

УДК: 528.02; 528.06

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ И ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ



Цветков В.Я.

д.т.н., профессор, начальник Научного отдела, АО «НИИАС»,  
E-mail: cvj7@mail.ru, Москва, Россия

к.т.н, доцент, Хошиминский университет натуральных ресурсов и окружающей среды, E-mail: tuandm@hcmunre.edu.vn, Хошимин, Респ. Вьетнам

### Аннотация

Цель работы – исследование методов спутникового позиционирования применительно к определению местоположения подвижных объектов. Мотивацией написания статьи послужило терминологическое несоответствие, которое встречается в некоторых источниках литературы. В частности, ошибочно называют дифференциальное позиционирование высокоточным, а о высокоточном не говорят. Статья показывает различие между позиционированием технологии GPS, между позиционированием технологии DGPS и технологией precise point positioning - PPP. Раскрывается содержание каждой технологии и дается систематика реализации методов. Показано, что для задач транспорта целесообразно применять концепцию PPP в реальном времени (RT-PPP). Для вычисления поправок орбит и часов GNSS в реальном времени целесообразно использовать динамический и полудинамический метод.

### Ключевые слова:

транспорт, спутниковое позиционирование, дифференциальное позиционирование, высокоточное позиционирование.



До Минь Туан

## DIFFERENTIAL AND HIGH-PRECISION POSITIONING

Tsvetkov V.Ya.

D.ofSci.(Tech), Professor, Head of Scientific Department, JSC "NIIAS", E-mail:  
cvj7@mail.ru, Moscow, Russia

Do Minh Tuan

PhD(Tech), Associate Professor, Ho Chi Minh City University of Natural Resources  
and Environment, E-mail: tuandm@hcmunre.edu.vn, Ho Chi Minh City, Vietnam

### Annotation

The purpose of the work is to study the methods of satellite positioning as applied to determining the location of moving objects. The motivation for writing the article was the terminological inconsistency that occurs in some sources of literature. In particular, differential positioning is mistakenly called high-precision, and high-precision is not mentioned. The article shows the difference between GPS positioning, DGPS positioning and precise point positioning - PPP. The content of each technology is disclosed and a taxonomy of the implementation of methods is given. It is shown that for transport tasks it is advisable to apply the concept of PPP in real time (RT-PPP). To calculate corrections to GNSS orbits and clocks in real time, it is advisable to use the dynamic and semi-dynamic method.

### Keywords:

transport, satellite positioning, differential positioning, high-precision positioning

## Введение

В настоящее время для определения координат спутниковыми методами в российской литературе употребляют разные термины; дифференциальное позиционирование (dGPS), точное дифференциальное позиционирование (dGPS или PPP), точное позиционирование (PPP), точное точечное позиционирование (PPP). В скобках сокращенное обозначение технологии, соответствующее термину. Двойное обозначение в скобках означает что этот общий термин в отечественной литературе применяют для обозначения разных технологий.

В сфере РЖД употребляют термин «высокоточное позиционирование», который фактически во многих случаях соответствует дифференциальному позиционированию. Здесь имеет место несоответствие термина и технологии. Такое несогласованное применение терминологии делает актуальным анализ перечисленных понятий и содержания разных технологий позиционирования, а также систем позиционирования.

Дифференциальное позиционирование.

Дифференциальным позиционированием называют метод определения координат с помощью спутникового приемника и уточнения их по данным второго приемника. Второй приемник устанавливают на станции, координаты которой известны. Она называется базовой, опорной станцией, контрольно-корректирующей станцией или референц-станцией

Предшественником дифференциального позиционирования было абсолютное позиционирование. Система глобального позиционирования (GPS) изначально была разработана для достижения точности в пределах нескольких метров, используя кодовые измерения. В начале ее разработки разработчики не предвидели перспектив более высокой точности. Абсолютные GPS позиционирование предоставляет информацию о местоположении приемника на основе сигналов со спутников, но требует наличия базовой станции для коррекции координат.

Для спутникового позиционирования используют 24 спутника, из которых приёмник может наблюдать только 5-6. Для получения координат местоположения достаточно сигналов от 4-х спутников.

Возникновение погрешностей позиционирования обусловлено такими факторами:

- влажность;
- атмосферное давление;
- интерференция;
- температура воздуха;
- атмосфера и ионосфера.

Дифференциальный GPS (DGPS) повышает точность, получая поправки от близлежащей фиксированной станции, уменьшая ошибки, вызванные атмосферными помехами и расхождениями спутниковых часов. Дифференциальный GPS, имеет 2 способа исправления ошибок. В первом случае система корректирует координаты, а во втором – навигационные параметры

Использование измерений фазы, несущей GPS для достижения точности на уровне сантиметра было впервые исследовано Каунселманом [1].

Из-за своих коротких длин волн эти измерения фазы несущей  $\lambda_{\text{GPS}}$  обеспечивают более высокую точность, чем их кодовые аналоги. Например, длины волн, несущей для частот GPS L1 и L2, составляют около 19 см и 24 см соответственно. С другой стороны, длительность 1 бита в грубом/приемном (C/A) коде GPS составляет 1µс, что соответствует примерно 300 м, тогда как 1 бит в коде P1, который в 10 раз быстрее, соответствует примерно 30 м [2].

Целочисленная неоднозначность (IA) является важнейшей проблемой для использования точных измерений фазы, несущей GNSS. IA — это неизвестное начальное число полных циклов несущей на пути от спутника к приемнику. Достижение желаемой точности зависит от разрешения этой IA

В более широком смысле дифференциальная GPS (DGPS) или DGNSS была разработана для повышения производительности приемника GNSS, используя данные с одной или нескольких фиксированных опорных станций [3]. Основной принцип DGNSS заключается в том, что, когда длина базовой линии, определяемая как расстояние между приемником ровера и опорной станцией, достаточно коротка (например, менее 40 км), некоторые ошибки, включая атмосферные задержки, орбиту спутника и ошибки часов спутника, становятся пространственно коррелированными. Затем эти коррелированные ошибки можно эффективно устранить с помощью методов дифференциации. Кинематика в реальном времени (RTK) — это технология DGNSS на основе фазы несущей, которая обеспечивает точность позиционирования в реальном времени на уровне сантиметра [2]. Тем не менее, накладные расходы, связанные с настройкой опорной станции, и присущие ей ограничения по длине базовой линии подчеркивают ограничения DGNSS.

Министерство обороны США имело возможность влиять на точность GPS позиционирования объектов. В этой технологии существовал режим ограниченного доступа, обозначаемый S/A. Такой режим использовали в военных целях для защиты от противника. Для сокрытия местонахождения объектов, специалисты Министерства обороны США искусственно снижали точность работы системы GPS, но в мае 2000 года данный режим отменили.

При первом включении GPS-устройства загрузка занимает довольно много времени. Аналогичная ситуация наблюдается в том случае, если его давно не использовали. Это связано с отсутствием в памяти навигатора эфемериды или устареванием базы данных, которой требуется обновление. Такой запуск называют «холодным стартом». Перед началом работы навигатор должен выполнить следующие операции:

- обнаружить спутник и наладить с ним связь;
  - получить и сохранить пакет данных и эфемериды;
  - найти еще 3 спутника, на основании данных каждого из них выполнить перечисленные выше действия;
  - вычислить собственные координаты;
- Быстрый запуск GPS называют «горячим стар-

том». Он выполняется навигатором в том случае, если в памяти есть актуальные данные. Для эфемерид срок давности составляет 30 минут, а для пакета данных – 30 дней. Следовательно, если навигатор был выключен на короткое время, при повторном включении он сразу восстановит связь со спутником.

Дополнительно существует еще один вид старта устройства – «тёплый». Он занимает чуть больше времени, чем «горячий». «Теплый старт» происходит тогда, когда GPS навигатору нужно обновить эфемериды, а пакет данных по-прежнему актуален.

Подводя итог, следует отметить, что в дифференциальном методе позиционирования (DGPS, DGLONASS) используется не менее двух приемников, измеряющих только псевдодальности или псевдодальности и фазы несущей частоты. Один из приемников стационарно установлен в пункте с известным положением в общеземной системе координат WGS-84 или ПЗ-90. Стационарный приемник называют контрольно-корректирующей станцией (ККИ), опорной станцией (BS), коллективной базовой станцией. Второй приемник находится в

точке, координаты которой необходимо определить. Для этого приемника используются термины: «мобильная станция» (MS), «перемещаемый приемник», «удаленная станция», «потребитель», «транспортируемая аппаратура потребителя».

Суть дифференциального метода сводится к тому, что приемник БС, используя точные координаты фазового центра своей антенны, определяет из наблюдений спутников поправки для координат или псевдодальностей (или для фаз), которыми приемник MS исправляет свои соответствующие параметры и в результате получает точные координаты. В основе этого приема лежит положение о том, что влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково как для базового, так и для мобильного приемника, то есть используются свойства коррелированных ошибок. На рис.1 дана Обобщенная структурная схема дифференциального позиционирования.

Контрольно-корректирующая станция обеспечивает контроль целостности навигационных сигналов и вычисление дифференциальной корректирующей информации для улучшения точности.

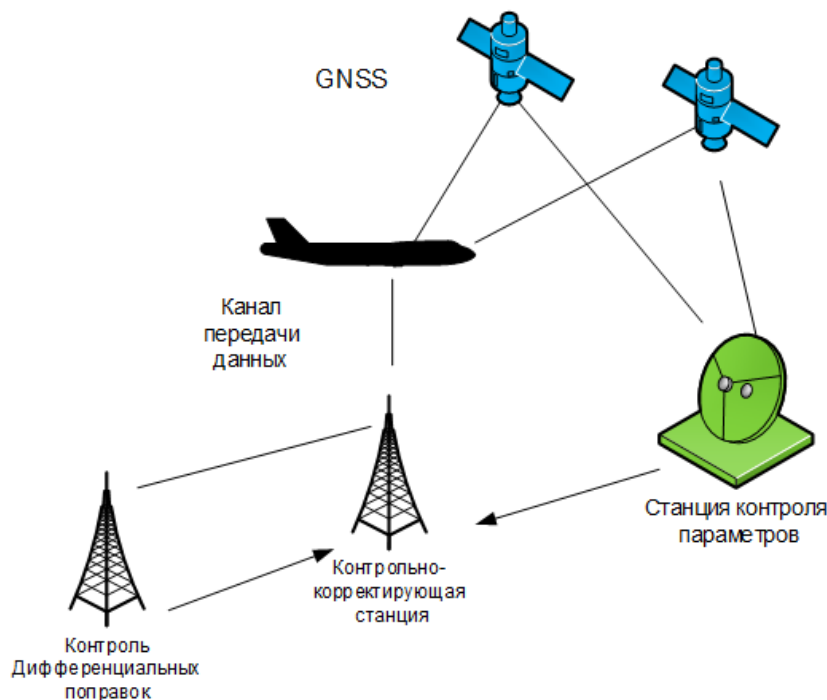


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема дифференциального позиционирования

Дифференциальные поправки от базовой станции к полевому приемнику могут передаваться при постобработке или в реальном масштабе времени. В первом случае после выполнения наблюдений файлы с результатами измерений переводятся на один компьютер, где и происходит их обработка специальным программным обеспечением. Во втором случае поправки от базовой станции передаются полевому приемнику через радиомодем или другими способами беспроводной связи. Это дает возможность получать координаты MS на участке работ через несколько секунд после очередного измерения.

Точность определения местоположения с помощью GPS обычно составляет от 2 до 10 м [4]. Этого недостаточно для проведения специальных

измерительных работ и мониторинга транспорта. Радикальным направлением повышения точности навигационных определений является дифференциальный режим. Его сущность заключается в устранении некоторых погрешностей навигационного поля системы, сильно коррелированных в локальных районах (до 2000 км). Система DGPS предназначена для повышения точности определения координат от 1 метра до нескольких сантиметров в зависимости от метода. Именно этот метод в РЖД называют высокоточным.

Все наземные системы DGPS по назначению разделяются на навигационные (обеспечение навигационных задач) и геодезические (обеспечение задач геодезии). Навигационные системы обеспечивают метровую (1 – 5 метров в

зоне действия дифференциальных системы), геодезические — дециметровую и сантиметровую. Первые выполняют работу как правило в географической (сферической) системе координат. Вторые в прямоугольной метрической и местной. Космические системы позволяют решать навигационные задачи с геодезической точностью.

Существенным недостатком во всех методах дифференциальной коррекции являются координаты опорного пункта. Погрешности координат этого пункта полностью входят в координаты определяемых точек, то есть вся развиваемая система оказывается смещенной [5].

Точность навигационной задачи позиционирования зависит от следующих факторов

- геометрия расположения используемых навигационных космических аппаратов (НКА) [5];
- погрешности бортовых шкал времени (ШВ) НКА вызванное асинхронностью бортовых часов НКА
- плохой корреляцией времени между часами приёмника и часами спутника.
- влияние погрешностей эфемерид НКА, эфемериды, загруженные с земли и транслируемые спутником, могут терять соответствие. Несоответствие возможно при изменении орбиты, о которых пользователь заранее не предупреждён, а также после ухода спутника в тени Земли
- погрешности, обусловленные прохождением радиосигналов в атмосфере (ионосферные и тропосферные погрешности).
- аппаратные погрешности НКА;
- релятивистские эффекты.

По охватываемому пространству различают пять типов систем.

Мобильные, которые имеют дальность действия от ККС до 10 км. Они включают одну ККС, аппаратуру управления и контроля (без контроля целостности), а также средства передачи данных.

Локальные — имеют максимальные дальности действия от ККС до 200 км. Они включают одну ККС, аппаратуру управления и контроля (в том числе и контроля целостности), а также средства передачи данных.

Региональные станции имеют дальность действия от 200 до 2000 км. DGPS включают несколько служебных (собирающих информацию) и одну центральную ККС, а также средства передачи корректирующей информации и сигналов целостности.

Широко зонные или NDGPS (nationwide DGPS) — общенациональная DGPS) зоны от 2000 до 6000 км. NDGPS включает сеть контрольных станций, информация от которых передаётся на главные станции для совместной обработки с целью выработки поправок и сигналов целостности.

Выработанные корректирующая информация и сигналы целостности загружаются через наземные станции загрузки на геостационарный КА (спутники связи), для последующей ретрансляции потребителям. Спутники связи можно также используются в качестве дополнительных навигационных точек для дальномерных измерений.

Основными методами контроля целостности при этом являются методы анализа разностей между измеренными и прогнозируемыми значениями пространственных данных, а для повышения точности используется избыточность измерений.

Глобальные или GDGPS (global DGPS) — с охватом по всему земному шару.

В обобщённую структурную схему построения систем DGPS входят следующие основные элементы: контрольно-корректирующая станция; станция мониторинга дифференциальных поправок; станция передачи дифференциальных поправок и сигналов предупреждения.

### **Метод точного позиционирования (PPP)**

Точное позиционирование точки (precise point positioning - PPP) показало себя мощным инструментом в геодезических и геодинамических приложениях. Хотя его точность почти сопоставима с сетевыми решениями, восточная составляющая результатов PPP все еще нуждается в улучшении путем исправления целочисленной неоднозначности, что до сих пор предотвращается наличием некалиброванных фазовых задержек (UPD), возникающих в приемниках и спутниках

Представленный в 1997 году метод точного позиционирования точки (PPP) представляет собой метод, который обеспечивает точную и аккуратную оценку глобального положения пользователя с использованием одного приемника GNSS [6]. PPP определяет абсолютное положение приемника, полагаясь исключительно на измерения GNSS приемника ровера и глобальный спектр данных точной коррекции. Поскольку PPP должен учитывать все источники ошибок, игнорируемые в DGNSS, его основной проблемой остается время сходимости, необходимое для разрешения IA для достижения точности на уровне сантиметра [7]. Однако способность PPP предоставлять глобально применимое решение с помощью одного приемника вызвала значительный интерес в исследовательском сообществе, что привело к постоянным усилиям по преодолению его ограничений [8].

PPP может применяться во многих аспектах нашей повседневной жизни. Например, в [9] PPP был интегрирован с высокопроизводительными инерциальными датчиками для автономной навигации наземных транспортных средств на уровне полосы движения на автомагистралях. В других работах исследовалась интеграция PPP с недорогими инерциальными датчиками для навигации наземных транспортных средств в сложных условиях GNSS [10]. PPP также применялся для точного земледелия [11] и мониторинга атмосферы [12]. В [13] PPP с продуктами BeiDou B2b использовался для мониторинга землетрясений. Для PPP можно использовать несколько программных инструментов с открытым исходным кодом, таких как RTKLIV [14].

Для достижения точности на уровне сантиметра в PPP необходимо устранить или значительно уменьшить погрешности дальности. Многие из этих ошибок, такие как эффект Саньяка (связанный с вращением Земли), эффекты релятивистских часов, ошибки орбиты и часов спутников, а также

ный с вращением Земли), эффекты релятивистских часов, ошибки орбиты и часов спутников, а также атмосферные задержки, также распространены в стандартном позиционировании точек (SPP), что приводит к точности порядка нескольких метров.

PPP используется с 1997 года на основе точной информации об орбите и времени спутника, предоставляемой некоторыми службами, такими как IGS [6]. Чтобы получить эти точные продукты, требуется время для обработки вычислений. Чем больше задержка, тем выше точность. Первоначально IGS предлагала только конечные продукты. То есть пользователи могут использовать PPP только через 12-18 дней после измерения. Позже необходимость использовать PPP с минимально возможной задержкой привела к тому, что IGS предоставила другие продукты с меньшим запаздыванием, такие как Ultra-quick (3-9 часов), Rapid (17-41 час). В апреле 2013 года, IGS предоставила эти поправки в режиме реального времени [15]. Отсюда и родилась концепция PPP в реальном времени (RT-PPP).

PPP в реальном времени является технологией, которая может предоставлять результаты однократного позиционирования в реальном времени, если точные спутниковые времена и данные об орбите доступны в реальном времени. Для обеспечения PPP в реальном времени в настоящее время существуют два типа услуг, которые могут предоставлять точные спутниковые времена и информацию об орбите.

Как и системы GPS технологии PPP включают пять типов систем (см выше) или служб. Рассмотрим две из них.

Глобальные службы: глобальные PPP используют информацию, предоставляемую глобальной службой, такой как IGS. Центры управления этих служб вычисляют точные поправки к орбитам и часам на основе информации, полученных из глобальной сети станций слежений спутников. В этом случае вся орбита спутника будет хорошо отслежена, а точность оценок орбиты и часов не будет зависеть от положения. В настоящее время IGS предоставляет пользователям в режиме реального времени поправки через Интернет, используя протокол, называемый NTRIP (сетевой транспорт RTCM через Интернет-протокол).

Локальная служба: возникла как альтернатива глобальной служб, которая имеет ограничение по времени и стоимости. Работа с глобальной сетью станций слежений может быть сложной и дорогостоящей для местного поставщика. Чтобы преодолеть эту трудность, локальная служба PPP должна иметь возможность рассчитывать поправки к орбитам и часам, используя локальную сеть станций слежений.

В этом случае точность орбиты и часов может немного снизиться, но это снижение точности в основном происходит за пределами зоны действия сети станций.

Внутри локальной области комбинация орбитальных и часовых устройств обеспечивает хорошие характеристики позиционирования. При этом

операции позиционирования могут быть выполнены в той же степени, что и в глобальной сети, но с меньшими затратами и меньшими временными потерями. Такая услуга может дополнить RTK в районах, удаленных от базовой станции. Можно видеть, что результаты PPP, основанные на локальной сети, даже для небольших территорий, столь же точны, как и результаты позиционирования с использованием глобальной сети. Это открывает новые способы предоставления услуг локального точного определения местоположения [16].

К местным услугам, доступные сегодня, можно перечислить спутниковую систему расширения (SBAS), как и WAAS (Wide Area Augmentation System) в Северной Америке, EGNOS (Европейская геостационарная навигационная система покрытия) и Европе, MSAS (спутниковая система MTSAT) в Кореи и Японии, GAGAN (Индийская навигационная система GPS и GEO) в регионе Индии.

Чтобы определить правильную траекторию спутника, обычно используют следующие три метода: [17]

- Динамические методы
- Геометрические методы
- Полудинамические методы

Динамические методы основаны на интегральных уравнениях движения

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (1)$$

В выражении (1)  $F_i$  означает все возмущения, влияющие на движения спутника, такие как гравитационные возмущения, приливные возмущения и т. д. При непрерывном слежении спутника имеем

$$y = Hx + \varepsilon, \quad (2)$$

При анализе матрицы состояния можно улучшить параметры орбиты спутника. Самая большая проблема с динамическими методами - время, необходимое для вычислений. Вычисление поправок к эфемеридам занимает много времени, поэтому они в принципе не подходят для операций в реальном времени. С другой стороны, они позволяют рассчитывать точные прогнозы.

После того, как поправки к эфемериде вычислены, можно легко вычислить поправки к часам. Чтобы делать эти, за спутником необходимо одновременно наблюдать с не менее 2 опорных станций (рис.1).

Геометрические методы не используют никакой информации, полученной из слежений орбиты. Их также можно назвать обратной задачей GPS. Положение опорных станций точно известно, поэтому, если одновременно с 4 или более 4 станций выполняется наблюдения, можно определить ошибку часов и положение этого спутника. Чтобы

но, поэтому, если одновременно с 4 или более 4 станций выполняется наблюдения, можно определить ошибку часов и положение этого спутника. Чтобы применить этот метод, часы станций должны быть синхронизированы. Эти методы не предназначены для предоставления фактических значений коррекции эфемериды. Они предоставляют действительные поправки для интересующей области, поэтому экстраполяция поправок на другие регионы может быть ненадежной.

Полу динамические методы есть комбинация двух методов, описанных выше. Они объединяют динамическую информацию с геометрической информацией, полученной в результате измерений. Эти методы могут обеспечить более точные корректировки, чем динамические или геометрические методы, но поскольку они используют относительно простые динамические модели, они не могут обеспечить точные прогнозы траектории.

Существуют методы коррекции WAAS [18]. Полный алгоритм WAAS содержит три фильтра Калмана: один для определения траектории, второй для вычисления поправок за ионосферы и третий для быстрой коррекции. Фильтр быстрой коррекции — это фильтр Калмана для исследования состояний часов земных станций слежения, спутников GPS и геостационарных спутников. Векторы положения и скорости спутника в системе координат с центром в центре Земли (ECI), а  $C_b$  - смещение часов спутника, соответствующее синхронизированным часам станций слежений.

Дифференциальные уравнения описывают скорость изменения вектора положения и скорости спутника, они являются функцией переменных в компоненте оцененного вектора состояния. Подробности метода описаны в ряде источников. В данном случае следует показать, что высокоточное позиционирование это PPP, а не GPS или DGPS.

### Заключение

Термин «высокоточные геодезические измерения», применяемый в некоторых публикациях РЖД, на самом деле соответствует DGPS и в редких случаях PPP.

В дифференциальном методе на опорном пункте по результатам наблюдений находят поправки к параметрам наблюдений для неизвестного пункта или к его координатам. Эти наблюдения обрабатывают отдельно. Этот метод обеспечивает мгновенные решения, по отношению к опорной станции [5]. Таким образом дифференциальный метод коррекции заключается в определении поправок от опорных станций DGNSS с заранее определёнными координатам. Поскольку координаты базовой (контрольно-корректирующей станции) известны с определённой точностью, до 1 метра для целей навигации, до 20 см для целей геодезии и навигации с использованием систем дифференциальной коррекции, и локальные решения с точностью до 3 см для целей геодезии. То их, координаты, можно использовать для вычисления поправок для вновь определяемых параметров позиционирования. Принципиально существует два метода передачи поправок напрямую через радиоканал (систему

емых параметров позиционирования. Принципиально существует два метода передачи поправок напрямую через радиоканал (систему наземных ретрансляторов) или через спутник связи. Таким образом все системы дифференциальной коррекции делятся на наземные и спутниковые.

Основной совокупностью приёмов и методов получения плановых координат и высот точек местности по средствам получения поправок с базовой станции, принимаемых аппаратурой пользователя в реальном времени является Real Time

Для вычисления поправок орбит и часов GNSS в реальном времени часто использовать динамический и полудинамический метод. В частности:

- Метод полудинамический позволяет предоставлять поправочные числа с меньшим временем задержки, но с меньшей точностью, и поэтому подходит для систем расширения SBAS, где требуемая точность позиционирования находится на уровне дм-м. Чтобы можно было применить этот метод, часы опорных станций в локальной сети должны быть синхронизированы друг с другом. Это позволяет фильтрам Калмана уменьшить количество переменных в векторе состояния и, следовательно, вычислительный объем и время.

- Динамический метод требует использования фильтра Калмана с большим вектором состояния, который включает множество динамических параметров, связанных с орбитой спутника. Таким образом, он может обеспечить лучшую точность прогнозирования поправочных чисел в реальном времени, что приводит к точности PPP, которая может быть достигнута в см для 24-часового статического измерения и в дм для динамического измерения. Однако из-за более длительного времени вычислений задержка также увеличивается. Результаты позиционирования рассматриваются почти в реальном времени.

Чтобы уменьшить вычислительную нагрузку динамических методов, некоторые аналитические центры IGS разделяют определение орбиты и часы спутников на 2 отдельные фильтры Калмана: 1 фильтр для генерации сверхбыстрых эфемерид спутников и поправок орбиты. А второй фильтр Калмана берет орбитальную информацию из первого фильтра и служит для расчета поправок часов.

**Список литературы**

1. Counselman, C.C.; Gourevitch, S.A. Miniature interferometer terminals for earth surveying: Ambiguity and multipath with global positioning system. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1981, GE-19, 244–252.
2. (4) El-Rabbany, A. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2002.
3. (5) Kaplan, E.; Hegarty, C. *Understanding GPS: Principles and Applications*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2006.
4. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Differential\\_GPS](https://ru.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS).
5. Антонович К.М. Спутниковые методы определений координат // использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. — Москва: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. - Т. 2. - 311 с.
6. Zumberge, J.; Heflin, M.; Jefferson, D.; Watkins, M.; Webb, F.H. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 1997, 102, 5005–5017.
7. Kouba, J.; Lahaye, F.; Tétreault, P. Precise Point Positioning. In *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*; Teunissen, P.J., Montenbruck, O., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; Chapter 25; pp. 723–751.
8. Bisnath, S.; Gao, Y. *Precise Point Positioning: A Powerful Technique with a Promising Future*; GPS World: Cleveland, OH, USA, 2009; pp. 43–50.
9. Elsheikh, M.; Noureldin, A.; Korenberg, M. Integration of GNSS Precise Point Positioning and reduced inertial sensor system for lane-level car navigation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022, 23, 2246–2261.
10. Vana, S.; Bisnath, S. Low-Cost, Triple-Frequency, Multi-GNSS PPP and MEMS IMU Integration for Continuous Navigation in Simulated Urban Environments. *J. Inst. Navig.* 2023, 70, navi.578. [Google Scholar] [CrossRef].
11. An, X.; Meng, X.; Jiang, W. Multi-constellation GNSS Precise Point Positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination. *Satell. Navig.* 2020, 1, 7.
12. Kalinnikov, V.; Ustinov, A.; Zagretdinov, R.; Tertyshnikov, A.; Kosarev, N. The Precise Point Positioning Method (PPP) in environmental monitoring applications. In *Proceedings of the 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, SPIE, Novosibirsk, Russia, 18 December 2019; Volume 11208, pp. 1444–1448.
13. Fang, R.; Lv, H.; Hu, Z.; Wang, G.; Zheng, J.; Zhou, R.; Xiao, K.; Li, M.; Liu, J. GPS/BDS Precise Point Positioning with B2b products for high-rate seismogeodesy: Application to the 2021 Mw 7.4 Maduo earthquake. *Geophys. J. Int.* 2022, 231, 2079–2090.
14. Takasu, T.; Yasuda, A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. In *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS*, International Convention Center, Jeju, Republic of Korea, 22–25 September 2009; Volume 1, pp. 1–6.
15. Tomasz Hadas and Jaroslaw Bosy, IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time, 2015. *GPS Solution* 19: 93-105.
16. María D, Laínez Samper, Miguel M Romay Merino, Álvaro Mozo García, Ricardo Píriz Nuñez, Tsering Tashi, Multisystem real time precise-point-positioning, *Coordinates FEB* 2011. – T7. - №2.
17. Romay-Merino M. M. et al. Real-time ephemeris and clock corrections for GPS and GLONASS satellites // *Space Flight Dynamics*. – 1997. – Т. 403. – С. 85.
18. Mohider S. Greval, Lawrence R. Weill, and Augus P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, Wiley-Interscience Second Edition, 2007. 525 pp.