовлетворяют требованиям точности (рисунок 1).

Этапы алгоритма:

1. Начало. Алгоритм инициализируется, система готовится к получению входных данных.

2. Получение входных данных. По радиоканалу БПЛА получает от наземных станций информацию об их координатах и высотах ( $\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2, h_1, h_2$ ), одновременно измеряя дальность до каждой из наземных станций ( $d_1, d_2$ ), из бортового оборудования по локальным протоколам (например, CAN, UART или прочие) вычислитель получает информацию о результатах измерения барометрического высотомера  $H_{\text{БПЛА}}$ .

3. Если данные отсутствуют, являются неполными или содержат ошибки, алгоритм переходит в начало и запрашивает данные заново.

4. Преобразование координат в декартову систему. Географические координаты наземных станций переводятся в декартову систему координат с началом отсчета в точке расположения первой станции. Для перевода используется приближенная модель сферической формы Земли. Если преобразование не удалось, алгоритм возвращается к началу для повторного получения данных.

5. Нахождение координат пересечения сфер. Каждая станция образует сферу радиусом, равным измеренным дальностям ( $d_1, d_2$ ). Расчётные координаты БПЛА определяются геометрическим местом точек пересечения сфер, построенных от наземных станций с радиусами, равными измеренным дальностям до БПЛА при известном значении высот. Количество решений (единственная точка или множество точек) зависит от доступности значений высот, числа станций и их пространственной конфигурации. Если станции две, то количе-

ство решений уравнения симметрично линии, соединяющей станции, будет равно двум (пересечение окружности и плоскости высоты), выбор из этих решений происходит в автоматическом режиме при заранее заданных ограничениях маршрута полета БПЛА, либо при намеренном пересечении прямой линии между двух станций происходит ручное переключение выбора необходимого решения. Если система уравнений не имеет решений (например, сферы не пересекаются из-за ошибки в измерении дальностей), алгоритм возвращается в начало для получения новых данных.

6. Перевод вычисленных координат в сферические координаты. После нахождения точки пересечения окружностей в декартовой системе данные преобразуются обратно в широту и долготу с учетом радиуса Земли и ее сферической формы.

7. Формирование выходных данных. После успешного выполнения всех вычислений, формируются выходные данные вида « $\varphi_{\text{БПЛА}}$ ,  $\lambda_{\text{БПЛА}}$ ». Эти данные могут быть переданы на отображение в навигационной системе, бортовому автопилоту или использованы для дальнейших вычислений. Далее алгоритм автоматически переходит в начало и повторяет процесс, пока не получит команду на остановку.

8. Конец. При отсутствии необходимости работы алгоритма он завершает свою работу.

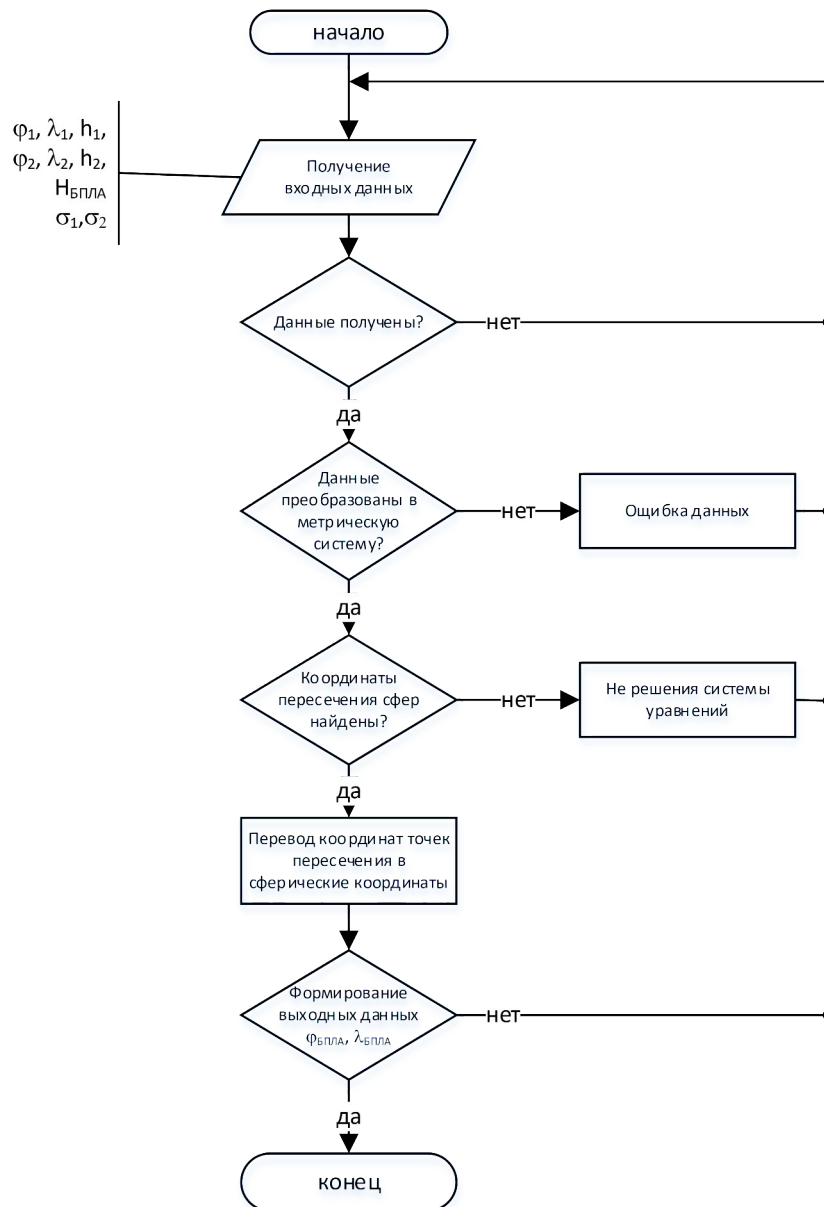


Рис. 1. Алгоритм определения координат БПЛА по двум расстояниям и барометрической высоте

### 3. Оценка погрешностей метода

Оценка точности метода определения координат БПЛА осуществляется с использованием моделирования движения БПЛА и внесения ошибок в измерения дальностей и высоты. Моделирование проводилось на языке Python с использованием библиотек numpy, геору, pandas и scipy.

Программа позволяет анализировать влияние параметров, таких как:

1. радиус движения БПЛА ( $R$ );
2. ошибка измерения дальности ( $\sigma_d$ );
3. ошибка измерения высоты ( $\sigma_H$ );
4. расстояние между наземными станциями.

Моделирование выполняется в нескольких экспериментах с варьированием этих параметров, что позволяет количественно оценить влияние ошибок на точность вычисления координат. Проводится 3 итерации изменения каждого из 4-х параметров, число геометрических точек симуляции – 360, количество симуляций данных в каждой точке – 10 000. Для удобства оценки значений ошибок расчеты и визуализация будут проходить в декартовой системе координат.

Пусть БПЛА движется по круговой траектории радиусом  $R$ , центр которой находится посередине между двумя наземными станциями. Координаты истинного положения БПЛА на каждом временном шаге  $t$  вычисляются как:

$$X_{ИСТ}(t) = X_{ЦЕНТР} + R \cos(\omega t), \quad (20)$$

$$Y_{ИСТ}(t) = Y_{ЦЕНТР} + R \sin(\omega t), \quad (21)$$

$$Z_{ИСТ}(t) = H_{БПЛА}, \quad (22)$$

где:

$$\omega = \frac{V}{R} - \text{угловая скорость.} \quad (23)$$

В каждый момент времени рассчитываются истинные дальности от БПЛА до наземных станций:

$$d_{1 ИСТ}(t) = \sqrt{(X_{ИСТ} - X_1)^2 + (Y_{ИСТ} - Y_1)^2 + (H_{БПЛА} - h_1)^2}, \quad (24)$$

$$d_{2 ИСТ}(t) = \sqrt{(X_{ИСТ} - X_2)^2 + (Y_{ИСТ} - Y_2)^2 + (H_{БПЛА} - h_2)^2}. \quad (25)$$

Измеренные дальности моделируются с учетом случайных ошибок как:

$$d_{1 ИЗМ} = d_{1 ИСТ} + \varepsilon_d, \quad (26)$$

$$d_{2 ИЗМ} = d_{2 ИСТ} + \varepsilon_d, \quad (27)$$

$$Z_{ИЗМ}(t) = Z_{ИСТ}(t) + \varepsilon_H, \quad (28)$$

$$\varepsilon_d \sim N(0, \sigma_d^2), \quad \varepsilon_H \sim N(0, \sigma_H^2), \quad (29)$$

где  $\sigma_d$  и  $\sigma_H$  – стандартное отклонение ошибки измерения дальности и высоты.

Решение описанной в математической модели системы уравнений пересечения двух сфер (5) и (6) с учетом известной высоты дает оценку положения БПЛА в пространстве  $(X_i, Y_i, Z_i)$ .

Для первичного моделирования используются следующие данные: расстояние до БПЛА 12 километров, расстояние между станциями 200 метров, линия, соединяющая наземные станции, проходит вдоль оси абсцисс, ошибка определения высоты 10 метров, ошибка определения дальности 10 метров. Средняя ошибка определения местоположения рассчитывается по 9000 значений с достоверностью 95 процентов. Результаты моделирования с изменением одного параметра показаны на рисунке 2.

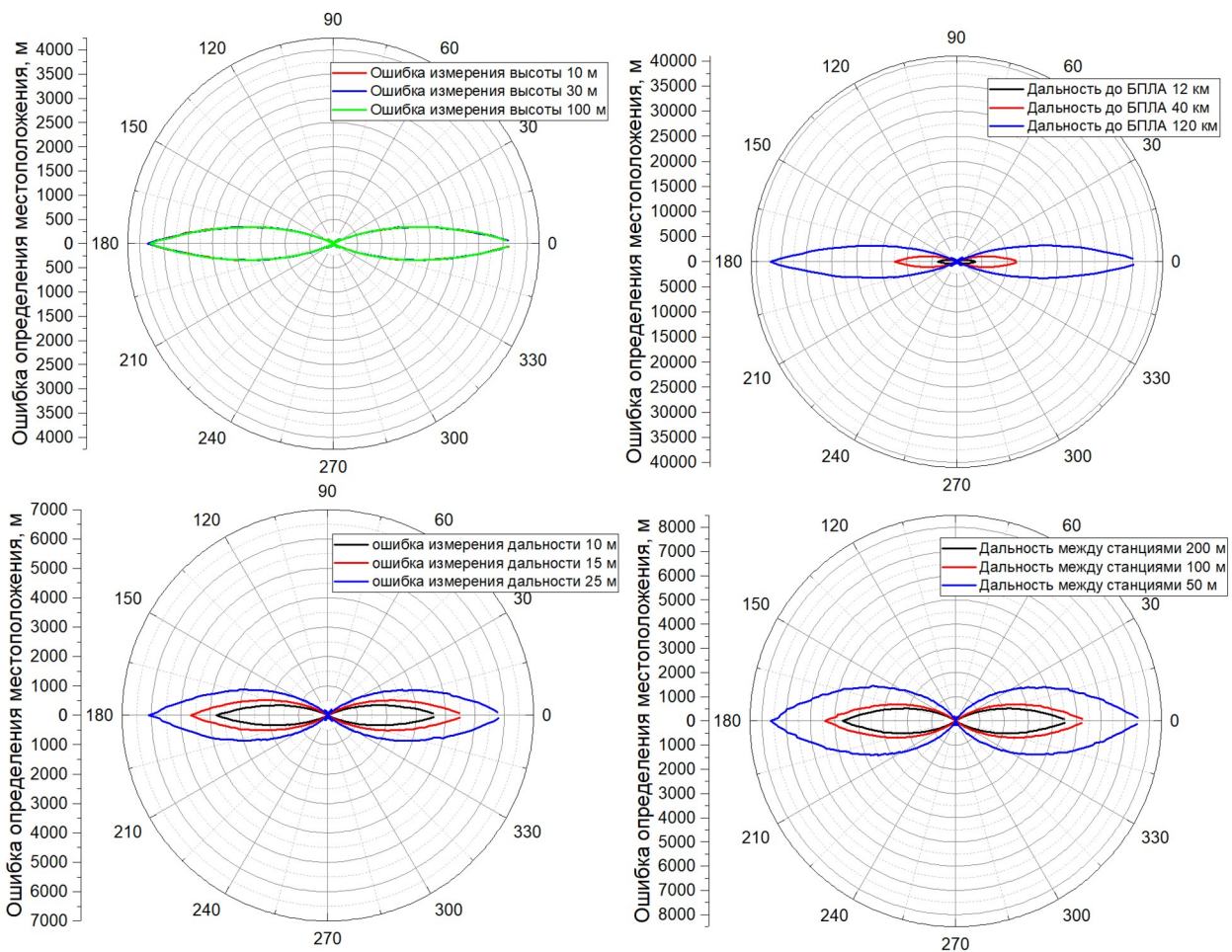


Рис. 2. Результаты моделирования ошибок местоположения БПЛА при изменениях значений основных ошибок входных данных и геометрии расположения наземных станций

Представленные графики отображают влияние различных факторов на ошибку определения местоположения БПЛА с двумя наземными станциями. На верхнем левом графике показана зависимость ошибки местоположения от ошибки измерения высоты. При увеличении ошибки измерения высоты с 10 м до 100 м (синяя, красная, зелёная кривые) наблюдается незначительный рост ошибки определения местоположения. Форма ошибки симметрична и имеет характерное двулучевое распределение. Основной вклад вносится при больших значениях углов обзора (около  $180^\circ$  и  $0^\circ$ ). На графике 2 (верхний правый) показывает, что при увеличении дальности до БПЛА с 12 км до 120 км (чёрная, красная, синяя кривые) ошибка местоположения значительно возрастает. Геометрия распределения ошибки сохраняется, но при увеличении дальности ошибка возрастает нелинейно. Это подтверждает, что точность местоположения значительно снижается при увеличении расстояния между БПЛА и наземными станциями. Рост ошибки измерения дальности с 10 м до 25 м (синяя, красная, чёрная кривые на нижнем левом рисунке) приводит к увеличению ошибки определения местоположения. Ошибка остается симметричной относительно оси  $180^\circ$ – $0^\circ$ , а форма графика аналогична предыдущим случаям. Это демонстрирует, что точность измерения дальности напрямую влияет на точность местоположения. При уменьшении расстояния между станциями с 200 м до 50 м (чёрная, красная, синяя кривые на правом нижнем графике) ошибка местоположения значительно возрастает. Это подтверждает важность максимально возможного разнесения станций для увеличения точности навигации.

Для оценки точности определения местоположения БПЛА были проведены численные эксперименты в угловом диапазоне  $30^\circ$ – $150^\circ$ , который является наиболее благоприятным для работы метода. Моделирование охватывало анализ влияния ошибки измерения

дальности и удалённости БПЛА от наземных станций на итоговую погрешность позиционирования. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.

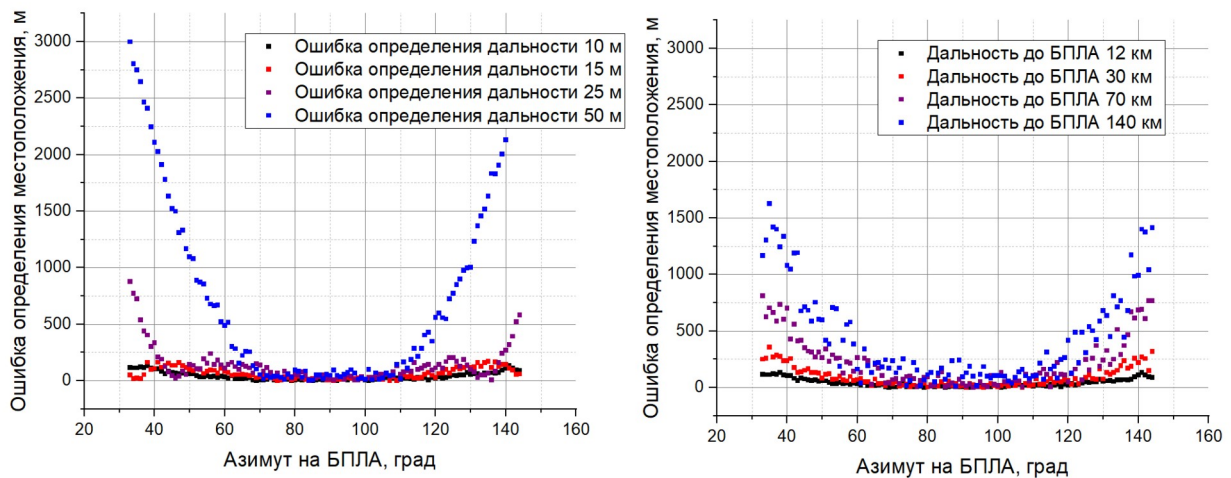


Рис. 3. Результаты моделирования ошибок местоопределения в благоприятном угловом диапазоне

Увеличение ошибки определения дальности с 10 м до 50 м (черные, красные, фиолетовые и синие маркеры на левом графике) приводит к росту ошибки определения местоположения. В центральной части исследуемого сектора (азимут  $60^{\circ}$ – $120^{\circ}$ ) ошибка остаётся минимальной, что подтверждает устойчивость системы в данном угловом диапазоне. За пределами углов  $40^{\circ}$  и  $140^{\circ}$  наблюдается экспоненциальный рост ошибки, особенно при увеличении погрешности измерения дальности до 50 м. При 12 км (черные маркеры на правом графике) погрешность остается минимальной, не превышая 100 м даже на краях сектора. При увеличении дальности до 70 км (фиолетовые маркеры) ошибка возрастает в 2–3 раза, но остаётся приемлемой в диапазоне  $60^{\circ}$ – $120^{\circ}$ . При 140 км (синие маркеры) фиксируется резкий рост ошибки вне центрального сектора, что делает навигацию ненадежной при больших удаленностях.

#### 4. Заключение

Таким образом, в данной работе предложен и исследован ресурсоэффективный метод, который, в отличие от известных двухстанционных методов, основанных на измерении углов или их комбинации с временными задержками, использует только измерения дальности и барометрическую высоту. Для предлагаемого метода путем масштабного численного моделирования получены количественные зависимости погрешностей и определен оптимальный угловой диапазон.

В ходе исследования разработана и проанализирована математическая модель определения координат БПЛА. Проведённый анализ ошибок показал, что точность метода существенно зависит от геометрии расположения станций, точности измерения дальности и дальности между станциями и БПЛА.

Результаты моделирования подтвердили, что наименьшая погрешность позиционирования достигается в угловом диапазоне  $30^{\circ}$ – $150^{\circ}$ . Метод продемонстрировал высокую эффективность и может применяться для авиационной навигации, радиотехнических систем позиционирования и мониторинга воздушного пространства.

В дальнейшем планируется практическое апробирование разработанной модели в реальных условиях, с проведением натурных испытаний с последующим сравнением фактических ошибок позиционирования с теоретическими значениями, рассчитанными по математической модели. Это позволит оценить её применимость в различных сценариях эксплуатации и уточнить предельные условия её эффективности.

## Литература

1. *Arafat M. Y., Alam M. M., Moh S.* Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges //Drones. 2023. V. 7, №. 2. P. 89.
2. *Stuckey H. et al.* A spatial localization and attitude estimation system for unmanned aerial vehicles using a single dynamic vision sensor //IEEE Sensors Journal. 2022. T. 22, №. 15, С. 15497–15507.
3. *Лежанкин Б. В., Ерохин В. В., Малисов Н. П.* Управление траекторией полета беспилотного летательного аппарата при различной конфигурации источников навигационной информации //Среде Эксперто: транспорт, общество, образование, язык. 2024. №. 1. С. 113–127.
4. *Коновалов К. Д.* Алгоритм планирования маршрута БПЛА в условиях недостатка визуальных ориентиров //Системы анализа и обработки данных. 2024. №. 2 (94). С. 37–54.
5. *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.
6. *Кондрашов Я. В., Фиалкина Т. С., Рябец А. П.* Методы и средства измерения координат воздушных судов по временным запаздываниям сигналов в многопозиционных радиодальномерных аэронавигационно-посадочных системах //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. №. 201. С. 23–30.
7. *Матвеев Б. В. и др.* Исследование свойств разностно-дальномерной системы произвольной конфигурации с итерационным алгоритмом //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. №. 1. С. 111–115.
8. *Исаев М. А., Исаев А. М., Линец Г. И.* Метод вычисления параметров линейного движения беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия сигналов спутниковых радионавигационных систем на этапе посадки //Системы управления, связи и безопасности. 2022. №. 3. С. 67–89.
9. *Гир А. А., Костылев А. А., Чернышов А. В.* Сравнительный анализ методов позиционирования беспилотных летательных аппаратов с помощью радио //Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2021). 2021. С. 110–113.
10. *Шалунов С. Б., Курочкин А. С., Измestьева Е. А.* Выбор метода реализации локальной навигационной системы для беспилотного летающего аппарата // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. №. 4. С. 48–64.
11. *Zhidko E. A., Razin'kov S. N.* Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters //Measurement Techniques. 2020. V. 62, №. 10. P. 893–899.
12. *Shevtsov V. A. et al.* Experimental Estimates of Angular Coordinates and Location of Radio Emission Sources in Unmanned Aircraft Monitoring Systems //Russian Aeronautics. 2021. V. 64. P. 562–570.
13. *Yin J. et al.* A simple and accurate TDOA-AOA localization method using two stations //IEEE Signal Processing Letters. 2015. V. 23, №. 1. P. 144–148.
14. *Kang X. et al.* An efficient hybrid multi-station TDOA and single-station AOA localization method //IEEE Transactions on Wireless Communications. 2023. V. 22, №. 8. P. 5657-5670.
15. *Nemati M., Baykas T., Choi J.* Performance of TDOA and AOA localization techniques for different base-stations topologies //2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). IEEE, 2019. P. 1–7.
16. *Шабанов Э. В., Гиниятуллин В. М.* Дифференциальная гиперболическая трилатерация //Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15, №. 2. С. 63–69.

17. *Гладышев А. Б. и др.* Компьютерная модель локальной системы навигации на основе псевдоспутников // *Моделирование неравновесных систем-2017*. 2017. С. 27–31.
18. *Комарова Н. В., Мирошниченко А. В.* Способ определения местоположения и вектора скорости полета летательного аппарата // *Авиационные системы в XXI веке*. 2022. С. 112–113.
19. *Domuta I., Palade T. P.* Two-way ranging algorithms for clock error compensation // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. V. 70, №. 8. P. 8237–8250.
20. *Степаненко Н. Н., Маругин А. С., Орлов В. К.* Определение местоположения в замкнутых пространствах // *СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК*. 2021. №. 1. С. 57–60.
21. *Цветков В. Я.* Определение координат на основе дальномерных измерений // *Вектор ГеоНаук*. 2021. Т. 4, №. 3. С. 75–80.
22. *Павленко А. В.* Модель расчета дальности связи радиорелейной линии прямой видимости // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018)*. 2018. С. 253–256.
23. *Григорьев С. В., Лабутин В. А., Платонов В. В.* Радионавигационные системы воздушных судов – СПб.: СПбГУГА, 2017.
24. *Степанов О. А., Исаев А. М.* Сравнительный анализ эффективности алгоритмов оценивания в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования // *XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023)*. 2023. С. 219–222.
25. *Евтушенко О. А., Ермошенко Ю. М.* Влияние отражений от подстилающей поверхности на качество функционирования аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // *Евразийский Союз Ученых*. 2015. №. 6-2 (15). С. 80–84.
26. *Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н.* Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография // *Красноярск: Сиб. федер. ун-т*. 2012.
27. *Кафтан В. И.* Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации // *Геопрофи: научно-технический журнал по геодезии, картографии и навигации*. 2008. №. 3. С. 60-63.

### **Шалунов Сергей Борисович**

руководитель направления (ООО «Специальный Технологический центр», 195220, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. Муниципальный Округ Пискаревка, пр-кт Непокорённых, д. 17, к. 4, литера В), тел. +7-812-244-33-13, e-mail: sshalunov@stc-spb.ru. ORCID ID: 0009-0004-8734-7070.

### **Симонина Ольга Александровна**

к.т.н., доцент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СпбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1), тел. +7-812-305-12-68, e-mail: olga.simonina@sut.ru. ORCID ID: 0000-0002-3245-7959.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.*

## UAV Positioning Method Based On Distance Measurements To Two Ground Stations

Sergey B. Shalunov<sup>1</sup>, Olga A. Simonina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Special Technology Center LLC, Russia

<sup>2</sup>The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

**Abstract:** The paper proposes a method for determining the coordinates of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on measurements of ranges up to two ground stations that can be used in aviation navigation, radio positioning, and airspace surveillance. The method relies on an angular-difference rangefinder and forms the basis for a local navigation system used in difficult-to-access areas. The goal of the study is to develop an approach for determining UAV positions based on measuring distances from the vehicle to a limited set of ground locations and estimating errors in these measurements, as well as establishing dependencies between these errors and other geographical parameters related to the flight of the UAV. Mathematical modeling, numerical simulations, and experiments based on a developed simulation model are used as techniques. As a result of this work, dependencies of errors in determining the position of a UAV are obtained as a function of changes in key errors in input data and geometry of ground station locations. A new method for locating UAVs using ranges to two stations and barometric altimetry has been proposed. Errors associated with this method are also determined. It has been shown that accuracy of this method depends significantly on the geometry and accuracy of station locations, range measurements, and distance between stations and UAVs. The most favorable range for operation is between 30 and 150 degrees, where positioning errors remain minimal. Theoretical significance lies in a model for representing coordinates of UAVs, which forms the basis of the localization method. Practical significance is in presenting results from simulations of method operation in various scenarios, as well as results from numerical experiments that demonstrate features of application and factors influencing measurement accuracy.

**Keywords:** distance measurement, radio channel, unmanned aerial vehicle, positioning, measurement errors.

**For citation:** Shalunov S. B., Simonina O. A. UAV Positioning Method Based On Distance Measurements To Two Ground Stations [Paper Preparation Manual for Vestnik SibGUTI]. *Vestnik SibGUTI*, 2026, vol. 20, no. 1, pp. 59-70. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-1-59-70>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Shalunov S. B., Simonina O. A., 2026

The article was submitted: 02.02.2026;  
revised version: 03.02.2026;  
accepted for publication 27.02.2026.

### References

1. Arafat M. Y., Alam M. M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges // *Drones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 89.
2. Stuckey H. et al. A spatial localization and attitude estimation system for unmanned aerial vehicles using a single dynamic vision sensor // *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 15, pp. 15497-15507.
3. Lezhankin B. V., Erokhin V. V., Malisov N. P. *Upravlenie traektoriej poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri razlichnoj konfiguracii istochnikov navigacionnoj informacii* [Control of the flight path of an unmanned aerial vehicle with different configurations of navigation information sources]. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk*, 2024, no. 1, pp. 113-127.
4. Konovalov K. D. *Algoritm planirovaniya marshruta BPLA v usloviyakh nedostatka vizual'nykh orientirov* [UAV route planning algorithm in conditions of lack of visual landmarks]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh*, 2024, no. 2 (94), pp. 37-54.

5. Shcherbinin V. V. et al. *Avtonomnyj navigacionnyj kompleks dlya robotizirovannykh nazemnykh i letatel'nykh apparatov* [Autonomous navigation system for robotic land and aircraft]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3 (152), pp. 234-243.
6. Kondrashov YA. V., Fialkina T. S., Ryabec A. P. *Metody i sredstva izmereniya koordinat vozdukhnykh sudov po vremennym zapazdyvaniyam signalov v mnogopozicionnykh radiodal'nomernykh aehronavigacionno-posadochnykh sistemakh* [Methods and means of measuring aircraft coordinates based on time delays of signals in multi-position radio-ranging air navigation and landing systems]. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, 2014, no. 201, pp. 23-30.
7. Matveev B. V. et al. *Issledovanie svoystv raznostno-dal'nomernoj sistemy proizvol'noj konfiguracii s iteracionnym algoritmom* [Investigation of the properties of a difference-range measuring system of arbitrary configuration with an iterative algorithm]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2015, vol. 11, no. 1, pp. 111-115.
8. Isaev M. A., Isaev A. M., Linec G. I. *Metod vychisleniya parametrov linejnogo dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh otsutstviya signalov sputnikovyykh radionavigacionnykh sistem na eh tape posadki* [A method for calculating the parameters of linear motion of an unmanned aerial vehicle in the absence of signals from satellite radio navigation systems at the landing stage]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2022, no. 3, pp. 67-89.
9. Gir A. A., Kostylev A. A., Chernyshov A. V. *Sravnitel'nyj analiz metodov pozicionirovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov s pomoshch'yu radio* [Comparative analysis of methods of positioning unmanned aerial vehicles using radio]. *Novye informacionnye tekhnologii i sistemy (NITIS-2021)*, 2021, pp. 110-113.
10. Shalunov S. B., Kurochkin A. S., Izmest'eva E. A. *Vybor metoda realizacii lokal'noj navigacionnoj sistemy dlya bespilotnogo letayushchego apparata* [Choosing a method for implementing a local navigation system for an unmanned aerial vehicle]. *Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 48-64.
11. Zhidko E. A., Razin'kov S. N. Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 893-899.
12. Shevtsov V. A. et al. Experimental Estimates of Angular Coordinates and Location of Radio Emission Sources in Unmanned Aircraft Monitoring Systems. *Russian Aeronautics*, 2021, vol. 64, pp. 562-570.
13. Yin J. et al. A simple and accurate TDOA-AOA localization method using two stations // *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 144-148.
14. Kang X. et al. An efficient hybrid multi-station TDOA and single-station AOA localization method. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, vol. 22, no. 8, pp. 5657-5670.
15. Nemati M., Baykas T., Choi J. Performance of TDOA and AOA localization techniques for different base-stations topologies. 2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). *IEEE*, 2019, pp. 1-7.
16. Shabanov E. V., Giniyatullin V. M. *Differencial'naya giperbolicheskaya trilateraciya* [Differential hyperbolic trilateration]. *Ehlektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 63-69.
17. Gladyshev A. B. et al. *Komp'yuternaya model' lokal'noj sistemy navigacii na osnove psevdosputnikov* [A computer model of a local navigation system based on pseudo-satellites]. *Modelirovanie neravnovesnykh sistem-2017*, 2017, pp. 27-31.
18. Komarova N. V., Miroshnichenko A. V. *Sposob opredeleniya mestopolozheniya i vektora skorosti poleta letatel'nogo apparata* [A method for determining the location and velocity vector of an aircraft]. *Aviacionnye sistemy v XXI veke*, 2022, pp. 112-113.
19. Domuta I., Palade T. P. Two-way ranging algorithms for clock error compensation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 8, pp. 8237-8250.
20. Stepanenko N. N., Marugin A. S., Orlov V. K. *Opredelenie mestopolozheniya v zamknutykh prostranstvakh* [Location detection in confined spaces]. *SPBNTOREHS: trudy ezhegodnoj NTK*, 2021, no. 1, pp. 57-60.
21. Cvetkov V. YA. *Opredelenie koordinat na osnove dal'nomernykh izmerenij* [Determination of coordinates based on rangefinder measurements]. *Vektor GeONauk*, 2021, vol. 4, no. 3, pp. 75-80.

22. Pavlenko A. V. *Model' rascheta dal'nosti svyazi radiorelejnoj linii pryamoj vidimosti* [A model for calculating the communication range of a line-of-sight radio relay]. Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2018), 2018, pp. 253-256.
23. Grigor'ev S. V., Labutin V. A., Platonov V. V. *Radionavigacionnye sistemy vozdushnykh sudov* [Aircraft radio navigation systems]. SPb.: SPBGUGA, 2017.
24. Stepanov O. A., Isaev A. M. *Sravnitel'nyj analiz ehffektivnosti algoritmov ocenivaniya v zadachakh obrabotki navigacionnoj informacii na osnove predskazatel'nogo modelirovaniya* [Comparative analysis of the effectiveness of estimation algorithms in navigation information processing tasks based on predictive modeling]. XVI Vserossiyskaya mul'tikonferenciya po problemam upravleniya (MKPU-2023), 2023, pp. 219-222.
25. Evtushenko O. A., Ermoshenko Y. M. *Vliyaniye otrazhenij ot podstilayushchej poverkhnosti na kachestvo funkcionirovaniya apparatury potrebitel'ev sputnikovyykh radionavigacionnykh sistem* [The influence of reflections from the underlying surface on the quality of functioning of consumer equipment of satellite radio navigation systems]. Evrazijskij Soyuz Uchenykh, 2015, no. 6-2 (15), pp. 80-84.
26. Tyapkin V. N., Garin E. N. *Metody opredeleniya navigacionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoj radionavigacionnoj sistemy GLONASS* [Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012.
27. Kaftan V. I. *Sistemy koordinat i sistemy otscheta v geodezii, geoinformatike i navigacii* [Coordinate and reference systems in geodesy, geoinformatics and navigation]. Geoprofi: nauchno-tekhnicheskij zhurnal po geodezii, kartografii i navigacii, 2008, no. 3, pp. 60-63.

#### **Sergey B. Shalunov**

Head of the department (LLC "Special Technological Center", 195220, St. Petersburg, ext. ter. g. Piskarevka Municipal District, Nepokorenykh ave., 17, room 4, letter B.), phone: +7 911 710 9178, e-mail: sshalunov@stc-spb.ru. ORCID ID: 0009-0004-8734-7070.

#### **Olga A. Simonina**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering (St. Petersburg State University of Higher Education Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications», 22, Bolshhevikov Prospect, Building 16 Saint Petersburg, 193232, Russia) tel. +7 921 746 3248, e-mail: olga.simonina@sut.ru, simonina@bk.ru. ORCID ID: 0000-0002-3245-7959.