

УДК 621.396

## Сравнительный анализ двух способов локального позиционирования БПЛА и формирование требований к их экспериментальной проверке

Шалунов С. Б. ✉, Курочкин А. С., Измestьева Е. А.

ООО «Специальный технологический центр»,  
Санкт-Петербург, 195220, Российская Федерация

**Постановка задачи.** Рассмотрена проблема локального позиционирования беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченной доступности сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. **Целью** работы является количественная оценка точности двух различных способов определения координат беспилотных летательных аппаратов, основанных на дальномерных измерениях и различной конфигурации наземной инфраструктуры. **Методы исследования.** Проведен аналитический разбор геометрических факторов, влияющих на точность координатного решения. Разработана программа натурального эксперимента с использованием эталонных координат GPS для калибровки и верификации полученных данных. Предложены численно обоснованные требования к размещению станций и параметрам измерений. **Новизна.** Впервые даны количественные оценки условий применения двух способов локального позиционирования в отсутствие глобальных навигационных спутниковых систем. **Результаты.** Установлено, что точность координат существенно зависит от взаимного расположения наземных станций и высоты полета беспилотного летательного аппарата. Построены расчетные зависимости погрешности координат от ключевых параметров конфигурации. Получены количественные критерии применимости каждого из способов при заданных условиях. **Практическая значимость.** Представленные результаты могут быть использованы при проектировании и подготовке натуральных испытаний систем навигации беспилотных летательных аппаратов для критических приложений.

**Ключевые слова:** локальное позиционирование, беспилотный летательный аппарат, дальномерный способ, угломерно-дальномерный способ, навигация при отсутствии сигналов спутниковых систем, натурные испытания, погрешность определения координат, программа эксперимента оценки точности позиционирования, эталонные координаты, геометрическая конфигурация наземных станций, синхронизация времени, радионавигационные измерения, сравнение способов позиционирования

### Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в задачах гражданского и промышленного назначения, включая аэрофотосъемку, мониторинг территорий, охрану объектов и доставку грузов. Основу навигационного обеспечения БПЛА, как правило, составляет спутниковая навигация, однако в условиях экранирования, радиопомех или преднамеренного подавления сигнала точность и устойчивость позиционирования существенно снижается.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Шалунов С. Б., Курочкин А. С., Измestьева Е. А. Сравнительный анализ двух способов локального позиционирования БПЛА и формирование требований к их экспериментальной проверке // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 4. С. 48–64. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-4-48-64

#### Reference for citation:

Shalunov S., Kurochkin A., Izmetseva E. Comparative Analysis of Two UAV Local Positioning Methods and Formulation of Requirements for Their Experimental Validation. *Telecom IT*. 2023. Vol. 11. Iss. 4. PP. 48–64 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-4-48-64

Среди известных решений наибольший интерес представляют способы, применяющие измерение дальности и/или угла между БПЛА и наземными приемными средствами, не требующие точной синхронизации часов или использования специализированных протоколов обмена. В настоящей работе рассмотрены два способа позиционирования: дальномерный способ с разнесенными наземными станциями и угломерно-дальномерный способ с использованием одной станции и парой направленных антенн. Особое внимание уделяется анализу факторов, влияющих на точность определения координат, включая влияние нестабильности частоты тактовых генераторов, условий распространения радиосигнала и взаимного расположения абонентов.

Целью настоящей работы является определение условий, влияющих на точность двух способов локального позиционирования БПЛА, основанных на использовании измерений дальности и направления, а также формулировка требований к проведению их экспериментальной проверки. Обоснование требований к проведению эксперимента сформировано по результатам обзора научной литературы и нормативных требований. Несмотря на известность каждого из указанных способов, в открытых источниках отсутствуют систематизированные сравнительные оценки их применимости в условиях реального радиоканала и ограниченной геометрии размещения станций. В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительного анализа применимости указанных способов с последующей экспериментальной проверкой в условиях, приближенных к предполагаемым условиям эксплуатации БПЛА.

### Анализ способов определения координат БПЛА

*Способ местоопределения БПЛА по измеряемым дальностям до базовых станций [1, 2].* На рисунке 1 показана конфигурация с двумя наземными станциями  $S_1$  и  $S_2$ , измеряющими дальность  $R_1$  и  $R_2$  до БПЛА (метка  $A$ ).

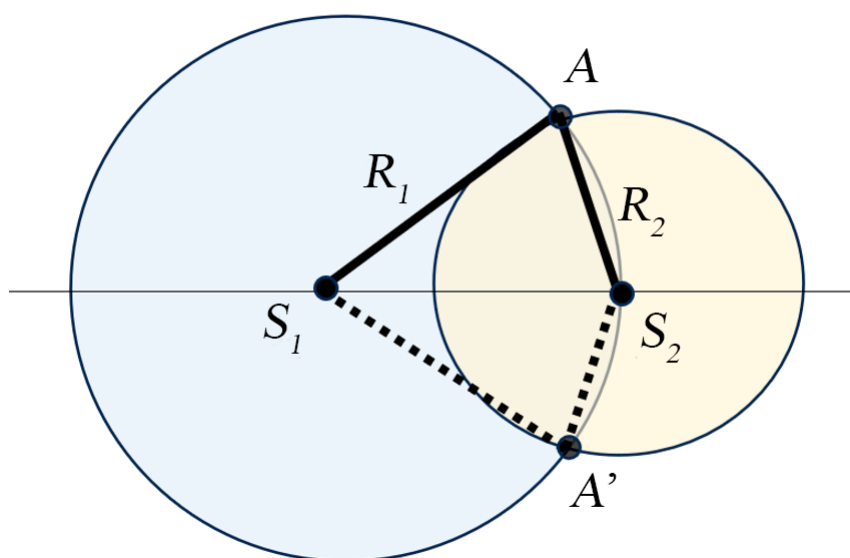


Рис. 1. Определение местоположения БПЛА с использованием дальностей до двух наземных станций

Геометрически возможны два симметричных решения относительно оси, соединяющей наземные станции. При такой конфигурации выбор правильного положения определяется условно – например, имеются визуальные ориентиры или полетное задание не предполагает пересекать линию, соединяющую наземные станции [3]. На первый взгляд, определение координат кажется простой геометрической задачей, как показано на рисунке 1. Однако в реальных системах позиционирования измерения дальностей всегда сопровождаются погрешностями, зависящими от технологии и условий среды [3, 4].

При выборе способа местоопределения важно учитывать несколько факторов: доступную вычислительную мощность, частоту и непрерывность обновления координат, наличие дополнительных датчиков (например, акселерометра или камеры), а также число наземных станций, участвующих в решении задачи определения координат БПЛА [5]. Чем выше частота обновления и точность, тем выше нагрузка на систему. Геометрический способ местоопределения эффективен при малочисленности наземных станций, но количество возможных пересечений окружностей растет квадратично при увеличении числа станций, что снижает эффективность при избыточности данных [6].

Способ местоопределения БПЛА по дальности и азимуту [7] характеризуется использованием азимута  $\beta$  на БПЛА и измеренной наклонной дальности  $D_n$  (рисунок 2) [8]. На основании измерений координаты БПЛА вычисляются в два этапа: сначала из наклонной дальности и высоты БПЛА  $H$ , полученной с бортового барометра по телеметрии, определяют горизонтальную проекцию дальности  $D_o$ . Затем в локальной прямоугольной системе координат положение БПЛА на горизонтальной плоскости вычисляется с помощью угла  $\beta$ . Таким образом, сочетание измерений азимута, высоты и наклонной дальности позволяет однозначно определить трехмерные координаты аппарата относительно наземной станции [8].

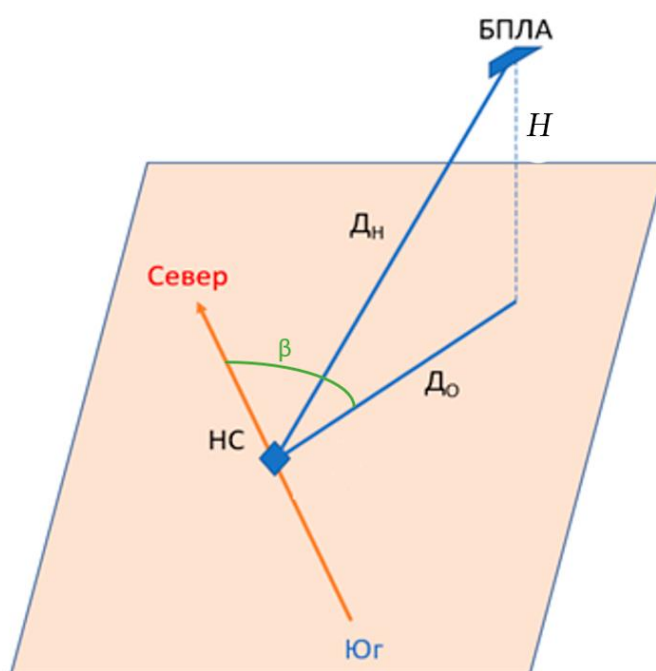


Рис. 2. Схематическое изображение способа определения местоположения БПЛА с использованием азимута и наклонной дальности

Рассмотрим особенности измерения азимута на БПЛА. Прием радиосигналов от беспилотного летательного аппарата осуществляется с использованием двух наземных антенн с идентичными диаграммами направленности, ориентированных под определенным углом относительно друг друга в горизонтальной плоскости [9]. В результате такого расположения приемных антенн на входах приемных трактов формируются два сигнала с различными уровнями мощности. После завершения приема производится расчет разности уровней сигналов, а полученный результат сопоставляется с предварительно установленной зависимостью разности уровней сигналов от азимута на БПЛА по формуле:

$$\alpha = f(\Pi_1 - \Pi_2),$$

где  $\alpha$  – азимут на БПЛА;  $\Pi_1$  – уровень сигнала на первой антенне;  $\Pi_2$  – уровень сигнала на второй антенне.

В данном способе применяются пары антенн на одной наземной станции, диаграммы направленности которых предварительно формируются с некоторым взаимным рассогласованием, пример которого показан на рисунке 3.

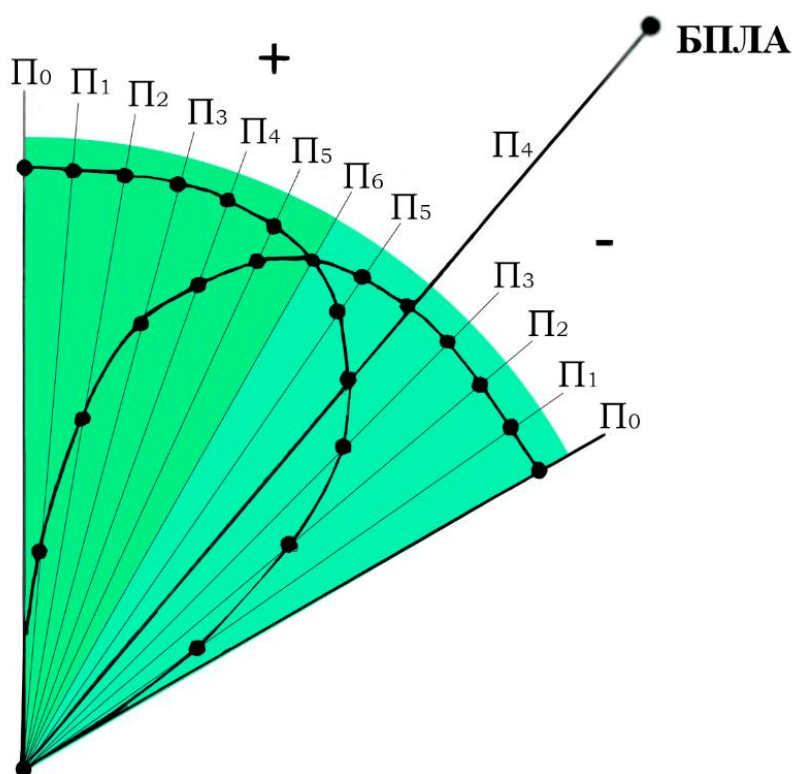


Рис. 3. Рассогласованные диаграммы направленности антенн в способе определения азимута на БПЛА [9]

*Способ определения дальности по задержкам приема радиосигнала, связанным со временем распространения радиоволн в пространстве [10] положен в основу известной системы позиционирования [11]. Схематическое изображение процесса обмена дальномерными сообщениями показано на рисунке 4. В момент времени  $T_1$  наземная станция посылает дальномерное сообщение БПЛА, в момент времени  $T_2$  БПЛА принимает его, записывая метку времени приема.*

Далее БПЛА формирует очередь отправки ответного дальномерного сообщения, которое будет содержать метки времени  $T_2$  и  $T_3$ , и после распространения через среду наземная станция принимает это сообщение в момент времени  $T_4$  [10].

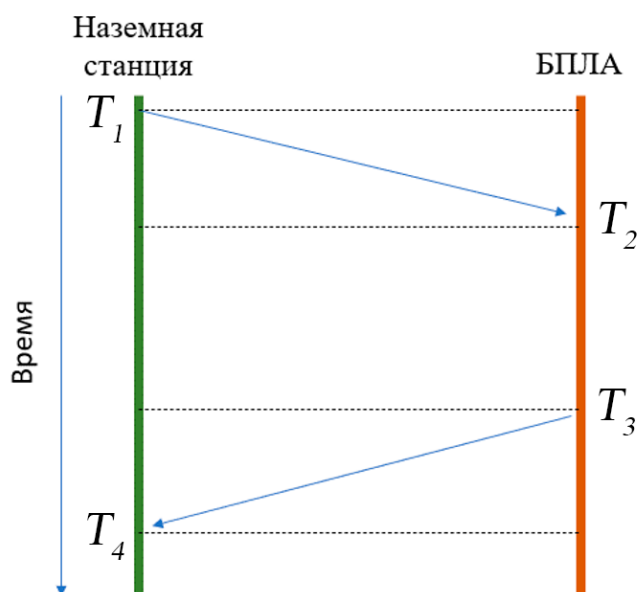


Рис. 4. Схематическое изображение процесса обмена дальномерными сообщениями

Тогда дистанция  $d$  между наземной станцией и БПЛА рассчитывается по формуле:

$$d = c \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2},$$

где  $c$  – скорость света; число «2» в знаменателе обусловлено учетом полного времени распространения сигнала от наземной станции к БПЛА и обратно.

В основе такого измерения дальности лежит разница между полным временем обмена сообщениями и временем, которое второй узел затратил на подготовку ответа, позволяя вычислить дальность, исходя из известной скорости света. Несмотря на то, что устраняется необходимость в одинаковых начальных показаниях часов абонентов, различия в скоростях хода этих часов не компенсируются [12, 13]. Частота тактовых генераторов всегда немного отличается от номинальной, что приводит к погрешности измерения дальности, величина которой пропорциональна разнице частот часов двух устройств и времени между принятием и отправкой сообщения БПЛА. Таким образом, точность рассматриваемого способа напрямую зависит от стабильности частоты используемых генераторов и выражается формулой:

$$\Delta d = c \delta (T_3 - T_2), \quad (1)$$

где  $\delta$  – отношение модуля разности частот к средней частоте двух генераторов:

$$\delta = \frac{|f_1 - f_2|}{\frac{f_1 + f_2}{2}},$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты тактовых генераторов.

Интервал задержки  $\Delta T$ , определяемый как разность времен приема и отправки сообщений, выражается формулой:

$$\Delta T = T_3 - T_2.$$

Для количественной иллюстрации влияния нестабильности частоты тактовых генераторов на точность дальномерного способа был построен график (рисунок 5) зависимости погрешности измерения дальности от относительного смещения частот и интервала между приемом и отправкой сообщений (см. формулу (1)). Полученные зависимости демонстрируют значительное увеличение абсолютной погрешности измерения дальности  $\Delta d$  при росте значения  $\delta$  и увеличении интервала задержки  $\Delta T$ , что указывает на чувствительность способа к данным параметрам и обосновывает ограничение продолжительности обмена служебными сообщениями.

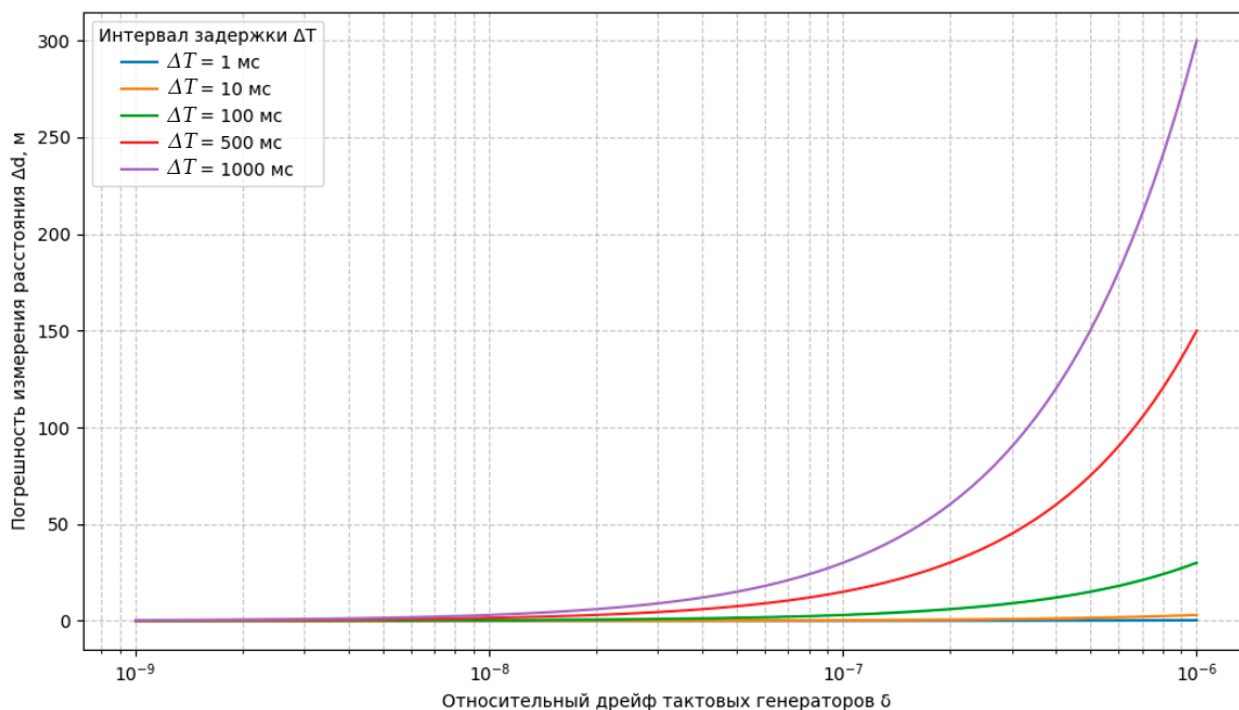


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения дальности от отношения модуля разности частот к средней частоте двух генераторов при различных интервалах задержек

Согласно расчетам по формуле (1) при  $\delta = 10^{-6}$  и  $\Delta T = 500$  мс погрешность  $\Delta d$  составляет порядка 150 м. Указанное значение соответствует правому краю графика для кривой с интервалом задержки 500 мс (рисунок 5).

## Сравнительный анализ двух способов определения координат

Целью сравнительного анализа является определение условий, влияющих на точность каждого из рассматриваемых способов позиционирования, и выявление факторов, которые определяют их применимость в различных сценариях эксплуатации. При этом исследование не направлено на выявление наилучшего способа, поскольку каждый из них обладает специфическими достоинствами и ограничениями. Дальномерный способ определения координат предполагает использование двух пространственно-разнесенных наземных станций и характеризуется одним основным источником погрешностей – ошибками измерения дальности. В свою очередь, способ, основанный на измерении наклонной дальности и азимута, реализуется с использованием одной наземной станции, что упрощает структурную организацию системы в целом, однако сопровождается накоплением погрешностей двух различных типов – в определении дальности и углового направления. В связи с этим указанные способы представляют собой взаимодополняющие решения, и их практическая эффективность подлежит экспериментальной верификации с учетом условий эксплуатации.

В качестве иллюстративного материала использованы представленные в работе [14] результаты моделирования, характеризующие зависимость точности определения координат от выбора способа и количества опорных станций. Эти данные были воспроизведены в виде графика для наглядного сопоставления и представлены на рисунке 6 [14].

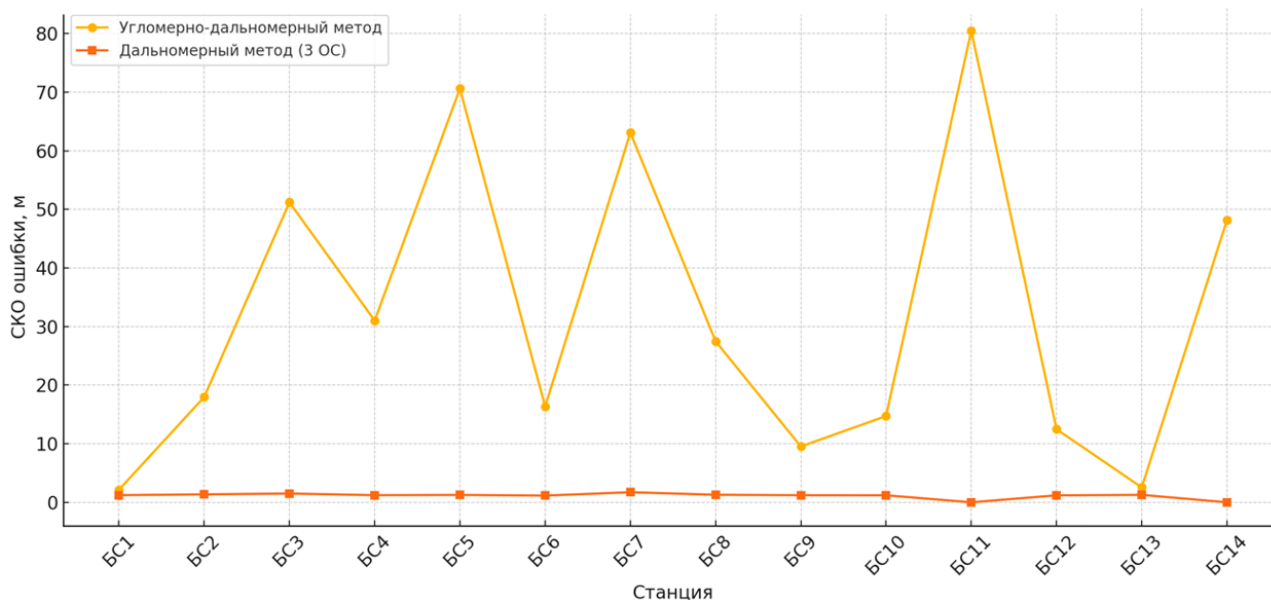


Рис. 6. Сравнение значений средноквадратического отклонения (СКО) погрешности определения координат для двух способов позиционирования [14] при условии использовании трех опорных станций для дальномерного метода

В работе [14] условные обозначения БС1–БС14 соответствуют техническим средствам позиционирования, координаты которых задавались в прямоугольной локальной системе координат для проведения численного моделирования. Всего моделировались 14 станций, размещенных в пределах 5 км от главной

опорной станции, координаты которой принимались равными (0; 0). Указанные станции использовались в качестве подвижных (бортовых) или стационарных (опорных) в зависимости от назначения. Для реализации дальномерного и разностно-дальномерного способов определенные станции из множества БС1–БС14 выбирались либо случайным образом, либо по критерию минимизации суммарного геометрического фактора системы с целью повышения точности определения координат.

Рост погрешности при использовании угломерно-дальномерного способа обусловлен увеличением вклада угловой составляющей ошибки по мере удаления беспилотного летательного аппарата от опорной станции. Это связано с тем, что при расчете координат используются значения дальности и азимута, и при больших дальностях даже незначительная ошибка в определении направления приводит к существенному отклонению результата. Проведенное моделирование подтверждает данную зависимость: для станций, расположенных на значительном удалении от опорной, среднеквадратическое отклонение (СКО) превышает 50–80 м, тогда как при применении дальномерного способа с использованием трех наземных станций оно меньше 2 м [14].

Следует отметить, что график зависимости погрешности определения координат от способа позиционирования построен на основе моделирования, в котором ошибка измерения угла принималась равной  $1^\circ$ , а количество наземных станций в дальномерном способе было равно трем. Ошибка измерения угла является усредненной и оценочной [14], не подтверждена техническими характеристиками или нормативной документацией, а потому может как завышать, так и занижать реальную точность. Кроме того, увеличение дальностей с учетом корректировки значений обеих ошибок (ошибок определения угла дальности), моделируемых в работе [14], может существенно повлиять на итоговое соотношение и изменить распределение погрешностей двух способов местоопределения. Указанные факторы обосновывают необходимость экспериментальной проверки полученных расчетных результатов.

Сравнительный анализ рассмотренных способов позиционирования БПЛА приведен в таблице 1, где представлены основные параметры, характеризующие каждый из способов, включая принцип действия, требования к оборудованию, а также типичные преимущества, недостатки и источники ошибок, определяющих точность получаемых координат.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики способов позиционирования

| Параметр сравнения       | Дальномерный способ  | Угломерно-дальномерный способ                     |
|--------------------------|--|---|
| Принцип действия         | Геометрическое определение по двум измеренным дальностям до наземных станций | Расчет координат по наклонной дальности и азимуту |
| Необходимое оборудование | Две наземные станции   | Одна наземная станция с двумя антеннами           |

| Параметр сравнения | Дальномерный способ   | Угломерно-дальномерный способ   |
|--------------------|---|---|
| Преимущества       | Простая реализация, независимость от точности углового измерения                        | Использование одной наземной станции  |
| Недостатки         | Неустраняемая двусмысленность при симметричной конфигурации, требуются два канала связи | Высокая чувствительность к ошибке измерения азимута, особенно на больших дальностях   |
| Тип ошибок         | Ошибки измерения двух дальностей, влияние геометрического фактора                       | Погрешность измерения дальности, погрешность определения координат, обусловленная ошибкой определения азимута, которая увеличивается с ростом дальности |

### Формирование требований к эксперименту

Целью экспериментального исследования является определение достижимой точности двух способов локального позиционирования БПЛА. В качестве оцениваемых конфигураций рассматриваются: дальномерная конфигурация с двумя разнесенными наземными станциями и угломерно-дальномерная конфигурация с одной станцией, оснащенной парой направленных антенн, разнесенных под определенным углом.

Выбор БПЛА самолетного типа для проведения эксперимента обусловлен рядом эксплуатационных и технических преимуществ, определяющих его применимость в задачах, связанных с оценкой погрешностей навигационных решений на протяженных маршрутах. В отличие от мультироторных аппаратов, самолетные БПЛА обладают существенно большей продолжительностью полета (до 10–20 часов при сопоставимой массе) и способны стабильно поддерживать прямолинейное движение с малым уровнем вибраций и наклонов корпуса [15]. Эти факторы обеспечивают более предсказуемое поведение БПЛА в пространстве, что имеет принципиальное значение для погрешности измерений, зависящих от точного соблюдения геометрии траектории и временной синхронизации обмена радиосообщениями. Таким образом, самолетный тип БПЛА позволяет реализовать более чистую экспериментальную модель при испытании локальной навигационной системы, снижая влияние аэродинамической неустойчивости, характерной для коптеров при боковом ветре, резких коррекциях курса и изменениях высоты.

Определим требования к окружающей среде для проведения эксперимента. Согласно данным, приведенным в работе [16], погодные условия, в первую очередь скорость ветра и наличие осадков, оказывают существенное влияние на возможность безопасной эксплуатации коммерческих БПЛА. На основе анализа архивных метеоданных за 10 лет по 100 крупнейшим городам мира установлено, что большинство БПЛА не способны выполнять полеты при скорости ветра свыше 10 м/с или при любых осадках, что значительно ограничивает их применение в ряде регионов [16]. Средняя продолжительность возможных полетов при допустимых погодных условиях составляет 5,7 ч в сутки (или 2 ч, если учитывать

только дневное время) [16]. Согласно результатам, изложенным в работе [17], успешное планирование миссий БПЛА возможно при стабильном направлении воздушных потоков, а также при отсутствии резких изменений погодных параметров и наличии прогноза с низкой степенью неопределенности (стабильное направление ветра с допустимыми колебаниями не более  $\pm 30^\circ$ , а также отсутствие резких изменений температуры и влажности в течение суток [16, 17]).

Выбор площадки для проведения эксперимента с использованием радиоканала передачи данных обусловлен требованиями к минимизации ошибок, связанных с интерференцией отраженных сигналов. Согласно результатам исследования [18], наилучшие условия для устойчивой радиосвязи достигаются при наличии прямой видимости между приемником и передатчиком, отсутствии близкорасположенных отражающих объектов (металлических конструкций, стен, мачт), а также при расположении антенн на открытой ровной местности. Неровности рельефа, плотная застройка и наличие вертикальных препятствий способствуют формированию отраженных и преломленных компонентов сигнала, что существенно увеличивает погрешность навигационных измерений. Таким образом, открытая площадка с равнинным рельефом и отсутствием источников радиопомех обеспечивает максимально благоприятные условия для проведения эксперимента.

В соответствии с нормативными требованиями Федерального управления авиацией по удаленной идентификации БПЛА погрешность определения координат должна составлять не более 30 м по горизонтали и 45 м по высоте с вероятностью сохранения таких параметров в режиме измерения, равной 95 % [19]. В связи с этим в рамках проводимого эксперимента в качестве критерия успешности выбрано значение СКО определения координат не более 30 м, что соответствует требованиям к погрешности, установленным нормативными документами Федерального управления авиации, и обеспечивает сопоставимость с международной практикой в области локальной навигации беспилотных воздушных судов. В связи с отсутствием в российском законодательстве количественно выраженных требований к погрешности позиционирования БПЛА, использование зарубежных нормативов, таких как [19], представляется оправданным ориентиром при выборе критериев оценки. Это позволяет обеспечить обоснованность поставленных задач эксперимента и сопоставимость полученных результатов с международным опытом.

Согласно исследованию [20], крейсерская скорость БПЛА самолетного типа варьируется в зависимости от класса и назначения платформы: для малых аппаратов она составляет 40–80 км/ч, для тактических аппаратов, применяемых в задачах мониторинга и картографии, – до 100–150 км/ч, а для высокоэффективных моделей с увеличенным размахом крыла – от 70 до 120 км/ч. При этом подчеркивается, что выбор скорости определяется характером выполняемой задачи: аппараты для наблюдения и съемки, как правило, имеют меньшую скорость для увеличения времени полета, в то время как в логистике востребованы более быстрые модели с высокой тяговой мощностью. Учитывая приведенный диапазон значений, для обоснования параметров планируемого эксперимента может быть принята средняя крейсерская скорость 80 км/ч как репрезентативная величина для гражданских

БПЛА самолетного типа, сочетающих умеренную грузоподъемность, среднюю продолжительность полета и универсальность применения.

В соответствии с данными, приведенными в работе [21], средняя эксплуатационная высота полета беспилотных воздушных судов данного класса составляет порядка 4100 м над уровнем моря, а типовой диапазон высот для выполнения целевых заданий может находиться в пределах 3000–4500 м.

Для обеспечения статистической достоверности оценки СКО необходимо, чтобы число измерений соответствовало требованиям к объему выборки при анализе отклонений. Согласно принятым в инженерной практике рекомендациям, при нормальном распределении ошибок с доверительной вероятностью 95 % минимальный объем выборки должен составлять не менее 1000 точек при расчете средней ошибки, и более 5000 точек при оценке ошибок по подгруппам (например, по фазам полета, по конфигурациям или условиям передачи данных) [22]. В рассматриваемом эксперименте предполагается оценка погрешностей в двух различных конфигурациях системы, а также в широком диапазоне дальностей и высот, что требует накопления статистически значимого числа измерений в каждой подгруппе. Исходя из этого, минимально допустимый объем данных для расчета СКО по каждой конфигурации принят равным 9000 измерений, что обеспечивает доверительный интервал ошибки не более  $\pm 10$  % от рассчитанного значения при нормальном распределении [22].

Для оценки погрешностей определения координат приведенных способов, происходит преобразование географических координат в линейные, что позволяет провести сопоставление в единой системе измерений. Это упрощенное приведение осуществляется с учетом приближенных значений длины одного градуса по широте и долготе. После пересчета рассчитываются отклонения между парами измерений в каждый момент времени. СКО определяется как корень из средней суммы квадратов этих отклонений и служит количественным показателем пространственного расхождения между положениями БПЛА, полученными по данным локальной системы навигации и приемника GPS. Такой подход дает возможность объективно оценить качество работы навигационного алгоритма, не прибегая к визуальным или качественным критериям [23].

В рамках подготовки к экспериментальной проверке угломерно-дальномерного способа определения координат предполагается использовать антенный комплекс, состоящий из двух направленных приемных антенн, оси которых расогласованы под фиксированным углом. Выбор диапазона значений угла расогласования происходит с опорой на данные, приведенные в статье [24], где показано, что использование значений в пределах от 5 до 20 ° обеспечивает приемлемый уровень погрешности в способах определения направления на источник сигнала по амплитудной разности. Указанный диапазон позволяет реализовать конфигурацию антенн с частичным перекрытием диаграмм направленности, что необходимо для устойчивого функционирования алгоритма амплитудного сравнения. В зависимости от размеров и характеристик используемых антенн конкретное значение угла расогласования в пределах указанного диапазона будет уточняться в процессе настройки аппаратуры перед натурными испытаниями. Основные параметры эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к условиям проведения эксперимента

| Параметр  | Значение                                   | Обоснование   |
|---|--|---|
| Тип БПЛА  | Самолетный                                 | Стабильность и продолжительность полета [15]  |
| Максимальная скорость ветра, м/с  | 10   | Безопасная для БПЛА скорость ветра [16, 17]   |
| Осадки  | Отсутствие                                 | Осадки исключают возможность стабильных параметров полета и радиообмена [16]  |
| Стабильность направления ветра, градусы                                 | Колебания не более $\pm 30$                | Для предсказуемости условий полета [16]   |
| Максимальная продолжительность полета при хорошей погоде, час в сутки   | 5,7  | Среднее значение в международной практике [16]  |
| Крейсерская скорость, км/ч  | 80   | Типовая скорость для гражданских БПЛА самолетного типа [20]   |
| Высота полета БПЛА, м   | 3000–4500                                  | Типовой диапазон высот БПЛА самолетного типа [21]   |
| Минимальный объем выборки, точки  | 9000                                       | Для доверительного интервала ошибки более $\pm 10\%$ [22]   |
| Критерий точности (СКО по горизонтали), м                               | не более 30                                | Соответствует требованиям [19]  |
| Выбор площадки  | Открытая местность без отражающих объектов | Минимизация ошибок из-за интерференции отраженных сигналов [18]   |
| Угол рассогласования антенн в угломерно-дальномерном способе, градусы   | 5–20                                       | Обеспечение частичного перекрытия диаграмм направленности [24]  |
| Диапазон дальностей между наземными станциями в дальномерном способе, м | 200–5000                                   | Особенности доступного полигона для проведения испытаний, оценка влияния данной величины на погрешность местоопределения [14] |

Представленные в таблице 2 количественные значения параметров экспериментального исследования (высота полета, крейсерская скорость, дальность между наземными станциями, угол рассогласования антенн и др.) не минимизируют метрологические характеристики (СКО). Указанные значения выбраны как усредненные, типовые для большинства БПЛА самолетного типа, применяемых в гражданском секторе. Такой подход обусловлен универсальностью локальной навигационной системы при ее применении в широком диапазоне эксплуатационных условий. Критериями выбора значений параметров являлись: соответствие технической реализуемости, воспроизводимости в условиях наземного полигона, а также соответствие справочным и нормативным данным, опубликованным в профильной научно-технической литературе.

## Программа эксперимента по определению СКО погрешности определения координат

Натурные испытания проводятся для количественного определения СКО погрешности местоопределения для двух способов локального позиционирования БПЛА:

- дальномерного (по двум наземным станциям);
- угломерно-дальномерного (по одной станции с парой направленных антенн).

Оба способа реализуются в программно-аппаратной форме. Эталонные координаты определяются приемником GPS в автономном режиме. Все измерения привязываются ко времени. Основное внимание уделяется определению СКО погрешности определения координат, полученного экспериментальными способами. Критерий оценки эффективности рассматриваемых способов: полученное значение СКО не должно превышать 30 м.

Обработка экспериментальных данных, включая преобразование координат, расчет векторных отклонений и среднеквадратичной погрешности, реализована с использованием языка программирования Python, что обусловлено преимуществами, изложенными в работе [25], где подчеркивается его высокая эффективность при выполнении статистических расчетов и анализа данных.

Цель программы состоит в проверке применимости каждого из двух способов позиционирования для точного определения координат БПЛА в условиях отсутствия спутниковой навигации.

Перечень используемых средств:

- БПЛА с возможностью ведения телеметрии;
- наземная аппаратура, реализующая два способа измерения;
- GNSS-приемник (режим GPS);
- барометрический датчик высоты;
- синхронизированная по времени система сбора координат;
- программное обеспечение на Python для обработки координат, пересчета форматов и расчета СКО погрешности определения координат.

Выполнение программы состоит из нескольких этапов:

*Этап 1.* Проведение полета по заданной траектории с одновременной регистрацией координат GPS и координат, полученных обоими рассмотренными способами.

*Этап 2.* Перевод координат из географического формата в декартову систему (метры) с учетом поправок на широту.

*Этап 3.* Сопоставление координат по временным меткам.

*Этап 4.* Расчет векторных отклонений между координатами каждого способа и эталонными GPS-координатами.

*Этап 5.* Вычисление СКО.

*Этап 6.* Сравнение результата с нормативным порогом значения СКО 30 м.

## Заключение

В статье рассмотрены два способа локального позиционирования БПЛА, отличающиеся конфигурацией наземной аппаратуры и используемыми принципами измерений. Проведенный сравнительный анализ выявил особенности каждого из способов и их ограничения, что позволило сформировать обоснованные требования к их экспериментальной проверке. На основе анализа научной литературы и нормативных документов обоснованно выбраны значения параметров проведения испытаний, включая условия среды, параметры полета и критерий точности.

Разработанная программа эксперимента позволяет определить СКО погрешности определения координат. Результаты анализа легли в основу программы натурного эксперимента, направленного на проверку применимости указанных способов в задачах позиционирования БПЛА при ограниченном доступе к спутниковой навигации.

## Литература

1. Сайбель А. Г. Разностно-дальномерный способ пеленгования источника радиоизлучения и реализующее его устройство. Патент на изобретение RU 2258242 С2, опубл. 10.08.2005.
2. Сайбель А. Г., Гришин П. С. Разностно-дальномерный способ определения координат источника радиоизлучения и реализующее его устройство. Патент на изобретение RU 2309420, опубл. 27.10.2007.
3. Логинов Ю. И., Екимов О. Б., Антипин Б. М., Гриценко А. А., Павлов В. Н. и др. Дальномерно-разностно-дальномерный способ определения координат местоположения источников радиоизлучения и реализующее его устройство. Патент на изобретение RU 2510038 С2, опубл. 20.03.2014. EDN: NIDBLC
4. Разиньков С. Н., Решетняк Е. А. Экспериментальная оценка точности местоопределения источников радиоизлучения диапазона высоких частот угломерным и угломерно-дальномерным методами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20. № 1. С. 19–25. EDN: YJYCUF
5. Лунев Е. М. Повышение точности определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотограмметрических измерений на этапе посадки // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 150–159.
6. Houankro H. G. K., Kozyrev D. Mathematical and Simulation Model for Reliability Analysis of a Heterogeneous Redundant Data Transmission System // Mathematics. 2021. Vol. 9. Iss. 22. P. 2884. DOI: 10.3390/math9222884
7. Панов В. П., Приходько В. В. Способ определения координат движущегося объекта. Патент на изобретение RU 2687056 С1, опубл. 07.05.2019.
8. Дыдаева Н. Н., Алешечкин А. М. Исследование алгоритмов определения координат объектов // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и

студентов, посвященной 118-й годовщине Дня радио (Красноярск, 6–7 мая 2013 г.) / научн. ред. Г. Я. Шайдуров. Красноярск, 2013. С. 147–150. EDN: TXEDYB

9. Титков И. В., Ермаков Д. О. Способ определения направления на источник радиоизлучения методом анализа области относительно оси симметрии двух рупорных антенн. Патент на изобретение RU2593835C2, опубл. 10.08.2016.

10. Gantner R., Schwiers S., Chauvin V. Method and System for Carrying out a Two Way Ranging Procedure. Patent US 20090253439 A1, 08.10.2009.

11. Ding Z. Time Measurement-Based Positioning Method, Related Device, and System. Patent US 10557930 B2, 11.02.2020.

12. Hartman J. Clock Drift Compensation in a Time Synchronous Channel Hopping Network. Patent US 9602270 B2, 21.03.2017.

13. Marton T. F., Lien T. G. Method and System for Clock Drift Compensation. Patent US 8515086 B2, 20.08.2013.

14. Алешечкин А. М., Дыдаева Н. Н., Кацура А. В., Мусонов В. М. Исследование методов определения относительных координат группы объектов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 3 (49). С. 114–118. EDN: RFWORJ

15. Garg P. K. Characterisation of Fixed-Wing Versus Multirotors UAVs / Drones // Journal of Geomatics. 2022. Vol. 16. Iss. 2. PP. 152–159. DOI: 10.58825/jog.2022.16.2.44. EDN: QQQDZE

16. Gao M., Hugenholtz Ch. H., Fox T. A., Kucharczyk M., Barchyn T. E. et al. Weather Constraints on Global Drone Flyability // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 12092. DOI: 10.1038/s41598-021-91325-w. EDN: RMEOKD

17. Thibbotuwawa A., Bocewicz G., Radzki G., Nielsen P., Banaszak Z. UAV Mission Planning Resistant to Weather Uncertainty // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 2. P. 515. DOI: 10.3390/s20020515. EDN: DJIDNF

18. Mekik C., Can O. Multipath Effects in RTK GPS and a Case Study // Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation. Series A. 2010. Vol. 42. Iss. 4. PP. 231–239. DOI: 10.6125/JoAAA.201012\_42(4).03

19. FAA. Remote Identification of Unmanned Aircraft. Title 14. Chapter I. Subchapter F. Part 89 // Code of Federal Regulations (CFR). URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-89> (Accessed 20.11.2023)

20. Sivakumar M., Naga Malleswari T. Y. J. A Literature Survey of Unmanned Aerial Vehicle Usage for Civil Applications // Journal of Aerospace Technology and Management. 2021. Vol. 13. P. e4021. DOI: 10.1590/jatm.v13.1233. EDN: TQKBRE

21. Ramesh P. S., Muruga Lal Jeyan J. V. Comparative Analysis of Fixed-Wing, Rotary-Wing and Hybrid Mini Unmanned Aircraft Systems (UAS) from the Applications Perspective // INCAS Bulletin. 2022. Vol. 14. Iss. 1. PP. 137–151. DOI: 10.13111/2066-8201.2022.14.1.12. EDN: OWMFAD

22. Александровская Л. Н., Розенталь О. М. Рекомендации по использованию ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 // Законодательная и прикладная метрология. 2008. № 6. С. 17–20. EDN: PBUYEP

23. Pearson K. Contributions to the Mathematical Theory of Evolution // Philosophical Transactions of the Royal Society. 1894. Vol. 185. PP. 71–110.

24. Yan E., Guo X., Yang J., Meng Z., Liu K. et al. Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-Based Direction-Finding System by Neural Network Optimization // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 169688–169700. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3024031. EDN: GOBNL

25. Logroño Naranjo S. I., Estrada Brito N. A., Vásquez Núñez V. A., Rosero Ordóñez E. M. Analysis of the Use of the Python Programming Language for Statistical Calculations // Espirales. Revista Multidisciplinaria de Investigación. 2022. Vol. 6. Iss. 41. DOI: 10.31876/er.v6i41.813. EDN: QKSVGZ

**Статья поступила 27 ноября 2023 г.  
Одобрена после рецензирования 11 декабря 2023 г.  
Принята к публикации 22 декабря 2023 г.**

### **Информация об авторах**

*Шалунов Сергей Борисович* – начальник направления разработки систем радиосвязи ООО «Специальный технологический центр».

Email: sshalunov@stc-spb.ru

*Курочкин Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ООО «Специальный технологический центр».

Email: akurochkin@stc-spb.ru

*Изместьева Екатерина Александровна* – инженер ООО «Специальный технологический центр». Email: eizmesteva@stc-spb.ru

## Comparative Analysis of Two UAV Local Positioning Methods and Formulation of Requirements for Their Experimental Validation

S. Shalunov ✉, A. Kurochkin, E. Izmesteva

Special Technology Center LLC,  
Saint Petersburg, 195220, Russian Federation

**Problem Statement.** The paper addresses the problem of local positioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) under conditions of limited accessibility to global navigation satellite system (GNSS) signals. The purpose of the study is to quantitatively assess the accuracy of two different UAV positioning methods based on range measurements and varying configurations of ground-based infrastructure. **Methods.** An analytical assessment of geometric factors affecting coordinate estimation accuracy is conducted. A field experiment program using reference GPS coordinates is developed for the calibration and validation of the obtained data. Numerically substantiated requirements are formulated for the placement of ground stations and measurement parameters. **Results.** It has been established that coordinate accuracy is strongly dependent on the relative positioning of ground stations and the flight altitude of the UAV. Functional dependencies between positioning error and key configuration parameters are derived. Quantitative criteria for the applicability of each method under specified conditions are obtained. **Novelty and Practical Significance.** For the first time, quantitative estimates of the applicability conditions for two local positioning methods in GNSS-denied environments are presented. The obtained results can be used in the design and preparation of field experiments for UAV navigation systems in safety-critical applications.

**Keywords:** local positioning, unmanned aerial vehicle, range-based method, angle-and-range method, navigation without satellite signals, field experiments, coordinate error, positioning accuracy assessment, reference coordinates, geometric configuration of ground stations, time synchronization, radionavigation measurements, positioning method comparison.

### Information about Authors

*Shalunov Sergei* – Head of Radio Communication Systems Development at Special Technology Center LLC. Email: sshalunov@stc-spb.ru

*Kurochkin Alexander* – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Research Associate at Special Technology Center LLC. Email: akurochkin@stc-spb.ru

*Izmestyeva Ekaterina* – Engineer at Special Technology Center LLC. Email: eizmesteva@stc-spb.ru