

УДК 004

## Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов

- Липанов Илья Дмитриевич**<sup>1</sup> — аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: спутниковые навигационные системы, автономная навигация и управление БПЛА, геодезия и высокоточные измерения, обработка сигналов и данных, информационные технологии и моделирование. E-mail: illipanov@mail.ru
- Хомоненко Анатолий Дмитриевич**<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru
- Молодкин Игорь Андреевич**<sup>1</sup> — магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: компьютерные сети, базы данных, искусственный интеллект. E-mail: molodkin@pgups.ru

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

**Для цитирования:** 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. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-27-36

**Аннотация.** С развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обеспечение точного позиционирования становится одной из ключевых задач, особенно при ограниченной или отсутствующей доступности спутниковых сигналов. **Цель:** осуществить сравнительный анализ методов позиционирования RTK (Real-Time Kinematic) кинематики реального времени и PPP (Precise Point Positioning) точного позиционирования для оценки их эффективности в различных условиях эксплуатации БПЛА. **Результаты:** исследование выявило, что RTK характеризуется высокой точностью в реальном времени при наличии базовой станции. Это делает его подходящим для задач, требующих оперативной аналитики, например в агломерациях. PPP, напротив, обеспечивает автономное позиционирование и подходит для удаленных областей, но требует времени на инициализацию для достижения высокой точности. Сравнение показало, что оба метода обладают уникальными преимуществами и ограничениями, определяющими их применимость в различных сценариях использования. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для оптимизации выбора и применения систем позиционирования в различных отраслях, таких как картография, логистика и мониторинг окружающей среды, повышая эффективность и надежность операций с использованием БПЛА. **Обсуждение:** рекомендована дальнейшая модернизация данных методов для повышения их эффективности и расширения областей применения, включая интеграцию с современными системами управления БПЛА.

**Ключевые слова:** маршрутизация БПЛА, ГНСС, DGPS, RTK, PPP, корректирующие сигналы, точное позиционирование

**2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

## Введение

В течение последнего десятилетия беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали основным инструментом во многих отраслях, включая сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, съемку и логистику. Одной из основных задач, с которыми сталкиваются разработчики и операторы беспилотников, является обеспечение точного позиционирования устройств, особенно в ситуациях, когда традиционные методы, такие как глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), могут оказаться ненадежными. Это особенно актуально, когда сигнал ГНСС является слабым или недоступным, например в городских районах, густых лесах или внутри зданий [1].

Для решения проблемы точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов было разработано множество подходов, среди которых особое внимание уделяется использованию ГНСС с корректирующими сигналами. Подход, основанный на дифференциальных технологиях, таких как RTK (Real-Time Kinematic) и PPP (Precise Point Positioning), может существенно повысить точность определения координат на открытой местности.

В статье рассматриваются сильные и слабые стороны каждого подхода, их применимость в различных условиях и потенциал их сочетания для повышения точности и надежности системы позиционирования. Сопоставляя эти методы, можно определить наилучшие подходы к использованию беспилотных летательных аппаратов в различных условиях эксплуатации и определить области для дальнейших исследований и разработки гибридных систем позиционирования.

## Система ГНСС с корректирующими сигналами

Метод глобальной навигационной спутниковой системы с корректирующими сигналами представляет собой высокоточный подход к определению координат, применяемый для точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов и широко используемый в задачах, где важна максимальная геопривязка [2]. Стандартное спутниковое позиционирование ГНСС обеспечивает точность в диапазоне от 1 до 10 метров, что может быть недостаточно для операций, требующих более детализированных данных, таких как агромониторинг, геодезия и логистика. Для решения этой задачи применяются корректирующие сигналы, которые значительно снижают погрешности позиционирования, обеспечивая точность на уровне сантиметров.

Глобальные навигационные спутниковые системы включают в себя множество спутниковых систем, каждая из которых состоит из нескольких десятков спутников. Эти системы обеспечивают пользователю глобальное покрытие и позволяют достигать уровня точности до сантиметров. Современная навигация включает в себя несколько глобальных навигационных спутниковых систем, среди которых Navstar GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЕС) и Beidou (КНР). Принцип работы спутниковых систем заключается в предоставлении пользователю информации о времени, переданной одновременно несколькими спутниками [3]. Принимая сигналы ГНСС, пользователи определяют свое местоположение (широту, долготу, высоту и время). Методы получения информации от спутниковых систем различаются в зависимости от технологии и коррекции. Стандартное ГНСС-позиционирование в режиме одного приемника предполагает наличие погрешностей в несколько метров.

## Теоретические основы использования ГНСС для точного позиционирования БПЛА

ГНСС-позиционирование во многом базируется на расчете псевдодальностей до спутников (рис. 1). Если мы знаем время, когда сигнал передан и когда получен, то псевдодальность до спутника можно рассчитать по формуле:

$$d = c(t_r - t_s),$$

где  $d$  — расстояние от спутника до приемника (БПЛА);

$c$  — скорость света;

$t_r$  — момент времени приема сигнала приемником;

$t_s$  — момент времени отправки сигнала спутником.

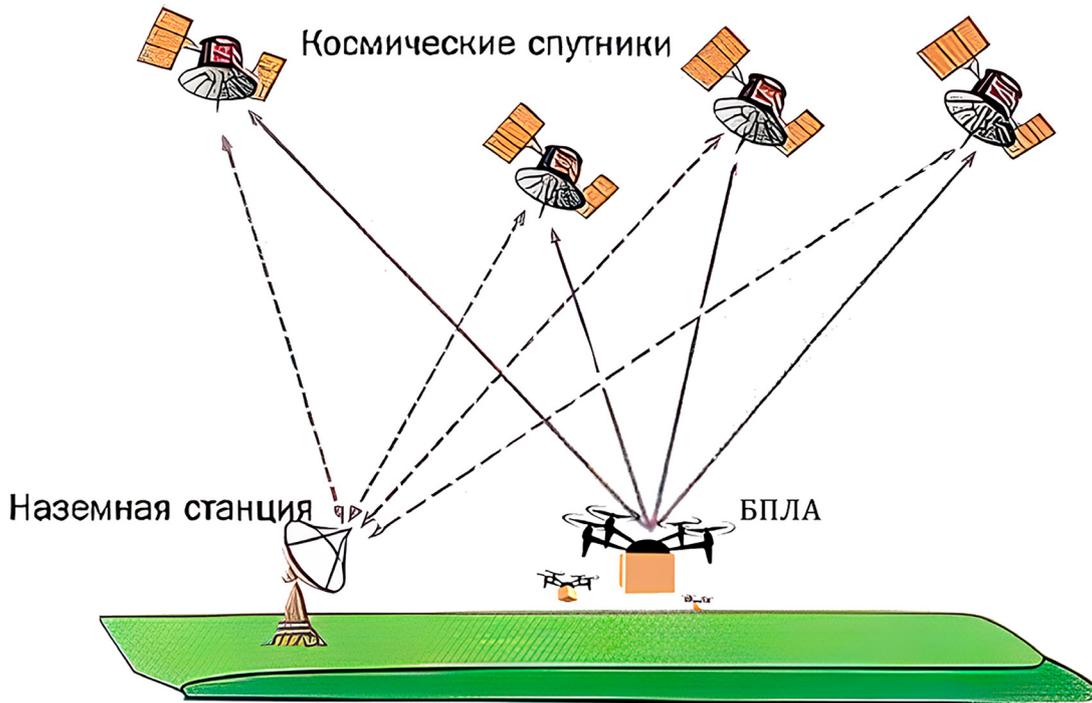


Рис. 1. Схема работы ГНСС

Но прямые измерения обычно подвержены различным задержкам, вызванным атмосферой и другими факторами, такими как ошибки времени отправления и приема. Это главный источник погрешностей в методах самостоятельного ГНСС-позиционирования [4]. Изучение природы погрешностей позволяет работать над их минимизацией дифференциальными методами.

**Применение дифференциальной глобальной системы позиционирования для повышения точности и коррекция погрешностей**

Дифференциальная глобальная система позиционирования (Differential Global Positioning System, DGPS) базируется на использовании дополнительных корректировок, вносимых для уменьшения ошибок позиционирования (рис. 2). В DGPS используются наземные станции с известными координатами, которые принимают сигналы от спутников, рассчитывают поправки, уменьшающие атмосферные и орбитальные погрешности. Эти поправки передаются на мобильные устройства, такие как БПЛА, и позволяют гораздо точнее

определять свое местоположение [5]. В условиях близости к базовой станции точность DGPS может достигать нескольких сантиметров, что делает его удобным для использования в открытой местности и областях с негустой застройкой.

В методе DGPS базовая станция, расположенная в известной точке  $(x_b, y_b, z_b)$ , принимает сигнал от спутника с измеренным расстоянием  $d_b$ . Это расстояние сравнивается с истинным расстоянием  $d_{true}$  между базовой станцией и спутником,

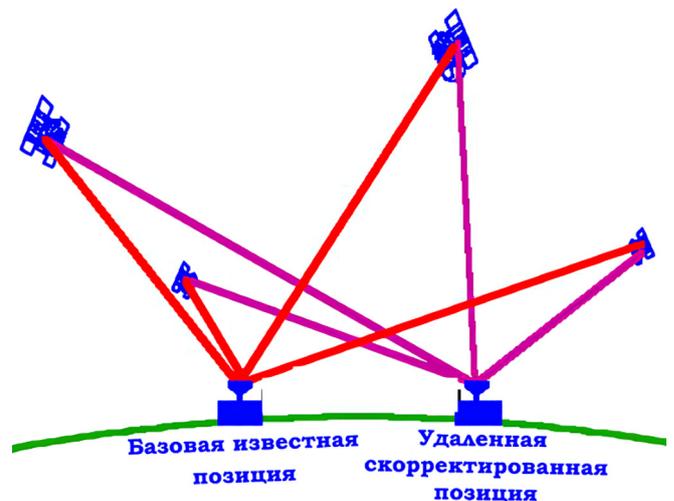


Рис. 2. Схема работы DGPS

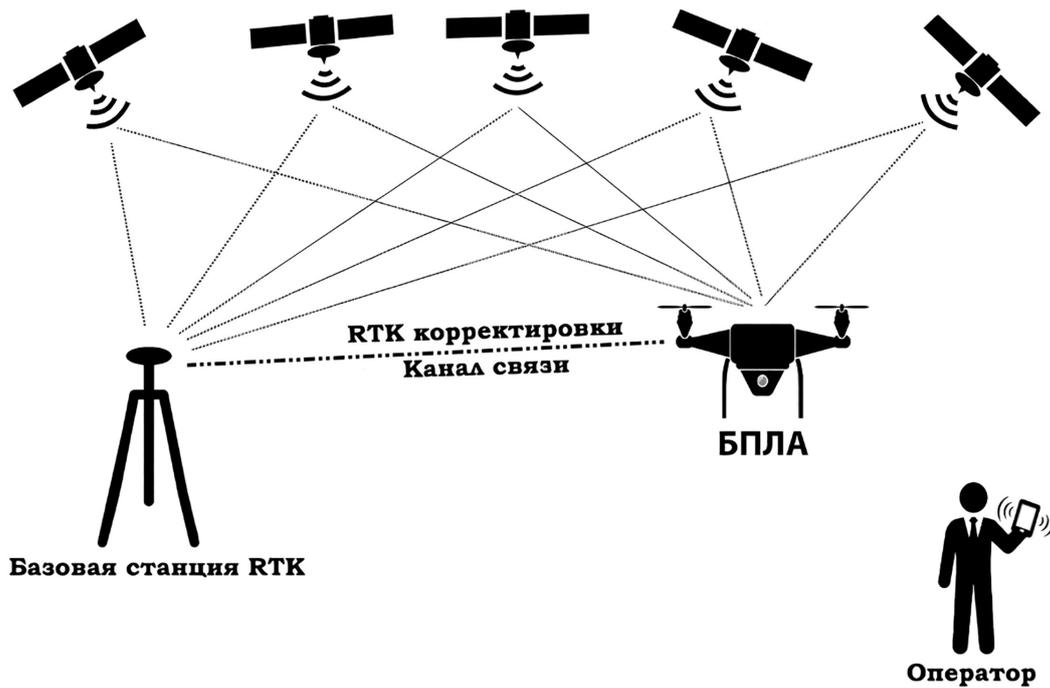


Рис. 3. Структурная схема работы системы RTK для высокоточного позиционирования БПЛА

что позволяет вычислить корректирующую поправку  $\Delta d$ :

$$\Delta d = d_{true} - d_b,$$

где  $\Delta d$  — ошибка определения расстояния (погрешность измерения);

$d_{true}$  — истинное расстояние от спутника до приемника;

$d_b$  — измеренное (наблюдаемое) расстояние, полученное приемником.

Компенсирующее значение поправки передается на подвижный приемник, что позволяет ему откорректировать свое положение относительно реальности в пределах основных погрешностей.

### Методы получения и обработки корректирующих сигналов

Система глобального позиционирования и времени доставки поправки с базовой станции ГНСС для получения корректирующих данных применяет два метода:

1. **RTK (Real-Time Kinematic)** — кинематика реального времени, в котором используется наземная станция и передача поправок в режиме реаль-

ного времени (рис. 3). Применяется в задачах, где критична высокая точность координат в пределах 2–20 см, позволяет решать задачи автоматического управления БПЛА. Ключевое условие — наличие базовой станции [6]. В силу физических ограничений распространения сигналов скорректировать подвижный приемник можно только вблизи базовой станции. Способ RTK определяет координаты с помощью следующего кинематического уравнения коррекции. Пусть подвижный приемник находится на расстоянии  $d_m$  от базовой станции, координаты коррекции  $(x_c, y_c, z_c)$  передаются для уточнения измеренного расстояния до спутника. Корректированное расстояние  $d_{corrected}$  в RTK определяется как

$$d_{corrected} = d_m + \Delta d,$$

где  $d_{corrected}$  — откорректированное расстояние (после применения корректировки);

$d_m$  — измеренное расстояние (полученное без корректировки);

$\Delta d$  — ошибка или погрешность измерения расстояния (вычисленная как разница между истинным и измеренным расстоянием).

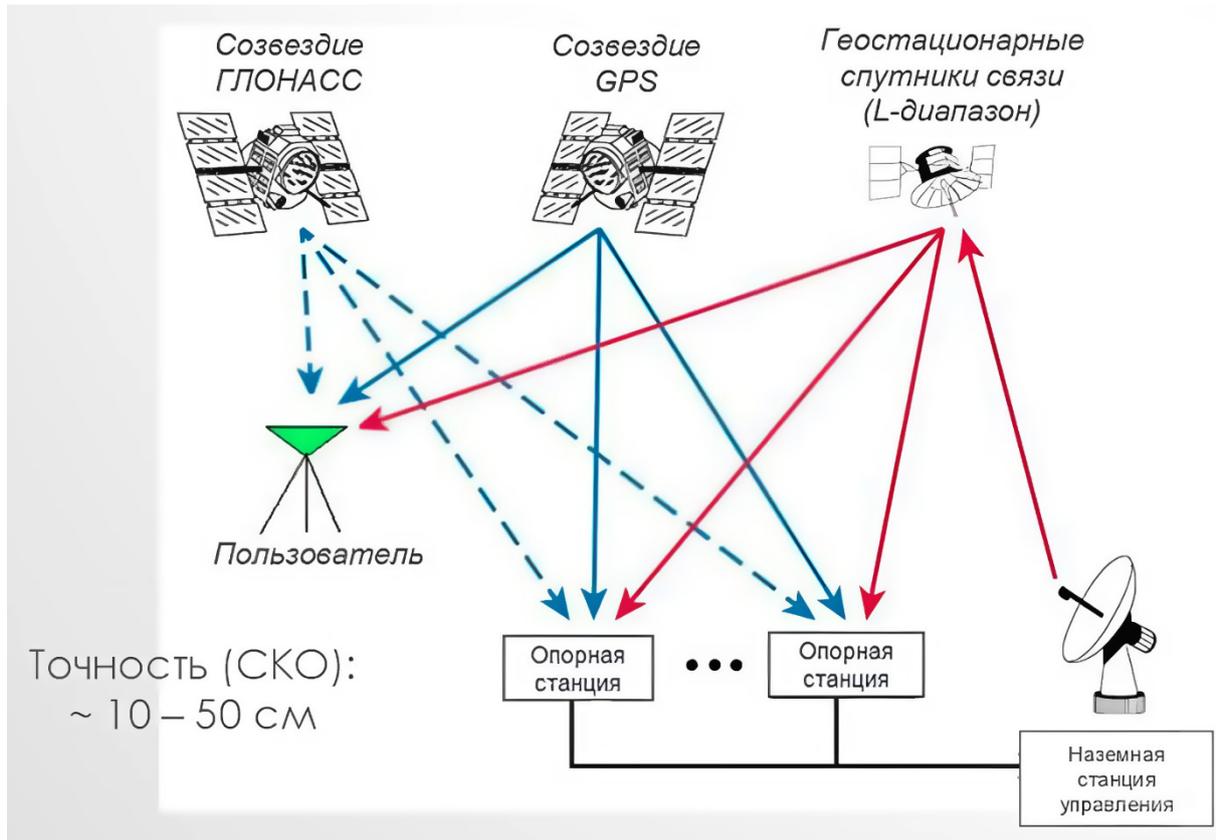


Рис. 4. Схема работы PPP

На рис. 3 показана схема работы системы RTK, используемой для повышения точности позиционирования БПЛА.

Базовая станция RTK, расположенная в фиксированном месте, получает сигналы от спутников ГНСС и вычисляет погрешности. Эти ошибки передаются через канал связи на приемник RTK, установленный на БПЛА, что позволяет скорректировать его позицию с высокой точностью в реальном времени [7]. Оператор управляет БПЛА с помощью мобильного устройства, получая актуальные данные о его местоположении. Этот метод обеспечивает точность позиционирования с погрешностью до нескольких миллиметров.

**2. PPP (Precise Point Positioning)** — метод точного позиционирования. В отличие от RTK не требует близости к базовой станции. PPP использует высокоточные данные о параметрах орбиты и часов спутников, предоставляемые различными сервисами, что позволяет получать точность до нескольких сантиметров (рис. 4). PPP может быть полезен в условиях, где установка наземной

инфраструктуры невозможна или затруднена [8]. Формула включает множество поправок, учитывающих ионосферные задержки  $I$  и тропосферные задержки  $T$  :

$$d_{ppp} = d + I + T + \Delta_{clk} + \Delta_{orb},$$

где  $d_{ppp}$  — скорректированное расстояние при использовании метода PPP;

$d$  — базовое (измеренное) расстояние между спутником и приемником;

$I$  — ошибка, вызванная ионосферными задержками;

$T$  — ошибка, вызванная тропосферными задержками;

$\Delta_{clk}$  — погрешность, связанная с ошибками синхронизации часов (как спутника, так и приемника);

$\Delta_{orb}$  — ошибка, связанная с неточностями орбитальных параметров спутников.

На рис. 4 показана схема работы PPP, при котором наземная станция передает поправки подвижному приемнику.

Приведенная схема иллюстрирует, как наземная станция непрерывно передает данные о поправках, что позволяет подвижному приемнику рассчитывать точные координаты.

### Преимущества и ограничения метода RTK

RTK использует дифференциальный подход, при котором данные с мобильного приемника, размещенного на БПЛА, корректируются с помощью информации от базовой станции, размещенной в известной точке [9]. Это позволяет значительно улучшить точность. Метод RTK обладает рядом преимуществ:

1. Обеспечивает точность в пределах нескольких сантиметров ( $< 2\text{--}3$  см), что делает его подходящим для задач, требующих высокой точности, таких как геодезия, картографирование и т.д.

2. Предоставляет точные данные о местоположении в режиме реального времени, что важно для задач, требующих немедленного реагирования, например для управления движением БПЛА или выполнения задач в динамичных условиях.

3. Демонстрирует хорошую производительность и высокую точность в условиях открытой местности, где есть прямая видимость спутников и отсутствует мультипуть.

4. Может применяться на больших дистанциях — до 30 км и более в условиях открытой местности (поля, равнины).

Однако, несмотря на свои преимущества, RTK имеет несколько ограничений, которые могут повлиять на его эффективность в разных операционных условиях:

1. Для управления БПЛА необходима базовая станция, т. е. на больших удалениях (целевая величина — сторона квадрата со стороной в 10–20 км) от нее система работать не будет. А это значит, что в удаленных точках и агрессивных средах наземную станцию разместить не получится.

2. Если осуществляется передача данных с базовой станции на мобильный приемник не физически по кабелю, а через канал связи, то у этого канала есть своя полоса и стабильность передачи. Например, дождливая погода нарушает стабильность канала.

3. Эффективность значительно уменьшается, если между базой и мобильным устройством возникают препятствия (например, холмы или здания).

Метод RTK позволяет весьма точно определить позиционирование БПЛА, если он находится в зоне видимости спутников и базовой станции [10]. Остальные случаи использования для точного позиционирования не так эффективны: на воде и в воздухе закрепить «внешнюю» станцию сложно, а в лесу и гористой местности могут возникать те или иные помехи видимости.

### Преимущества и ограничения метода PPP

PPP использует данные с первого приемника и корректирует данные спутниковых орбит и других систематических ошибок для определения координат с сантиметровой точностью. Метод получения высокоточных координат при помощи PPP не требует базовой станции [11]. Основные преимущества PPP:

1. Для управления БПЛА достаточно одного приемника, который использует оператор.

2. Системы точного позиционирования реализуют так называемый метод постобработки — это метод, при котором по мере поступления ГНСС-сигналов от приемника они бесшовно попадают на сервер провайдера, что позволяет работать с методом PPP практически везде: в удаленных или труднодоступных местах, на водных объектах, а также в любой другой части планеты.

3. При последующей обработке метод PPP исключает локальные искажения сигналов, такие как многолучевость. Если оператор находится на открытом пространстве, на небольшом удалении от стен, деревьев и других объектов, с помощью этого метода можно получить точные координаты на нескольких устройствах (от 1 до 3 штук) без необходимости вывода контрольно-корректирующих станций (ККС).

4. Более устойчив к атмосферным и радиоэлектронным помехам, что увеличивает его надежность в сложных условиях.

Несмотря на свою автономность и гибкость, метод PPP имеет несколько ограничений, которые важно учитывать при его использовании:

**Основные характеристики зависимостей методов позиционирования от качества спутниковых сигналов**

Характеристика	RTK	PPP
Зависимость от базовой станции	Требует базовой станции	Работает только с данными одного приемника
Точность в реальном времени	Высокая, в пределах миллиметров	Средняя, требует времени для постобработки
Автономность	Требует наличия базовой станции связи	Автономен, однако требует наличия связи со спутниками
Зависимость от спутниковых сигналов	Зависит от качества сигнала и расстояния до базы	Зависит от качества орбитальных данных и атмосферных условий
Работа на больших расстояниях	Ограничена (до 30 км)	Работает на любых расстояниях, если есть сигнал спутников
Производительность в открытой местности	Высокая, если есть хорошая связь с базой	Высокая, если доступны точные орбитальные данные и хорошие спутниковые сигналы

1. Основное ограничение PPP заключается в том, что метод требует времени для инициализации, особенно для получения точных орбитальных данных и оценок ошибки часов. Это означает, что от старта до получения высокоточных данных может пройти некоторое время, в отличие от RTK, который предлагает данные практически в реальном времени.

2. На коротких расстояниях точность PPP может уступать RTK. Для достижения максимальной точности PPP требует более сложной обработки и применения дополнительных фильтрующих алгоритмов и постобработки данных.

3. Для достижения точных орбитальных данных и данных о часах, используемых в PPP, требуется доступ к орбитальным станциям и данным о часах, который может быть затруднен в определенных ситуациях или при отсутствии надежной связи со спутниками.

Метод PPP выделяется своей автономностью и точностью, особенно в случаях автономного развертывания и в долгосрочных миссиях, но его ограничения, такие как инициализация и зависимость от точности орбитальных данных, делают его неподходящим для динамичных сценариев в реальном времени [12].

### Сравнительный анализ характеристик методов позиционирования

Для более наглядного сравнения в табл. 1 представлены основные характеристики зависимостей этих методов от качества спутниковых сигналов, включая их чувствительность к внешним помехам до влияния погодных условий и атмосферных ано-

малий, а также их производительность в различных операционных условиях.

Таким образом, в условиях открытой местности, где спутники доступны, оба метода позиционирования — RTK и PPP — могут обеспечивать высокую точность. Однако их подходы и ограничения делают их подходящими для разных сценариев использования [13]. RTK подходит для сценариев, где требуются точность в реальном времени и высокая производительность, но в то же время обеспечивается стабильная связь с базовой станцией. С другой стороны, PPP предлагает большую гибкость и автономность, что делает его привлекательным в местах, где установка локальной базовой станции невозможна или нежелательна. Однако PPP требует больше времени для достижения высокой точности, что делает его менее подходящим для задач, требующих мгновенной точности [14].

### Заключение

В статье проведен сравнительный анализ работы с данными точного позиционирования БПЛА посредством получения исправлений для ГНСС-навигации с использованием таких технологий, как PPP и RTK. Отметим, что обе технологии являются феноменальными инструментами, способными решать широкий массив различных аэрогеодезических, авиационных, инфраструктурных и иных задач [15].

Технология RTK отличается оперативностью передачи данных и может использоваться в достаточном количестве задач, связанных с актуализацией данных местности. В то же время технология PPP

является полным аналогом и равноценной заменой своему оппоненту, предлагая конечным пользователям несколько иной функционал — автономность полета без необходимости установки постоянной базы и возможность работы в автономных районах. Несмотря на это, обе технологии страдают от недостаточности качественных спутниковых данных и подвержены влиянию инфраструктурных, природных и технических ограничений.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных методов имеет свои уникальные особенности и области применения. Если техническое задание подразумевает высокоактивную навигацию в удаленных районах планеты, то метод PPP является

приоритетным решением. Если же требуется постоянное получение данных о быстроменяющейся обстановке, то метод RTK является фаворитом для выполнения задачи в условиях реализации работы в агломерациях [16].

Результаты работы подчеркивают необходимость дальнейшей модернизации методов работы ГНСС с корректирующими сигналами для повышения их стойкости к внешним возмущениям и обеспечения достоверной работы в широком спектре условий. Интеграция указанных технологий с современными системами управления БПЛА открывает перспективы для их использования в таких областях, как сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, картография и логистика.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments / Y. Chang, Y. Cheng, U. Manzoor, J. Murray // *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 170, Art. No. 104533. 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Al-Shaery A. M., Lim S., Rizos C. Investigation of Different Interpolation Models Used in Network-RTK for the Virtual Reference Station Technique // *Journal of Global Positioning Systems*. 2011. Vol. 10, No. 2. Pp. 136–148. DOI: 10.5081/jgps.10.2.136.
3. Angelino C. V., Baraniello V. R., Cicala L. UAV Position and Attitude Estimation Using IMU, GNSS and Camera // *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion (Singapore, 09–12 July 2012)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. Pp. 735–742.
4. Tightly Coupled Integration of Multi-GNSS PPP and MEMS Inertial Measurement Unit Data / Z. Gao, H. Zhang, M. Ge [et al.] // *GPS Solution*. 2017. Vol. 21, Iss. 2. Pp. 377–391. DOI: 10.1007/s10291-016-0527-z.
5. Odometer, Low-Cost Inertial Sensors, and Four-GNSS Data to Enhance PPP and Attitude Determination / Z. Gao, M. Ge, Y. Li [et al.] // *GPS Solutions*. 2018. Vol. 22, Iss. 3. Art. No. 57. 16 p. DOI: 10.1007/s10291-018-0725-y.
6. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2024. № 3 (39). С. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43.
7. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations / M. Ge, G. Gendt, M. Rothacher [et al.] // *Journal of Geodesy*. 2008. Vol. 82, Iss. 7. Pp. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.
8. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning / J. Geng, F. N. Teferle, X. Meng, A. H. Dodson // *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 47, Iss. 10. Pp. 1664–1673. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.030.
9. Speeding Up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data / J. Geng, J. Guo, X. Meng, K. Gao // *Journal of Geodesy*. 2020. Vol. 94, Iss. 1. Art. No. 6. 15 p. DOI: 10.1007/s00190-019-01330-1.
10. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University / J. Hu, X. Zhang, P. Li [et al.] // *GPS Solutions*. 2020. Vol. 24, Iss. 1. Art. No. 15. 13 p. DOI: 10.1007/s10291-019-0929-9.
11. Laurichesse D., Mercier F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP // *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007) (Fort Worth, TX, USA, 25–28 September 2007)*. Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2007. Pp. 839–848.
12. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo / Xing Li, Xin Li, Y. Yuan [et al.] // *Journal of Geodesy*. 2018. Vol. 92, Iss. 6. Pp. 579–608. DOI: 10.1007/s00190-017-1081-3.
13. GLONASS Phase Bias Estimation and Its PPP Ambiguity Resolution Using Homogeneous Receivers / Y. Liu, W. Song, Y. Lou [et al.] // *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21, Iss. 2. Pp. 427–437. DOI: 10.1007/s10291-016-0529-x.

14. Martell H., Roesler G. Tightly Coupled Processing of Precise Point Positioning (PPP) and INS Data // Proceedings of the 22th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009) (Savannah, GA, USA, 22–25 September 2009). Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2009. Pp. 1898–1905.

15. Towards Sub-meter Positioning Using Android Raw GNSS Measurements / D. Psychas, J. Bruno, L. Massarweh, F. Darugna // Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019) (Miami, FL, USA, 16–20 September 2019). Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2019. Pp. 3917–3931. DOI: 10.33012/2019.17077.

16. Zhang B., Chen Y., Yuan Y. PPP-RTK Based on Undifferenced and Uncombined Observations: Theoretical and Practical Aspects // Journal of Geodesy. 2018. Vol. 93, Iss. 7. Pp. 1011–1024. DOI: 10.1007/s00190-018-1220-5.

Дата поступления: 12.02.2025

Решение о публикации: 19.02.2025

## Comparative Analysis of Precise Positioning Methods for Unmanned Aerial Vehicles

**Ilya D. Lipanov<sup>1</sup>** — Postgraduate Student, Information and Computing Systems Department. Research interests: satellite navigation systems, autonomous navigation and UAV control, geodesy and high-precision measurements, signal and data processing, information technology and modeling. E-mail: illipanov@mail.ru

**Anatoly D. Khomonenko<sup>1,2</sup>** — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Mathematical and Software Engineering Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modeling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

**Igor A. Molodkin<sup>1</sup>** — Master's Degree, Senior Lecturer at the Information and Computing Systems Department. Research interests: computer networks, databases, artificial intelligence. E-mail: molodkin@pgups.ru

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

**For citation:** Lipanov I. D., Khomonenko A. D., Molodkin I. A. Comparative Analysis of Precise Positioning Methods for Unmanned Aerial Vehicles. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 27–36. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-27-36. (In Russian)

**Abstract.** *With the advancement of unmanned aerial vehicles (UAVs), ensuring an object's precise positioning has become one of the key challenges especially in environments with limited or no satellite signals. **Purpose:** to conduct a comparative analysis of Real-Time Kinematic (RTK) and Precise Point Positioning (PPP) methods to evaluate their effectiveness under various UAV operational conditions. **Results:** the study revealed that RTK provides high real-time accuracy when a base station is available making it suitable for tasks requiring rapid analytics, such as in urban agglomerations. In contrast, PPP enables autonomous positioning and is better suited for remote areas, though it requires an initialization period to achieve high accuracy. The comparison showed that both methods have unique advantages and limitations that define their applicability in different usage scenarios. **Practical significance:** the study's findings can be used to optimize the selection and implementation of positioning systems in various industries, such as cartography, logistics, and environmental monitoring enhancing the efficiency and reliability of UAV operations. **Discussion:** further refinement of these methods is recommended to improve their effectiveness and expand their applications including integration with modern UAV control systems.*

**Keywords:** UAV routing, GNSS, DGPS, RTK, PPP, correction signals, precise positioning

## REFERENCES

1. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments, *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, Vol. 170, Art. No. 104533, 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Al-Shaery A. M., Lim S., Rizos C. Investigation of Different Interpolation Models Used in Network-RTK for the Virtual Reference Station Technique, *Journal of Global Positioning Systems*, 2011, Vol. 10, No. 2, Pp. 136–148. DOI: 10.5081/jgps.10.2.136.
3. Angelino C. V., Baraniello V. R., Cicala L. UAV Position and Attitude Estimation Using IMU, GNSS and Camera, *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, July 09–12, 2012*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, Pp. 735–742.
4. Gao Z., Zhang H., Ge M., et al. Tightly Coupled Integration of Multi-GNSS PPP and MEMS Inertial Measurement Unit Data, *GPS Solution*, 2017, Vol. 21, Iss. 2, Pp. 377–391. DOI: 10.1007/s10291-016-0527-z.
5. Gao Z., Ge M., Li Y., et al. Odometer, Low-Cost Inertial Sensors, and Four-GNSS Data to Enhance PPP and Attitude Determination, *GPS Solutions*, 2018, Vol. 22, Iss. 3, Art. No. 57, 16 p. DOI: 10.1007/s10291-018-0725-y.
6. Lipanov I. D., Khomonenko A. D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam [Technologies and Methods for Planning the Movement of UAVs Along Waypoints], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2024, No. 3 (39), Pp. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43. (In Russian)
7. Ge M., Gendt G., Rothacher M., et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations, *Journal of Geodesy*, 2008, Vol. 82, Iss. 7, Pp. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.
8. Geng J., Teferle F. N., Meng X., Dodson A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, Iss. 10, Pp. 1664–1673. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.030.
9. Geng J., Guo J., Meng X., Gao K. Speeding Up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data, *Journal of Geodesy*, 2020, Vol. 94, Iss. 1, Art. No. 6, 15 p. DOI: 10.1007/s00190-019-01330-1.
10. Hu J., Zhang X., Li P., et al. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University, *GPS Solutions*, 2020, Vol. 24, Iss. 1, Art. No. 15, 13 p. DOI: 10.1007/s10291-019-0929-9.
11. Laurichesse D., Mercier F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP, *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, USA, September 25–28, 2007*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2007, Pp. 839–848.
12. Li Xing., Li Xin, Yuan Y., et al. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo, *Journal of Geodesy*, 2018, Vol. 92, Iss. 6, Pp. 579–608. DOI: 10.1007/s00190-017-1081-3.
13. Liu Y., Song W., Lou Y., et al. GLONASS Phase Bias Estimation and Its PPP Ambiguity Resolution Using Homogeneous Receivers, *GPS Solutions*, 2017, Vol. 21, Iss. 2, Pp. 427–437. DOI: 10.1007/s10291-016-0529-x.
14. Martell H., Roesler G. Tightly Coupled Processing of Precise Point Positioning (PPP) and INS Data, *Proceedings of the 22th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, USA, September 22–25, 2009*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2009, Pp. 1898–1905.
15. Psychas D., Bruno J., Massarweh L., Darugna F. Towards Sub-meter Positioning Using Android Raw GNSS Measurements, *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, FL, USA, September 16–20, 2019*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2019, Pp. 3917–3931. DOI: 10.33012/2019.17077.
16. Zhang B., Chen Y., Yuan Y. PPP-RTK Based on Undifferenced and Uncombined Observations: Theoretical and Practical Aspects, *Journal of Geodesy*, 2018, Vol. 93, Iss. 7, Pp. 1011–1024. DOI: 10.1007/s00190-018-1220-5.

Received: 12.02.2025

Accepted: 19.02.2025