



## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ГНСС И ИХ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РФ

П. А. Будников, В. В. Алпатов, А. Е. Васильев

В данной статье приводится обзор современного состояния систем высокоточной навигации, основанных на ГНСС. Кратко описаны основные методы получения высокоточных координатных решений и их характеристики. Оцениваются перспективы развития методов высокоточной навигации. Представлены сравнения точности для режима реального времени и постобработки, время сходимости данных решений. Так же в статье даны оценки необходимой инфраструктуры для создания системы высокоточной навигации на территории РФ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГНСС, высокоточное позиционирование, RTK ВИРТУАЛЬНЫЕ БАЗОВЫЕ СТАНЦИИ, PPP.

### 1 МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

За время своего существования глобальные навигационные спутниковые системы прошли большой путь от точности в сотни метров до единиц сантиметров. Пока решение точнее нескольких метров невозможно получить только по данным, передаваемым с навигационных спутников, однако существуют ряд методов, позволяющих с помощью дополнительных данных значительно улучшить характеристики работы навигационной системы, такие, как точность, надежность и доступность, через интеграцию внешних данных в процессе расчета координат. В общем виде эти методы приводят к созданию систем дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем (СДК ГНСС). Методы и системы высокоточной коррекции ГНСС делятся на несколько основных: спутниковая система дифференциальной коррекции СДКМ или SBAS (Satellite Based Augmentation System), метод кинематики реального времени RTK (Real Time Kinematic), метод позиционирования высокой точности — PPP (Precise Point Position), дифференциальная система ГНСС—ДГНСС. Метод кинематики в реальном времени может работать по схеме с виртуальными и с реальными базовыми станциями. Схема деления высокоточных методов ГНСС представлена на рисунке 1.

В методе RTK для получения поправок используются измерения фаз несущей ГНСС-сигналов одновременно на двух ГНСС-приёмниках. Координаты одного из приёмников (базового) должны быть точно определены; он передает по каналу связи набор данных, называемых поправками. Поправки могут быть получены не только с реальной, но и с виртуальной базовой станции (RTK VFR) [1], как интерполяция поправок сети станций. Полученный станцией спутниковый сигнал обрабатывается программным обеспечением (ПО) в соответствии с программными алгоритмами и накопленной статистикой спутниковых эфемерид, после чего на базовую станцию передается дифференциальная поправка, уточняющая спутниковый сигнал.

Второй приёмник («ровер») может воспользоваться этими данными для точного определения местоположения. При использовании одночастотных приемников дальность действия RTK не превышает 8–9 км. Двухчастотные приемники позволяют получать высокоточные решения на удалении до 80 км и более от базовой станции, однако при этом точность решения уменьшается на 1 см на каждые 10 км длины базовой линии. Время получения первого высокоточного решения составляет

10–30 секунд, но на длинных базах может достигать нескольких минут [2]. Рабочей дальностью RTK для двухчастотного оборудования считается 20–30 км.

СДКМ или SBAS — система распространения поправок к данным, передаваемым спутниками ГНСС. Сеть наземных станций измеряет сигналы ГНСС и передаёт центральным серверам. В качестве поправок используют дифференциальные поправки к псевдодальностям. Центральные серверы вычисляют поправки и передают спутникам, как правило геостационарным. Спутники ретранслируют поправки обратно на Землю. ГНСС-приёмники, поддерживающие SBAS, получают поправки и корректируют координаты, полученные от ГНСС. Системы SBAS как правило региональные, их площадь покрытия зависит от наличия корректирующих станций и покрытия спутникового канала связи.

На рисунке 2 представлены регионы покрытия различных систем распространения поправок к данным, передаваемым спутниками ГНСС на 2016г. В РФ эта система СДКМ, В Европе EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) — европейская геостационарная служба навигационного покрытия), в США WAAS (англ. wide area augmentation system) — система распространения поправок к данным, передаваемым навигационной системой GPS. В Южной Америке — SACCSA (исп. Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica) и др.

Аналогично системам SBAS действуют системы ДГНСС, однако при этом поправки с корректирующих станций передаются через наземные каналы связи.

В настоящее время активно развиваются методы PPP получения высокоточных координат (в плане и по высоте) сантиметровой точности с помощью ГНСС посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам всех видимых навигационных космических аппаратов (НКА) от сетевого источника поправок. Высокая точность данного метода достигается за счет разрешения фазовой неоднозначности итерационными алгоритмами. Для получения высокоточных координат методом PPP не требуется близкорасположенных базовых станций. При этом точность не зависит от дальности и точности координат отдельных базовых станций. Источником поправок и орбит - эфемеридо-временной информации (ЭВИ) может служить сеть станций, расположенных на расстоянии 1000-2000км друг от друга. Данные об ионосфере и тропосфере позволяют уменьшить время сходимости решения до 7 минут с точностью 20 сантиметров и до 13 минут с точностью несколько сантиметров [3]. При этом точность решения остается постоянной на всей области поправок. В постобработке точность методов PPP составляет 1–2см в плане для всей территории РФ [4].



Рис. 1. Схема методов и систем высокоточного позиционирования.

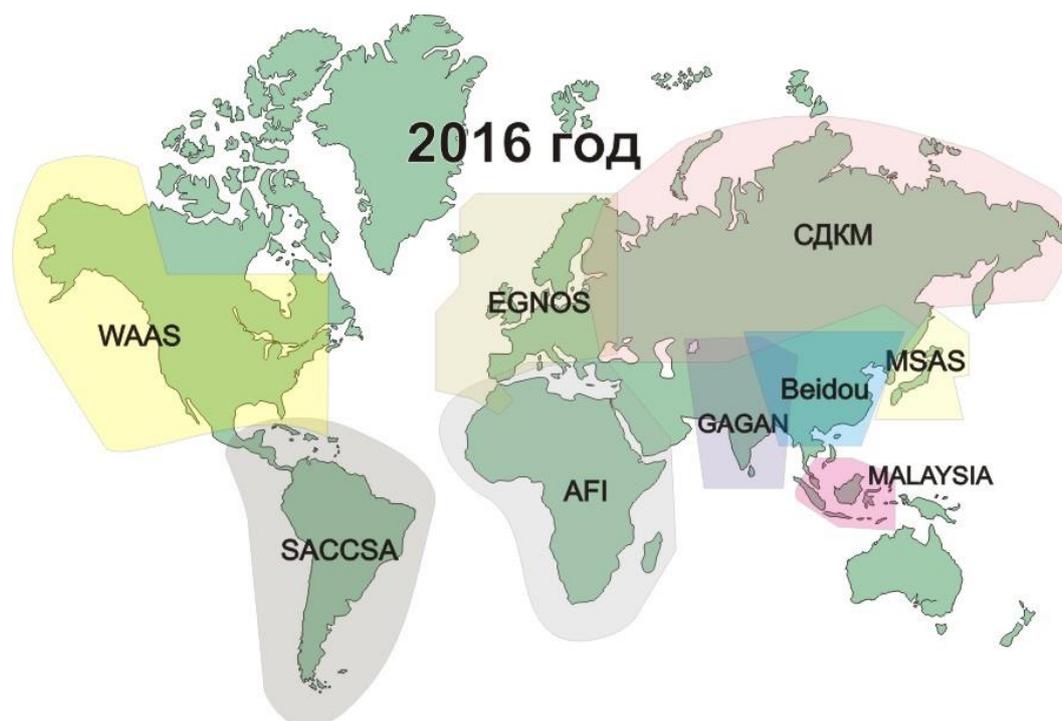


Рис. 2. Зоны действия региональных систем SBAS.

На основе метода PPP в мире уже создано множество научных и коммерческих сервисов, таких как MADOCA, Magic GNSS, CNES PPP-Wizard Project, VERIPOS Apex, NavCom Star Fire, Trimble RTX, реализованные зарубежными компаниями FUGRO, NavCom, Trimble, TerraStar, Leica, NovAtel, и космическими агентствами JAXA (Япония). Ведутся работы по увеличению точности и дальнейшему уменьшению времени сходимости к высокоточному решению, созданию автономных высокоточных приемников ГНСС. В стратегии развития ГЛОНАСС запланирована передача высокоточных эфемерид на территории РФ с геостационарных спутников. Низкоорбитальные навигационные спутники, запуск которых запланирован Китайским космическим агентством, позволит получать при помощи методов PPP сантиметровую точность уже через минуту после включения приемника. [5].

## 2 ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДОВ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Точность навигационного решения на основе нескорректированных измерений псевдодалности сейчас достигает нескольких метров и зависит от таких факторов, как точность ЭВИ, геометрический фактор точности, шумовые ошибки приемника. Такая точность достаточна в большинстве случаев, но для специализированных задач, прежде всего геодезии и картографии, требуется точность в десятки и сотни раз лучше. Сантиметровая точность позволяет использовать ГНСС приемники вместо классических приборов, таких как теодолиты и различного рода механические измерительные приборы, при проведении строительных и других ответственных работ.

Для сравнения проанализированы различные методы высокоточного позиционирования, основанные на ГНСС. Методы ДГНСС (DGNSS) и SBAS основаны на коррекции псевдодалностей и их точность составляет 30–70 см [6]. При этом для SBAS передача поправок происходит для всего региона и точность не уменьшается с расстоянием. Для ДГНСС происходит деградация точности с удалением от станции, для которой рассчитываются поправки. Характерное расстояние, после которого ДГНСС перестает функционировать — около 1000 км [7].

Методы PPP, RTK и RTK с виртуальными базовыми станциями основаны на фазовых измерениях. Решение неоднозначности фазовых измерений в первом случае основано на итерационном решении по высокоточной ЭВИ.

Для RTK абсолютные значения фаз рассчитываются исходя из данных об абсолютных значениях фаз для близкорасположенных базовых станций. Поскольку алгоритмы PPP не используют локальных данных, и имеют глобальный характер, то их точность остается постоянной для любой точки, из которой имеется доступ к высокоточной ЭВИ.

На рисунке 3 представлены точностные характеристики различных методов и систем высокоточного позиционирования.

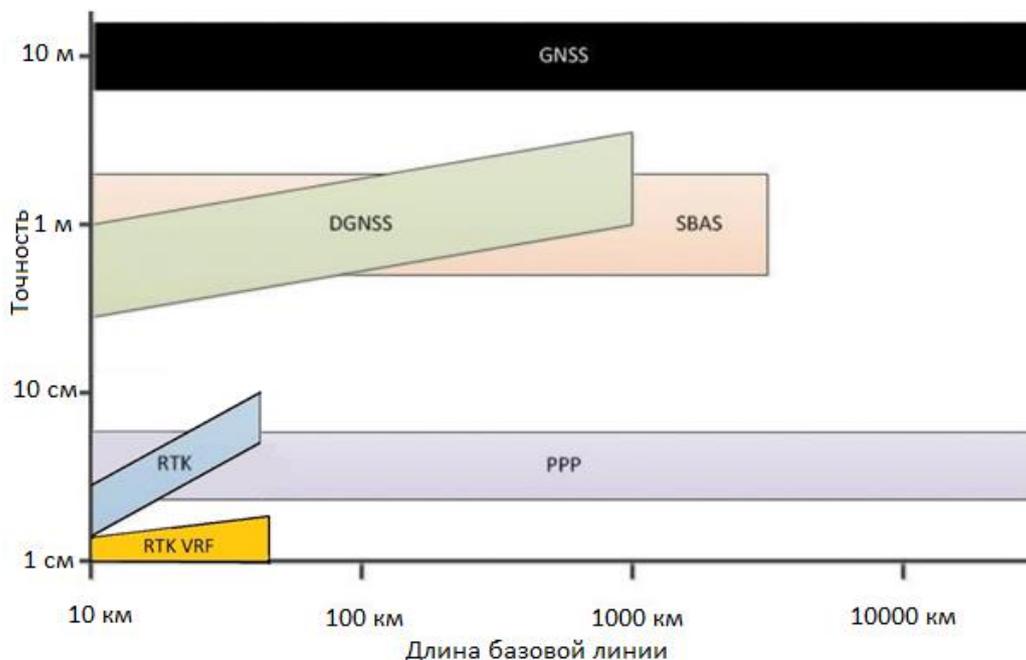


Рис. 3. Погрешности различных методов высокоточного позиционирования.

### 3 ВРЕМЯ СХОДИМОСТИ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Сходимость итерационных алгоритмов PPP зависит, прежде всего от качества ЭВИ, качества передаваемого сигнала и характеристик приемника, числа принимаемых навигационных систем. При использовании данных о локальных параметрах тропосферы и ионосферы время сходимости так же уменьшается. Использование мультисистемных 3-х частотных приемников позволяет уменьшить время сходимости до 7 минут к точности 20 см и 13 минут до точности в несколько сантиметров. [8, 9]. Время сходимости здесь не зависит от расположения спутников и приемника. Современные алгоритмы PPP позволяют нивелировать (до нескольких минут) разрывы связи и приема навигационных сигналов – например прохождения тоннелей. Время горячего старта после разрывов составляет 10–15 с [3].

Для RTK время сходимости определяется главным образом удаленностью от базовой станции. При расстоянии базовой линии в несколько километров время до первого фиксированного решения составляет несколько секунд, при 20-30 км, это время уже составляет несколько десятков секунд. При длине базовой линии 70-100 км время до первого фиксированного решения возрастает до нескольких минут [2]. Для методов RTK с виртуальными базовыми станциями время сходимости составляет так же нескольких десятков секунд на расстояниях до 40 км от виртуальной станции. К тому же при увеличении базовой линии возрастает вероятность отсутствия фиксированного решения. [10] Время сходимости к высокоточному решению после разрыва в приеме навигационных сигналов составляет, как и для PPP 10–15 с.

Исходя из требований к времени сходимости и надежности работы RTK расстояние между базовыми станциями для сети с реальными станциями должно составлять 70 км, для сети с виртуальными базовыми станциями 100 км между физическими.

Достоинством дифференциальных систем ГНСС и SBAS является время сходимости, оно составляет несколько измерений — обычно это несколько секунд. Такое малое время сходимости является следствием простоты используемых алгоритмов.

Характерное время сходимости для различных методов высокоточного позиционирования, основанные на ГНСС, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характерное время сходимости методов высокоточного позиционирования.

	Среднее время холодного старта, с	Среднее время горячего старта
ДГНСС	1-5 с	1-5с
SBAS	1-5 с	1-5с
RTK	10-30 с на расстоянии 20-30 км, до 200 на 100км	10-15с
RTK VFR	10-30 с на расстоянии 20-30 км, до 100с на 40км	10-15с
PPP	7 мин до 20 см, 13 мин до 2.5 см	10-20с

#### 4 ТОЧНОСТЬ ПОСТОБРАБОТКИ

Для задач, не требующих получение высокоточных координат в реальном времени, может оказаться достаточным получение данных позиционирования в режиме постобработки. В постобработке можно получать координаты подвижных и статических объектов с более высокой точностью. При измерении положения неподвижных объектов за счет накопления данных точность полученного координатного решения может оказаться выше, чем для координат, полученных в реальном времени. Для методов высокоточного позиционирования основной вклад приносят случайные ошибки, так как систематические погрешности нивелируются дифференциальными методами. Соответственно точность увеличивается пропорционально квадратному корню из числа измерений.

В большинстве случаев наиболее удобным для постобработки являются методы PPP, поскольку они работают на всей территории Земли, не требуя данных базовых станций и обеспечивая точность 1-2 см в плане. В настоящее время существует ряд платных и бесплатных сервисов, позволяющих получать высокоточные решения при помощи данных алгоритмов по навигационным измерениям (как правило в формате RINEX). Характерные погрешность в режиме постобработки со временем накопления данных 30 минут для различных методов высокоточного позиционирования, основанные на ГНСС, приведены в таблице 2.

Таблица 2 Характерные погрешности в режиме постобработки со временем накопления данных 30 минут для различных методов высокоточного позиционирования, основанные на ГНСС.

Метод высокоточного позиционирования	Точность в постобработке (для статических объектов)
ДГНСС	0.1 – 0.3м
SBAS	0.1 м
RTK	До 5 мм в плане
RTK VFR	До 5 мм в плане
PPP	1-2 см в плане

#### 5 СОЗДАНИЕ И ПОДДЕРЖКА ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ РФ

Создание системы высокоточной навигации на территории РФ является значительным инфраструктурным проектом. При использовании методов RTK без виртуальных базовых станций число станций, необходимых для покрытия всей территории РФ составляет 1400 шт. Это сопоставимо с плотность станций на территории США, Европы и Китая, хотя в несколько раз уступает плотности

станций на территории Японии. Использование реальных базовых станций позволяет заметно упростить разработку программного обеспечения, поскольку здесь нет необходимости реализовывать сложные алгоритмы обработки, требуется лишь коммутировать потоки корректирующих данных.

Введение виртуальных базовых станций позволит увеличить в 1.5 раза расстояние между реальными базовыми станциями и вдвое сократить число и капитальные затраты на установку станций. При этом заметно возрастает стоимость создания программного обеспечения, поскольку требуется разработка специализированного ПО, создающего поправки на основе данных с реальных станций, состояния ионосферы, тропосферы и эфемерид спутников.

Использование алгоритмов PPP позволяет использовать небольшое число базовых станций, данные с которых необходимы для создания высокоточной ЭВИ. Однако при этом возрастают требования к качеству установки станций, числу принимаемых систем и частот. При нарушении работы отдельной станции будет уменьшаться глобальная точность в отличие от локального влияния станции в режиме RTK.

Требуемое число станций для создания сети высокоточной навигации при помощи ГНСС для различных систем высокоточного позиционирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Требуемое число станций для создания сети высокоточной навигации при помощи ГНСС для различных систем высокоточного позиционирования.

Системы высокоточного позиционирования	Количество станций, шт
RTK	1400
RTK VFR	700
PPP	20 (только модернизация)

Необходимо отметить, что большое число станций, кроме капитальных затрат приводит к значительным расходам на содержание инфраструктуры: связь, регламентные и ремонтные работы, проверка оборудования имеют значительную стоимость за 10-ти летний период.

## 6 ВЫВОДЫ

В настоящее время активно развиваются методы высокоточной навигации, основанные на итерационных методах и не требующие большого количества базовых станций – PPP. Сейчас для работы данных алгоритмов требуется передача данных, при этом требования к каналам связи ниже, чем для работы RTK. В перспективе, ЭВИ для работы в режиме PPP будет передаваться по спутниковым каналам связи и приниматься стандартным оборудованием ГНСС. Довольно большим недостатком данного метода является высокое время сходимости, составляющее 7.5-15 минут при использовании современных многосистемных приемников. Использование ионосферных и тропосферных данных реального времени совместно с улучшением алгоритмов позволит уменьшить время сходимости к высокоточному решению за 5-10 минут.

Таким образом для большой области требуемого покрытия высокоточными методами позиционирования рациональным может оказаться создание гибридных схем на основе алгоритмов PPP и RTK. На ответственных участках, где требуется точность 1-2 см в реальном времени и время сходимости менее нескольких минут использовать методы RTK с виртуальными базовыми станциями. На остальной территории, где точность 4-8 см и время сходимости 5-10 минут являются достаточными, использовать методы PPP.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Reha M., Alkan İ.M., Ozulu and V. İlçi Precise Point Positioning (PPP) Technique versus Network-RTK GNSS Conference: Proc. on FIG Working Week 2016, At Christchurch, New Zealand, May 2016.
2. Shu B., Liu H., Xu L., Qian C., Gong X., An X. Performance analysis of BDS medium-long baseline RTK positioning using an empirical troposphere model. Sensors (Basel). 2018, 18 (4), 1199. <https://doi.org/10.3390/s18041199>.
3. Markus Brandl, Xiaoming Chen, Herbert Landau, Carlos Rodriguez-Solano and Ulrich Weinbach. Anatomy of a centimeter-level precise point positioning service. 2019, GPS world, May 12.
4. Kinematic PPP positioning using different processing platforms proc. on FIG Congress 2018, embracing our smart world where the continents connect: Enhancing the Geospatial Maturity of Societies, 6 May 2018.

5. Su M., Su X., Zhao Q., Liu J. BeiDou Augmented Navigation from Low Earth Orbit Satellites. *Sensors* (Basel). 2019, 19 (1), 198. <https://doi.org/10.3390/s19010198>
6. Trimble's RTK and DGPS solutions in comparison with Precise Point Positioning book: "Observing our Changing Earth". Chapter 14. January 2008. pp.709-718
7. Jha, M.K., Singh, S., Upadhyay, N., Khare, N. Comparative study of online GPS post processing services and effects on DGPS data processing. *IJRMST* 2016, V. 7 (1), pp. 29-35.
8. Yu, X. Gao, J. Kinematic precise point positioning using multi-constellation global navigation satellite system (GNSS) observations. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 6. doi:10.3390/ijgi6010006
9. Li, X., Li, X., Ma, F., Yuan, Y. , Zhang, K., Zhou, F. and X. Zhang . Improved PPP Ambiguity Resolution with the Assistance of Multiple LEO Constellations and Signals Remote Sens. 2019, 11(4), 408.
10. Ögütçü, S., Kalaycı, I. Investigating precision of network based RTK Techniques: baseline length is concerned. *World Journal of Research and Review (WJRR)*, 2017, V. 5 (1), pp. 01-03.

## **CURRENT STATE GNSS PRECISE NAVIGATION REVIEW AND ITS PROSPECT IN RUSSIA.**

Budnikov P.A., Alpatov V.V., Vasilev A.E.

In this paper the review of current state GNSS precise navigation is proposed. Methods of precision GNSS solution and its characteristics are described. Also comparison for real-time and postprocessing accuracy is given. Prospects for the methods are presented. The infrastructure estimation for PPP and RTK system in Russia are proposed.

**KEYWORDS:** GNSS, PPP, RTK, VFR, REVIEW, INFRASTRUCTURE.