

Глобальные навигационные спутниковые системы.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предназначены для создания координатно-временного навигационного поля на Земле и в ближнем околоземном пространстве. Навигационное обеспечение пользователей ГНСС основано на достижениях астрометрии, геодинамики, небесной механики, эфемеридной астрономии, фундаментальной геодезии и картографии, на реализации множества долговременных наблюдательных программ, в которых участвуют десятки стран и многие международные и национальные организации. В результате этой деятельности решаются следующие задачи:

- установление, поддержание и распространение высокоточных небесной и земной систем координат;
- определение параметров вращения Земли (координат полюса, углов процессии и нутации);
- установление, поддержание и распространение Всемирного времени; развитие и поддержание эталонной базы единой системы времени и эталонных частот, средств синхронизации;
- построение высокоточной динамической системы координат и ее реализация в виде теории движения тел Солнечной системы;
- определение параметров гравитационного поля Земли.

Новые измерительные технологии – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерная локация искусственных спутников Земли (SLR) и Луны (LLR), автономные спутниковые системы определения орбит типа DORIS, средства радиолокации планет и их спутников, мониторинг гравитационного поля Земли, информационные технологии высокоскоростной цифровой связи по магистральным волоконно-оптическим

линиям за последние 15-20 лет увеличили точность координатно-временных измерений на несколько порядков.

Системы координат.

Международная небесная система координат ICRS (International Celestial Reference System), введенная международным астрономическим союзом в 1998г, основана на кинематическом принципе. Началом отсчета является барицентр (центр масс) Солнечной системы, оси системы жестко зафиксированы в пространстве относительно удаленных объектов наблюдаемой Вселенной: ось u^1 направлена на точку весны, ось u^3 – вдоль оси вращения Земли на эпоху 1 января 2000г. ICRS реализована набором реперов системы астрономических координат ICRF, содержащим от 212 до 717 радиоисточников (квazarов и ядер галактик), согласована с фундаментальным каталогом FK5, содержащим координаты и собственные движения около 1,5 тыс. звезд, и каталогом HCRS (Hipparcos Celestial Reference Frame), в котором приведены координаты, собственные движения, параллаксы и фотометрические величины более 100 тыс. звезд по результатам наблюдений европейского астрометрического спутника «Hipparcos» за 37 месяцев его работы. Точность положений звезд не хуже 1mas (миллисекунды дуги), точность определения собственных движений не хуже 1 mas/год. Новая версия ICRF обеспечит среднюю точность не хуже 0,2 mas.

Международная земная система координат ITRS (International Terrestrial Reference System) принята МАС в 1991г, ее началом является центр масс Земли, включая океан и атмосферу. Система вращается вместе с Землей и не является инерциальной. Ориентация пространственных осей определяется из наблюдений. Ось z является средней осью вращения Земли и направлена в опорный полюс. Ось x лежит в плоскости опорного меридиана. Единицей длины является метр, шкалой времени – шкала TCG (Geocentric

Coordinate Time – геоцентрическое координатное время). ITRS реализована международной земной системой отсчета ITRF с помощью декартовых координат ряда опорных пунктов на Земле, перечень которых утверждается каждые несколько лет. Работы по установлению фундаментальных систем отсчета и определению параметров вращения Земли координирует Международная служба вращения Земли и систем отсчета IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), Центральное бюро которой находится в Париже, а Бюро по срочной службе и прогнозу (Prediction of Earth Orientation Parameters) в Морской обсерватории США. Последняя реализация земной системы координат содержит координаты и скорости более 500 опорных станций, большая часть которых сосредоточена в Европе и Северной Америке. Точность определения координат и скоростей движения станций составляет 0,1 – 1 см и 1,0 – 5,0 мм в год соответственно. В ближайшем будущем точность координат станций будет не хуже 2мм.

Определение параметров вращения Земли основано на вычислениях долговременных рядов этих параметров из комбинации рядов, полученных различными методами более чем в 20 национальных центрах. Ожидается, что точность определения координат полюса и углов нутации в недалеком будущем достигнет 25 микросекунд дуги, т.е. будет улучшена вдвое, а для Всемирного времени точность определения будет доведена до 2 микросекунд с временным разрешением этих параметров от 10 мин до 1 часа.

Динамическая система координат основана на разнообразных координатно-временных астрономических наблюдениях, совместной обработке разнотипных данных и вычислениях координат планет и Луны, в результате которых создаются таблицы – эфемериды, которые реализуют эту систему отсчета. Международной службой вращения Земли в качестве стандартных рекомендованы эфемериды DE 405/LE405, вычисленные Лабораторией реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL). В Институте прикладной астрономии РАН создана и поддерживается серия

эфемерид ERM (Ephemerides of Planets and the Moon), сравнивая по точности с серией эфемерид DE/LE. Различия гелиоцентрических расстояний планет для эфемерид ERM 2006 и DE414/LE414 на интервале 1970 – 2010гг не превышают 11,4м для Земли, 49,7м для Марса, 130м для Венеры и 180м для Юпитера.

В астрономических ежегодниках представлены таблицы предвычисленных небесных координат Солнца, Луны, планет и других астрономических объектов на последовательные моменты времени. Эфемериды DE405/LE405 используются в американско-английском ежегоднике «The Astronomical Almanac», эфемериды ERM – в «Астрономическом ежегоднике», выпускаемом РАН. Кроме них важнейшими астрономическими ежегодниками являются «Berliner Astronomisches Jahrbuch», «National Almanac», «Connaissance des Temps», «American Ephemeris», которые применяются в мореходной астрономии для определения координат наблюдателя.

Необходимым дополнением фундаментальных систем координат является модель гравитационного поля земли EGM96 (Earth Gravitational Model 1996), содержащая коэффициенты сферических гармоник до 360 степени и порядка. Она содержит все коэффициенты сферических гармоник до 70 степени и порядка и более 600 выборочных коэффициентов до 360 степени. Модель построена Картографическим агентством США NIMA (National Imagery and Mapping Agency), Годдардским центром космических полетов NASA и Государственным университетом Огайо с использованием базы данных гравиметрических измерений со спутников GEOSAT и ERS-1.

Движение спутников в неоднородном гравитационном поле вращающейся Земли является возмущенным. Определение возмущающих сил, обусловленных секториальными и тессеральными гармониками гравитационного потенциала, относится к обратным задачам динамики, которые решаются в рамках теории задач некорректного типа, что позволяет уточнять модель геопотенциала.

Измерительные технологии.

1. Измерение времени.

Измерение времени опирается на постулат воспроизводимости:

Длительность двух идентичных явлений одинакова, иначе – одни и те же причины требуют одного и того же времени чтобы произвести одни и те же эффекты. Время однородно – совершенно одинаковые явления могут происходить в разные моменты времени.

Не существует привилегированного времени; нет наиболее правильного способа измерения времени по сравнению со всеми другими.

Непосредственно измерить можно только локальное время – собственное время часов.

Время измеряют интервалом между последовательными событиями. Интервал между двумя событиями – свойство внутренне присущее данной их паре.

Измерение времени имеет дело с системами координат, часами и электромагнитными процессами. Существуют приборы, которые, используя определенный атомный переход, производят в реальном времени сигнал с одной и той же частотой везде и всегда. Атомные свойства одни и те же во все времена и во всех местах, если эти свойства оцениваются наблюдателем, находящимся в непосредственной близости с атомом и движущимся вместе с атомом одинаковым путем.

Согласно общей теории относительности существует два вида величин: собственные и координатные величины. Собственные величины определяются в результате эксперимента или наблюдения в лаборатории без привлечения каких-либо соглашений о выборе систем отсчета. Фундаментальными величинами являются собственное время и длина, измеряемые в конкретной лаборатории. В общем случае промежуток времени, измеряемый в разных лабораториях будет разным. Координатные величины, такие как время и длина, зависят от выбора системы отсчета и

определяются на основе соглашения о свойствах системы отсчета. При измерениях времени соотношение между координатным временным интервалом и собственным (измеренным интервалом) зависит от положения часов наблюдателя в пространстве.

Существуют теоретические соотношения между собственным временем наблюдателя и временем в различных системах координат (координатным временем), которые используются для построения точных моделей в расширенной области пространства, например, на Земле или в околоземной космическом пространстве. Установление системы координат определяет соответствующую системную шкалу времени.

С международной небесной опорной системой координат ICRF связано барицентрическое координатное время TCB, геоцентрическое координатное время TCG является шкалой времени для системы ITRS.

Если установить стандартные часы на Земле на уровне геоида, то соотношение между собственным временем этих часов τ и геоцентрическим координатным временем t дается выражением

$$\frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{U}{c^2} = 1 - 0,697 \cdot 10^{-9}$$

где U – гравитационный потенциал на равновесной поверхности геоида с учетом вращения Земли. Собственное время таких часов отстает от координатного на 22 мс в год. Часы идут медленнее в той лаборатории, которая глубже сидит в гравитационном потенциале: разность энергий атомных или ядерных уровней зависит от положения атома. В самолетных экспериментах часы, долго время находившиеся в воздухе, после полета доставлялись в лабораторию, где их показания сравнивались с показаниями таких же часов, оставшихся на Земле. Оказалось, что в согласии с общей теорией относительности летавшие часы уходили вперед на величину $\Delta T = \frac{gh}{c^2} T$, где T – продолжительность полета на высоте h . «Синее» смещение атомных часов с высотой доказано экспериментально.

В 2000 году МАС определил шкалу земного времени TT, связав его с геоцентрическим координатным временем TCG соотношением

$$\frac{d(TT)}{d(TCG)} = 1 - L_G,$$

где $L_G = 6,969290134 \cdot 10^{-10}$ – константа, принятая с учетом наилучшей на то время оценки потенциала на геоиде. Она представляет собой гравитационный потенциал на геоиде, деленный на квадрат скорости света c^2 . Таким образом, геопотенциал на геоиде $W_0 = 62636856,0005 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Реализация единого геоцентрического координатного времени, основанного на определении секунды собственного времени и согласованной метрики, позволила повсеместно обеспечить синхронизацию часов как на Земле, так и на околоземных орбитах, а также рассчитывать и контролировать движение космических аппаратов и небесных тел в окрестностях Земли и путем известных преобразований переходить к барицентрическому координатному времени для вычисления, прогноза и коррекции траекторий межпланетных аппаратов.

Шкала атомного времени TAI (Temps Atomique International) основана на использовании квантовых стандартов частоты и циклическом естественном процессе: резонансном переходе в атомах с одного энергетического уровня на другой. Шкала TAI равномерна на длительных промежутках времени и не зависит от вращения Земли. За единицу измерения времени принимается атомная секунда (секунда СИ), определяемая как промежуток времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих частоте излучения атомом цезия 133 при резонансном переходе между энергетическими уровнями сверхтонкой структуры основного состояния при отсутствии внешних магнитных полей на уровне моря. Длительность секунды TAI выбрана такой, чтобы она соответствовала длительности секунды эфемеридного времени ET для 1900г и определена с точностью порядка $2 \cdot 10^{-9}$ относительно

эфмеридной секунды. Термин «на уровне моря» относится к выбранному значению геопотенциала W_0 .

Стандарты частоты используют квантовые переходы между определенными энергетическими состояниями атомов цезия, водорода, рубидия, ртути. Цезиевые и водородные стандарты частоты служат в качестве основы национальных эталонов времени и частоты при формировании национальных и международной шкал атомного времени. Основными характеристиками атомных часов являются нестабильность и точность. Нестабильность составляет 10^{-15} на интервале 100-1000с. Лучшую нестабильность обеспечат часы, принцип действия которых основан на использовании цезиевого атомного фонтана, их нестабильность достигает 10^{-16} на интервале усреднения порядка нескольких суток. Перспективные разработки стандартов частоты проводятся на базе оптических атомных часов с ультра-холодными атомами (например, иттербия, магния), захваченными в оптическую ловушку и лазерной спектроскопией так называемого часового перехода между их энергетическими уровнями. Неопределенности измеряемой частоты связаны с эффектом Штарка (расщеплением спектральных линий под действием электрического поля), столкновениями между атомами в ловушке, неоднородным возбуждением уровней и шумом лазера. Нестабильность частоты ожидается на уровне 10^{-17} - 10^{-18} .

Если величина частоты, которую генерирует идеальный стандарт, отличается от номинальной, равной 9192631770 Гц, то шкала этого стандарта будет расходиться с ТАИ линейно. Отличие реальной частоты стандарта от номинальной называется его точностью. Шкала ТАИ расходится с идеальной шкалой времени примерно на 1 мкс в год.

Чтобы использовать преимущества атомных часов потребовалась разработка методов сличения многочисленных разнесенных стандартов частоты, а также сличения показаний часов и, кроме того, способов передачи времени для их синхронизации. В формировании шкалы ТАИ участвуют

более 55 институтов и лабораторий, где находится около 200 атомных стандартов частоты. Водородные стандарты обеспечивают высокую стабильность шкалы на относительно коротких интервалах, тогда как цезиевые стандарты, сохраняют высокую точность и непрерывность шкалы при долговременной стабильности. Каждому атомному стандарту, участвующему в формировании шкалы ТАІ присваивается вес, который является функцией нестабильности частоты. Любые новые часы остаются под наблюдением по крайней мере 4 месяца и им присваивается нулевой вес. Часы, которые наделяются максимальными весами, дают более 80% вклада в свободную атомную шкалу (EAL), стабильность которой оптимальна для периода выборки данных. Для этого путем статистической обработки показаний часов за период не менее одного и не более двух месяцев вычисляется взвешенное среднее по ансамблю часов на установленную дату. Шкала ТАІ реализуется в виде поправок к показаниям конкретных атомных стандартов частоты, участвующих в сравнении. Поправки для определенных дат публикуются в циркуляре Международного бюро мер и весов (BIPM), информация о ходе всех часов, которые используются для вычисления шкалы ТАІ, представлена на сайте <http://www.bipm.fr>

Чтобы дать возможность потребителям синхронизировать свои часы необходимо решить задачу создания и распространения однозначной шкалы, для чего требуется почти непрерывное сличение времени. Известны три метода сличения, которые используются по отдельности или в комбинации:

- физическая транспортировка работающих часов;
- односторонняя передача радиосигналов от излучателя к приемнику;
- двусторонняя квазиодновременная передача сигналов от часов А к часам В и от В до А вдоль идентичных траекторий.

Преимущество сличения времени с помощью перевозимых часов состоит в том, что исключаются неопределенности, связанные с

инструментальными запаздываниями и распространением радиосигнала. Этот способ широко применялся до появления спутниковой связи и GPS.

Односторонняя передача сигналов обеспечивает высокую точность при условии сличения часов находящихся в прямой видимости. Если это условие не выполнено, используется прием сигнала излучателя, который виден для обоих часов. Координаты антенн, принимающих один и тот же сигнал, должны быть при этом известны с точностью до нескольких десятков сантиметров. Метод общего видения с усреднением более чем за сутки позволяет уменьшить неопределенности на любых расстояниях до нескольких наносекунд.

Метод сличения при помощи двусторонней передачи является по существу разностным и позволяет избежать неопределенностей точных координат часов, определения траекторий распространения сигналов и учета задержек в тропосфере и ионосфере. Этот метод применяется для сличения наземных часов с использованием сигналов, переизлучаемых геостационарными спутниками и позволяет на больших расстояниях сличать первичные стандарты частоты при неопределенности 10^{-15} за сутки. По соглашению частоты сличаются на определенных интервалах времени в геоцентрической системе координат. Точность сличений возрастает при увеличении интервала до нескольких суток.

Однако международное атомное время невозможно использовать в качестве гражданского, если не связать его с солнечным временем. С 1 января 1972 г. установлено универсальное координированное время UTC (Coordinated Universal Time) как основа гражданского времени, отличающееся на целое число секунд от атомного времени для сохранения связи с вращением Земли. Неравномерность вращения Земли и перемещение оси вращения в теле самой Земли учитываются в ряде вариантов всемирного времени UT, среднего солнечного времени на меридиане Гринвича:

UT0 – время на мгновенном гринвичском меридиане, определенное по мгновенному положению полюсов Земли из астрономических наблюдений;

UT1 – время на среднем гринвичском меридиане, исправленное за движение земных полюсов; поправка зависит от координат мгновенного полюса, отсчитываемых относительно общепринятого среднего полюса;

UT2 – время исправленное за сезонную неравномерность вращения Земли.

Между UTC и UT1 накапливается расхождение, обусловленное, во первых, неравномерностью шкалы UT1, а, во вторых, неравенством масштабов UT1 и TAI (1 атомная секунда не равна в точности 1 секунде UT1). При нарастании расхождения между этими шкалами до 0,9с производится коррекция скачком на 1с.

Основная причина введения скачущих секунд заключена в постепенном увеличении длительности суток под влиянием приливного трения. Оно вызвано сдвигом во времени между действием силы со стороны Луны и Солнца и реакцией океана, атмосферы и твердой оболочки Земли. Приливное трение настолько мало, что приводит к удлинению суток на несколько миллисекунд за столетие. В противоположность этому скачущие секунды часты: с тех пор, как их ввели в 1972г, они устанавливались 23 раза. Однако почти все можно было бы не вводить, если бы немного изменить определение секунды, заменив последние три цифры 770 на 997 в величине секунды атомного времени, принятом в 1967 году (длительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133). Решение, когда ввести скачущую секунду принимает IERS. Международное атомное время имеет двоякий статус. С одной стороны, это весьма точное время атомных часов, а с другой, поскольку сохраняется связь с вращением Земли, его можно использовать для определения долготы, наведения телескопов и для привязки астрономических наблюдений.

Время в TAI и в UTC доступно в пределах сотни наносекунд в реальном времени и в пределах около 10 наносекунд за один или 2 месяца. С тех пор как в 50-х годах начали применять стандарты частоты, их характеристики улучшались примерно в 10 раз каждое десятилетие. По мере

повышения стабильности сличение часов становится все более сложной задачей. Для учета влияния гравитации необходимо знать высоту места, где находятся часы, над поверхностью геоида. Чтобы сличить расположенные в разных местах стандарты частоты с нестабильностью 10^{-16} необходимо знание высот до долей метра, сличение на уровне 10^{-18} требует знания высот до 1 см, тогда как геоид испытывает возмущения, вызванные приливными колебаниями земной коры, океаническими приливами и течениями, барическими колебаниями уровня моря, сезонными перераспределениями водных и воздушных масс и долговременными процессами таяния ледников и тектонического движения плит. Можно сказать, что гравитационный эффект не нарушая работу часов меняет само время. Повышение точности выше определенного уровня переводит проблему хранения времени в разряд нерешаемых, поскольку сличению таких часов препятствует нестационарность геоида.

Глобальные навигационные спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС функционируют в собственном системном времени со шкалой UTC. Так системное время GPS соответствует UTC (1980,0). Учитывается движение спутника относительно наземных часов и отличие гравитационного потенциала на высоте орбиты от потенциала на геоиде. Релятивистская поправка для ГЛОНАСС составляет 37,7 мкс в сутки.

С помощью глобальных навигационных спутниковых систем обеспечивается сличение разнесенных атомных часов с точностью 3-5 наносекунд на базах до 3000км и 10-20 наносекунд на более длинных базах, дуплексный метод через каналы связи геостационарных спутников дает точность в 1 наносекунду на глобальных расстояниях, метод РСДБ – от 0,1 наносекунды до 10 наносекунд. Для передачи данных по оптоволоконным линиям со скоростью в десятки и сотни терабит в секунду требуется точность сличения эталонов по времени на уровне 100-10 пикосекунд, по частоте 10^{-15} – 10^{-16} на интервале суток. На расстояниях в тысячи километров такие требования может обеспечить только РСДБ.

2. Радиointерферометрия со сверхдлинными базами.

В 1965 году советские ученые Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашев, Г.Б. Шоломицкий предложили регистрировать данные наблюдений на каждой отдельной антенне интерферометрической системы радиотелескопов и путем последующей централизованной обработки совокупности данных получать высокое разрешение за счет большого расстояния между антеннами. При длине базы 12,2 тыс.км разрешение на волне 3мм достигло теперь $0,8 \cdot 10^{-3}$ угловой секунды, на три порядка выше, чем у крупных оптических телескопов.

Распределенная сеть радиотелескопов охватывает все континенты, включая Антарктиду. Они не закреплены жестко за РСДБ-сетями и используются как автономно, так и в составе систем радиointерферометрии. Европейская сеть VLBI (EVN) объединяет телескопы стран Евросоюза и ассоциированных стран (Германии, Великобритании, Нидерландов, Швеции, Италии, Эстонии, Польши и Латвии), а также Китая, Южной Африки и Пуэрто-Рико. Располагаемая длина базы превышает 8 тыс. км и достигается угловое разрешение в 1mas на сантиметровых длинах волн. Институты, входящие в EVN, располагают 18 антеннами, среди которых несколько крупнейших и наиболее чувствительных телескопов. Годовые сессии VLBI состоят из трех периодов по 3-4 недели с наблюдениями на 3-4 частотах. По завершении каждой программы наблюдений одного и того же источника ее участники передают полученные данные и отчет на сервер EVN в Болонье (Италия). Совместная корреляционная обработка данных, записанных на магнитофонных лентах большой емкости производится в Объединенном европейском институте VLBI (JIVE) на процессоре Мк IV, где обрабатываются все материалы EVN и около половины данных глобальной сети РСДБ. В качестве эксперимента проводится передача данных от телескопов в JIVE по высокоскоростным оптоволоконным линиям для обработки на корреляторе в реальном времени, что позволяет получить доступ к конечным результатам на несколько недель раньше.

В США функционирует входящая в состав Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO) РСДБ-структура из десяти радиотелескопов дистанционно управляемых из центра, расположенного в Сокорро, штат Нью-Мексико. Каждая станция VLBA состоит из 25-метровой параболической антенны и технического здания с компьютером, широкополосными магнитофонами и другим оборудованием, необходимым для наведения антенны и регистрации поступающих радиосигналов. Станции с радиотелескопами расположены на континентальной части США от восточного до западного побережья по долготе и от штата Техас до штата Вашингтон по широте. На Гавайях (Мауна Кеа) и на Виргинских островах (Сейнт Круа). Наибольшая длина базы составляет 8611 км.

В течение каждого рабочего триместра продолжительностью 4 месяца к системе на 100 часов подключаются еще 3 радиотелескопа и расположенная в Сокорро система радиотелескопов VLA (Very Large Array), состоящая из 27 одинаковых 25-метровых антенн, которые образуют интерферометр с изменяемой конфигурацией. Антенны перемещают по железнодорожным путям, имеющим форму буквы Y с длиной плеч 21 км. В зоне радиомолчания NRAO площадью 34 тыс. кв. км вблизи Грин-Бэнк (штат Западная Виргиния) расположен 100-метровый полноповоротный параболический радиотелескоп с полностью автоматизированным управлением (Robert C. Byrd Green Bank Telescope), который можно навести с точностью выше одной тысячной градуса на любую точку на небе. Там же расположены три 26-метровых телескопа, образующие Грин-Бэнк интерферометр. Радиотелескоп в Аресибо на о. Пуэрто-Рико с крупнейшим в мире сферическим зеркалом диаметром 305 м неподвижно лежит в естественном углублении среди гор, он является обсерваторией Национального радио- и ионосферного центра США. Третий из радиотелескопов принадлежит германскому Радиоастрономическому институту Макса Планка и находится в Эффельсберге, он имеет 100-

метровую полноповоротную антенну и работает на длинах волн от 7мм до 90см. Длина базы между ним и телескопом на Гавайях составляет 10328км.

В России создана специализированная постоянно действующая РСДБ-сеть «Квазар – КВО» из трех радиоастрономических обсерваторий – «Светлое» (Приозерский район Ленинградской обл.), Зеленчукская (Карачаево-Черкессия) и «Бадары» (Бурятия). Планирование наблюдений, корреляционная обработка и анализ полученных данных осуществляются в Центре управления, сбора и обработки данных в Санкт-Петербурге. Все обсерватории этой сети имеют полноповоротные радиотелескопы с зеркалом диаметром 32м, оснащенные современными двухканальными криорациометрами с рабочими длинами волн 1,35см, 3,5см, 6,2см, 13см и 18/21см, которые приняты международным РСДБ-сообществом в качестве основных. Система частотно-временной синхронизации состоит из водородных стандартов времени и частоты с нестабильностью $3 \cdot 10^{-15}$ при времени осреднения 1000с, аппаратуры привязки времени по сигналам ГНСС с точностью не хуже 50 наносекунд и аппаратуры контроля и измерения высокостабильных сигналов. Радиоинтерферометрические сигналы регистрируются системами S2, Mark3 и Mark5A/ Mark5B на канадские (128Мбит/с), американские (1Гбит/с) цифровые магнитофоны и магнитные диски (2Гбит/с). Обсерватории «Светлое» и «Зеленчукская» соединены оптико-волоконными линиями с центром корреляционной обработки. Многие международные программы выполняются совместно с радиотелескопами РСДБ Международной сети радиотелескопов для астрометрии и геодезии IVS. В рамках этих программ уточняются небесная и земная системы координат, с высокой точностью определяются параметры вращения Земли, изучаются тектонические движения плит и строятся карты геодезических радиоисточников. При проведении международных программ корреляционная обработка осуществляется на корреляторах в Вашингтоне (Морская обсерватория США), Вестфорде (Массачусетский технологический

институт, Хайстекская обсерватория) и в Бонне (Радиоастрономический институт Макса Планка).

Национальные программы на РСДБ-сети «Квазар-КВО» посвящены определению параметров вращения Земли и синхронизации атомных эталонов времени Среднеквадратичные отклонения значений координат полюса от ряда параметров вращения Земли IERS C04 составляют 0,87 mas, Всемирного времени 0,05 миллисекунды для 24-часовых сессий и 0,12 миллисекунды для 8-часовых сессий. Точность определения разности частот атомных эталонов достигает 10^{-14} - 10^{-15} , точность определения разности показаний атомных шкал времени составляет 30-100 пикосекунд. Точность определения всех перечисленных параметров удовлетворяет требованиям координатно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС. Планируется подсоединить к сети РСДБ радиотелескоп с зеркалом диаметром 70м под Усурийском. В новой конфигурации число формируемых баз сети достигнет шести, максимальная база составит более 6500км, эффективная собирающая поверхность сети «Квазар-КВО» увеличится более чем в 2,5 раза и превысит собирающую поверхность американской VLBA.

Длины баз между обсерваториями сети «Квазар-КВО» и станциями сети IVS достигают 9560км (Гавайи – Светлое), 11413км (Консепсьон – Светлое) и 11583,6км (Консепсьон – Зеленчукская).

В простейшем случае радиоинтерферометр состоит из двух радиотелескопов, разнесенных на сотни или тысячи километров и наблюдающих один и тот же квазар – квазизвездный внегалактический источник шумового радиоизлучения с чрезвычайно широким спектром. Квазары находятся от Земли на расстоянии в десятки и сотни миллионов световых лет, практически в бесконечности, поэтому приходящие от них радиоволны имеют идеально плоский фронт, а поступающие на оба радиотелескопа сигналы приходят по строго параллельным путям. Эти шумовые сигналы совершенно идентичны, но приходят на радиотелескопы с некоторой временной задержкой τ один относительно другого,

обусловленной разностью расстояний ΔS от радиотелескопов до квазара. Линию, соединяющую центры антенн радиотелескопов 1 и 2, называют вектором базы **D**. Он является одним из основных определяемых параметров и может быть выражен через разности одноименных координат точек 1 и 2. Задержка τ зависит от длины D вектора **D** и угла между базой и направлением на квазар.

Эта задержка измеряется корреляционным методом: на обоих радиотелескопах шумовые сигналы записываются на широкополосные магнитофоны. Записи сводят вместе в центре обработки на корреляторе - устройстве, осуществляющем перемножение сигналов и осреднение произведения за большой промежуток времени (который намного больше периода самой низкочастотной составляющей спектра входных сигналов). Это осредненное произведение есть корреляционная функция данных сигналов. Если шумовой сигнал, принятый первым радиотелескопом обозначить $S(t)$, то сигнал, принятый вторым радиотелескопом, будет $S(t+\tau)$, а их корреляционная функция выразится в виде $K = \langle S(t) \cdot S(t+\tau) \rangle$, где угловые скобки обозначают усреднение по времени. Эта корреляционная функция имеет один резко выраженный максимум при $\tau=0$. Следовательно, если при подаче сигналов на коррелятор сдвинуть одну запись относительно другой до получения максимума выходного сигнала, то величина временного сдвига дает искомую задержку τ . Точность измерений тем выше, чем уже максимум корреляционной функции, а он тем острее, чем шире спектр записываемых сигналов, то есть чем меньше их временная когерентность. Именно поэтому в РСДБ наблюдают наиболее широкополосные, шумовые сигналы квазаров.

Из-за вращения Земли, разность хода ΔS , а следовательно и задержка τ , изменяются. Величину, пропорциональную скорости изменения задержки, называют частотой интерференции f , она тоже измеряется. По измеренным величинам τ и f можно получить разность хода ΔS и ее изменения во времени. Величина ΔS является функцией радиус-векторов пунктов 1 и 2 и

направления на квазар. Метод РСДБ позволяет определить длину вектора базы с ошибкой 2-3см и направление на квазар с точностью до 0,001угл. секунды по обеим угловым координатам. Высокая точность определения длины базы дает возможность изучать современное движение земной коры в масштабах планеты.

Записи сигналов на радиотелескопах должны быть привязаны к единой шкале времени, для чего часы на обеих станциях необходимо как можно точнее синхронизировать. Для этого местные стандарты частоты и времени контролируются по высокостабильному атомному эталону – водородному мазеру с относительной нестабильностью $2 \cdot 10^{-14}$ за сутки. Мазер работает в радиодиапазоне на частоте примерно 1,4ГГц ($\lambda=21\text{см}$). Метки времени записываются на магнитофоны вместе с записью разносигналов на обеих станциях РСДБ, и именно по сдвигу временных меток определяют задержку при корреляционной обработке записей.

Таким образом, из наблюдений можно определить компоненты вектора базы с ошибкой 2-3см, две угловые координаты квазара с ошибкой 0,001секунды, две координаты Северного полюса с ошибкой 3-6см, а также параметры прецессии и нутации земной оси, точное время с ошибкой 0,05-0,1 миллисекунды и поправки часов на станциях.

Из сетей РСДБ формируется глобальная геодезическая сеть – система опорных пунктов с известными координатами. Поскольку метод РСДБ дает разности координат, необходимо иметь абсолютные координаты хотя бы одного пункта сети. Для этого обычно используют лазерную локацию искусственных спутников Земли и Луны.

Без поправок, получаемых из РСДБ-наблюдений, погрешность определения долготы в системе ГНСС была бы на порядки больше. В сущности РСДБ играет для GPS и ГЛОНАСС-навигации роль аналогичную роли морского хронометра для судовождения в XVIII веке.

3. Автономные навигационные системы КА.

На многих французских спутниках ДЗЗ используется система DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite Instrument) предназначенная для точного определения положения КА и элементов его орбиты по бортовым доплеровским измерениям скорости полета относительно наземных радиомаяков. Глобальная наземная сеть состоит из 56 радиомаяков размещенных в нескольких десятках стран, более 20 из них используются в других точных навигационных системах, что позволяет проводить взаимную калибровку. Два ведущих радиомаяка, один в Тулузе, другой в Куру (Французская Гвиана) связаны с Центром управления и используются для закладки данных на борт КА. Двухканальный бортовой радиоприемник позволяет проводить фазовые измерения при работе с двумя радиомаяками в зоне видимости и использовать методы дифференциальной навигации для уменьшения погрешностей автономных навигационных определений. Бортовые измерения выполняются каждые 7-10 секунд на опорной частоте 2036,25 МГц (в S-диапазоне), дополнительная частота 401,25 МГц используется для устранения ионосферных задержек радиосигнала. Опорная частота генерируется идентичными сверхстабильными наземными генераторами и бортовым хронизатором. Обработка измерений основана на использовании фильтра Калмана: каждое поступившее измерение включается в обработку в темпе измерений и уточняет вектор состояния предвычисленный вперед на 10с.

Система DORIS устанавливалась на спутниках SPOT 2, SPOT 3, Torex Poseidon, ENVISAT, SPOT 4, SPOT 5. Измерения, записанные на борту и переданные на наземный сегмент, служат для привязки данных ДЗЗ, совершенствования модели внешних сил, действующих на КА и определения плотности электронов в ионосфере. За время эксплуатации системы накоплен архив данных, позволяющих определять фактическое положение наземных радиомаяков и учитывать динамику смещения их координат.

Точность определения положения КА вдоль орбиты составляет 1 см, по радиусу-вектору – 5 см.

На орбитальной станции «Салют – 7» функционировала система «Дельта», которая наряду с автономными навигационными измерениями, определением орбиты и прогнозом движения управляла ориентацией станции, бортовыми системами и научной аппаратурой, обеспечивала расчет навигационной информации, необходимой экипажу, временную и координатную привязку визуальных наблюдений поверхности Земли с использованием оптических визиров для определения географических координат наземных ориентиров вблизи трассы полета по известным элементам орбиты.

Техническая и организационная структура глобальных навигационных спутниковых систем

Глобальные навигационные спутниковые системы занимают особое место в космической инфраструктуре, обеспечивая непрерывный доступ к навигационным услугам потребителям на поверхности Земли, в воздушном и околоземном пространстве. Наиболее широкое распространение в мире получила американская система GPS (Global Positioning System). Российская ГНСС ГЛОНАСС, первый спутник которой был запущен в октябре 1982 г., была полностью развернута до группировки, состоящей из 24 спутников к концу 1995 г., но после этого не поддерживалась, и в 2001 г. в ее составе осталось лишь 6 работоспособных спутников. В 2002 г. началась модернизация системы и ее внедрение в гражданской сфере, в результате к 2009 г. орбитальная группировка была восстановлена (хотя и в ограниченном составе), а наземный комплекс управления и комплекс фундаментального обеспечения вышли на должный функциональный уровень.

Большинство стран, не обладающих ГНСС, пользуются гражданскими навигационными сигналами GPS/ГЛОНАСС, однако стратегическое значение и возрастающая роль глобальной навигации в экономической

жизни, стремление не зависеть от политики государств, могущих исключить прием этих сигналов или заглубить их в определенных районах земного шара в определенные периоды, привело к осознанию необходимости создания собственных ГНСС в Европейском Союзе и Китае.

Потребительские возможности технологии ГНСС продолжают расширяться вместе с ее совершенствованием и наряду с определением местоположения, скорости движения во времени сухопутных, морских и воздушных объектов позволяют решать задачи картографо-геодезического обеспечения строительства, землеустройства, кадастровых работ, трассировки и прокладки трубопроводов и различных коммуникаций, мониторинга деформаций сооружений, дистанционного зондирования суши и Мирового океана, прогноза движения литосферных плит и т.д.

Все ГНСС используют для определения координат навигационной аппаратуры пользователя (НАП) измерения расстояний между ним и навигационными космическими аппаратами (НКА), координаты которых и характеристики изучаемых ими сигналов хорошо известны.

Расстояния между НАП и НКА определяются по времени прохождения излученного радиосигнала, распространяющегося со скоростью света. ГНСС функционируют в собственном системном времени. Системная шкала времени задается наземным комплексом управления (НКУ) и комплексом средств фундаментального обеспечения, где поддерживается с более высокой точностью, чем это позволяют высокостабильные атомные источники частоты и времени на борту НКА. Шкалы времени на борту и на Земле согласованы между собой путем независимой привязки каждой из них к системному времени.

Момент излучения сигнала НКА измеряется по бортовым часам, момент приема сигнала потребителем – по часам навигационного приемника. Так как измерения частоты и времени на НКА и НАП выполняются с разной точностью, то измерения расстояний содержат ошибку, определяемую расхождениями шкал времени. Фактически измеряется не дальность, а

величина, называемая псевдодальностью, равная сумме дальности и погрешности, пропорциональной расхождению шкал времени НАП и навигационного спутника. В штатном режиме применения спутниковой навигации считается, что ошибки, вызванные расхождением шкал времени, одинаковы в псевдодальномерных измерениях для всех НКА и в качестве текущих навигационных параметров используются разности псевдодальностей до четырех НКА, равные разностям истинных дальностей. Каждая разность дальностей образует гиперболическую поверхность положения. Пересечение трех таких поверхностей дает координаты потребителя, кроме того, определяется четвертая неизвестная величина – расхождение шкал времени НАП и НКА, тем самым обеспечивается синхронизация шкалы времени НАП.

При проведении измерений в смешанном составе, например, GPS/ГЛОНАСС, появляется еще одна неизвестная, вызванная расхождением шкал времени двух навигационных систем. В этом случае минимальное число измерений увеличивается до пяти.

Одной из задач НКУ является определение орбит спутников путем измерения расстояний до них от наземных пунктов с известными координатами методами радио - и лазерной локации.

Моменты излучения и приема оптических импульсов при лазерных траекторных измерениях регистрируются одним устройством, поэтому проблема синхронизации часов здесь не возникает. Результаты траекторных измерений дальности и радиальной скорости НКА поступают от контрольно-измерительных станций в баллистический центр для определения и прогноза параметров движения спутников. Корректирующие поправки бортовых часов определяются службой времени, которая, получая сигналы от спутников ГНСС, измеряет разности между бортовыми шкалами времени и системной шкалой и сдвиг фаз радионавигационных сигналов по отношению к фазе центрального синхронизатора (водородного атомного стандарта частоты). По результатам траекторных и временных измерений в центре управления

формируется служебная информация, содержащая эфемериды (координаты и производные координат НКА в определенный момент, называемый временем привязки, и частотно-временные поправки), альманах системы и другие данные, необходимые для формирования навигационного сообщения НКА. Служебная информация ежесуточно передается на борт НКА, чем обеспечивается обновление информации, содержащейся в навигационном сообщении, поступающем с борта НКА потребителям наряду с радионавигационным сигналом.

Навигационное сообщение переданное НКА содержит оперативную информацию, относящуюся к тому НКА, от которого получен навигационный радиосигнал и, кроме того, данные о всех НКА орбитальной группировки, в которую он входит. Оперативная информация подтверждает достоверность навигационных данных, содержит эфемериды НКА и метку времени.

В неоперативной части представлен полный альманах системы: параметры орбит всех НКА (альманах орбит), данные о состоянии каждого из них (альманах состояния), поправки к бортовой шкале времени относительно системной шкалы (альманах фаз), время, к которому относятся данные альманаха, сведения о несущих частотах и поправка к шкале времени системы для перехода к времени страны (UTC), Госэталону координированного всемирного времени. Альманах постоянно обновляется, его время жизни составляет 2-3 месяца, время жизни эфемерид не превышает 4-6 часов.

Навигационное сообщение имеет жесткую структуру и состоит из последовательности строк. В системе ГЛОНАСС длительность строки составляет 2 с, из них 0,3 с в конце строки занимает метка времени в виде псевдослучайной последовательности, состоящей из 30 символов длительностью 10 мс. Основную часть строки (1,7 с) занимает цифровая информация (ЦИ) в виде символов в относительном бидвоичном коде, который формируется путем сложения по модулю 2 символьной частоты ЦИ

50 Гц с меандром символьной частоты 100 Гц. Каждая строка содержит 85 двоичных символов, из которых первые восемь, символы кода Хемминга, являются проверочными, а последний служит начальным для относительного кода. Передача ЦИ осуществляется старшими разрядами вперед. Границы двухсекундных строк, границы символов цифровой информации, символов метки времени и символов меандра когерентны. Задний фронт последнего символа псевдослучайной последовательности метки времени соответствует моменту, отстоящему от начала суток на целое четное количество секунд в шкале времени НКА. В приемнике НАП с помощью меандра осуществляется символьная синхронизация для метки времени и с ее помощью – строчная и символьная синхронизация цифровой информации. Группа из 15 строк объединена в кадр, а пять кадров образуют суперкадр длительностью 2,5 минуты. Погрешность синхронизации границ строк, кадров и суперкадров не превышает 2 мс.

В составе каждого кадра передается вся оперативная информация, относящаяся к данному НКА и часть альманаха системы. Оперативные данные содержатся в первых четырех строках каждого кадра и в его пределах не меняются. В состав оперативных данных входят признаки достоверности цифровой информации в кадре, время начала кадра, эфемеридная информация (координаты и производные координат НКА, излучающего сигнал, в прямоугольной геоцентрической системе координат на момент времени t_0), частотно-временные поправки к несущей частоте навигационного радиосигнала и поправки к бортовой шкале времени на тот же момент t_0 , кратный 30 мин от начала суток.

В первых четырех кадрах суперкадра содержится альманах для пяти, в последнем – для оставшихся четырех НКА штатной группировки. В системе ГЛОНАСС за счет более коротких суперкадров (2,5 мин против 12,5 мин в GPS) альманах обновляется быстрее.

Время, необходимое НАП на определение местоположения после ее включения зависит от того, насколько актуальна информация, содержащаяся

в памяти приемника. Если НАП не обладает данными альманаха, этап захвата и отождествления спутников группировки будет продолжаться, пока эти сведения не поступят полностью и только тогда станет возможным определение координат, скорости и точного времени пользователя.

В системе GPS суперкадр состоит из 25 кадров длительностью 30 с. Каждый кадр состоит из 5 подкадров длительностью 6 секунд. В пределах каждого кадра передается 1/25 альманаха GPS и для сбора полного альманаха нужно принять 25 кадров. Информация об эфемеридах, передаваемая в составе каждого кадра обновляется раз в два часа и содержит одинаковый на это время идентификатор IOD (Issue of Data). Если один из кадров не удалось принять или он был принят со сбоями, можно выделить аналогичный из следующего сообщения, проверить его идентификатор и использовать данные наряду с ранее полученными, что позволяет ускорить время старта приемника. Информация для пользователей распределена между подкадрами следующим образом. Первый содержит данные о частотно-временной поправке, второй и третий – эфемериды спутника, четвертый и пятый – часть альманаха.

НКА каждой из ГНСС излучает сигналы не менее чем на двух несущих частотах, что позволяет при приеме исключить влияние задержки в ионосфере обратно пропорциональное квадрату частоты сигнала.

Основой аппаратуры спутника GPS является опорный генератор базовой частоты $f_0=10,23$ МГц с суточной нестабильностью не хуже 10^{-13} . Он используется для формирования тактовых импульсов и обеспечивает синхронизацию и временную привязку всех процессов. Две несущие частоты L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,60 МГц), кратные базовой, служат для передачи в эфир. Они модулируются измерительными кодовыми последовательностями. Бинарными кодами навигационного сообщения модулируется частота 50 Гц (получаемая из базовой делением на 204 600). Дальномерные коды представлены последовательностью импульсов генерируемой ленточным сдвиговым регистром, содержащим определенное

количество однобитовых ячеек. При подаче на регистр тактового импульса содержимое каждой ячейки перемещается в соседнюю, содержимое последней ячейки регистра служит выходным сигналом. В первую ячейку посылается логическая сумма двух других ячеек, от выбора которых зависит сигнал на выходе. Последовательность такого вида называется псевдощумовой (псевдослучайной) и обозначается аббревиатурой PRN (Pseudorandom Noise Code). Общедоступный код C/A (Clear Access/Coarse Acquisition) формируется с помощью двух 10-битовых сдвиговых регистров, выходные сигналы которых складываются по модулю 2. Частота следования тактовых импульсов составляет 1,023 МГц, период повторения равен 1023 циклам, следовательно, псевдослучайная последовательность повторяется через 1 миллисекунду.

Точный защищенный код P (Protected/Precise) формируется сложнее – как комбинация двух последовательностей, каждая из которых является результатом логического суммирования выходных сигналов двух сдвиговых регистров. При частоте следования тактовых импульсов 10,23 МГц такая последовательность повторяется через 266,4 суток. Каждому спутнику предназначен свой недельный отрезок последовательности. Недельный цикл стартует в 0 часов всемирного времени по воскресеньям. Сложность алгоритма обеспечивает высокую защищенность кода P, тем не менее при переходе в режим AS (Anti-Spoofing) он заменяется зашифрованным Y-кодом. Обе несущие частоты L1 и L2 модулируются точным P-кодом. Общедоступный C/A код передается на частоте L1 (на модернизированных спутниках 2R-M и на частоте L2) с фазовым сдвигом 90° по отношению к P-коду, чтобы их можно было различать. Фаза синусоидального сигнала несущей управляется кодами битовой последовательности так, что при изменении состояния кодового сигнала с 0 на 1 или наоборот фаза скачком изменяется на 180° . Информация навигационного сообщения передается на обеих несущих частотах.

У каждого из спутников GPS своя кодовая последовательность, что позволяет отождествлять спутники по их сигналам. Внутренняя шкала времени приемника поддерживается кварцевым генератором с относительной стабильностью частоты порядка 10^{-7} . Опорный генератор связан с синтезатором, формирующим сетку опорных сигналов. Путем перебора опорных сигналов и сравнения каждого из них с принятой кодовой последовательностью, перемножая в корреляторе сигналы и получая на выходе последовательность коэффициентов корреляции на интервале усреднения 1-2 мс, сортируют принятые сигналы по принадлежности конкретному спутнику. Варьируя временную задержку, определяют такое ее значение, при котором корреляция максимальна. Именно оно соответствует временному сдвигу между кодовой последовательностью данного спутника и ее репликой в сетке опорных сигналов, и поэтому может служить для вычисления псевдодальности. Для устранения неопределенности в целое число тактов периода повторения характерного рисунка кодовой последовательности (для кода C/A это 1023 тактовых импульса, укладываемых в 1 мс, т.е. 300 км в пересчете на дальность) используются метки времени, привязанные к тактовым импульсам навигационного сообщения.

Доплеровские смещения несущей частоты могут достигать нескольких кГц в зависимости от положения и скорости спутника на момент приема его сигнала. В приемнике производится автоподстройка частоты и фазы для коррекции опорных сигналов и получения реплики, соответствующей принятому сигналу спутника, обращающегося по орбите, оскулирующие элементы которой известны из навигационного сообщения.

В геодезических приемниках измеряется и фазовое смещение самой несущей частоты по отношению к опорному сигналу. Периоды на частотах L1 и L2 короче тактовых последовательностей в 154 и в 120 раз соответственно, поэтому точность определения псевдодальностей существенно улучшается. Измерения позволяют получить дробную часть

цикла в фазовом смещении при неопределенности в целое число длин волн, но она устраняется в ходе последующей обработки наблюдений на нескольких пунктах региональной сети.

На аппарате GPS – 2F, следующем этапе модернизации, должен появиться третий гражданский сигнал с двумя кодами на новой частоте L5, равной 1176,45 МГц, что позволит улучшить разрешение фазовых неопределенностей и уменьшить искажения, выносимые земной ионосферой. Вследствие этого увеличится точность определения координат и допустимое расстояние между базовым и полевым приемником.

Обработка кодовых измерений позволяет определить координаты с погрешностью порядка одного градуса фазы сигнала – 0,3% периода следования кодовых импульсов. Для C/A кода такая погрешность соответствует трем наносекундам, для P – кода она в десять раз меньше и в пересчете на дальность составляет 1 м и 0,1 м соответственно. Однако, распространение сигнала в среде вносит другие погрешности. Свободные электроны и ионы в ионосфере существенно влияют на прохождение радиоволны. Задержки, вызванные ионосферной рефракцией, зависят от времени года, варьируют от дня к ночи и связаны с солнечной активностью. Погрешность в определении псевдодальности при этом может изменяться в пределах от 1 до 20 м, если спутник наблюдается высоко над горизонтом, если же он близок к горизонту, она может составить и 100 м. Ошибка в определении псевдодальности пропорциональна концентрации электронов вдоль пути распространения радиосигнала и обратно пропорциональна квадрату его частоты. При использовании двухчастотных приемников влияние ионосферы легко исключить. Если же псевдодальность определяется по коду на одной несущей частоте, то ионосферная поправка вносится исходя из текущих параметров модели ионосферы, которые ежедневно определяет ведущая станция управления GPS и вносит в навигационные сообщения спутников. Двухчастотная коррекция позволяет уменьшить задержки до

единиц наносекунд, обновление параметров модели – до нескольких десятков наносекунд.

Путь луча в тропосфере зависит от коэффициента преломления вдоль него, т.е. полей температуры, давления и влажности воздуха. В GPS измерениях используют две модели тропосферных задержек – модель Хопфилда и модель Саастаймонена, различающиеся предположениями о характере зависимости метеопараметров от высоты. В среднем тропосферная поправка по кратчайшему пути через тропосферу (спутник в зените) составляет 2,3 м, при наблюдениях низкогоризонтных спутников может достигать 10 м. В электрически нейтральной тропосфере рефракция не зависит от частоты и одинакова для кодовых и фазовых измерений. Если проводить систематические наблюдения спутников при разной их высоте над горизонтом, то тропосферную поправку можно вычислить, обрабатывая методом наименьших квадратов совокупную систему уравнений с параметрами моделей. Обеспечение данными о поправках входит в задачи управляющего сегмента GPS.

В результате отражений радиосигнала в зоне приема от зданий, деревьев, элементов ландшафта на антенну приемника наряду с волной, прошедшей по прямому пути, падают волны, прошедшие по другим путям. Величина погрешности суммарного сигнала в неблагоприятных условиях приема может составить более 50 м при кодовых измерениях. Фазовые измерения позволяют уменьшить эту погрешность до 5-10 см при длине волны несущей около 20 см. С влиянием многопутности борются защитными мерами, т.к. оно не поддается моделированию.

Если необходима субсантиметровая точность, приходится учитывать релятивистские эффекты. Отклонение радиолуча в гравитационном поле Земли изменяет его пространственно-временные характеристики и вызывает увеличение дальности приблизительно на 19 мм. Различие в гравитационном потенциале на поверхности Земли и на высоте орбиты спутника приводит к относительному смещению частот базовых генераторов. Поэтому для

частоты базового генератора спутника вместо ее значения 10,23 МГц выбрана величина 10,22999999545 МГц.

Наибольшая точность определения координат средствами ГНСС достигается путем использования дифференциальных методов и фазовых измерений. Дифференциальные методы основаны на сравнении двух рядов измерений, полученных приемниками, координаты одного из которых, опорного, заведомо точны. Это позволяет исключить влияние погрешностей одинаково искажающих ряды измерений. Опорные станции проводят измерения псевдодальностей до многих спутников, вычисляют погрешности и их производные по времени. С каждой поправкой потребителю передается младшая часть значения часов спутника, в результате, располагая поправками для совокупности спутников с привязкой ко времени, можно выбрать оптимальное в данных условиях наблюдения рабочее созвездие (конфигурацию НКА). Чем ближе пользователь к опорной станции, тем лучше работают полученные им поправки.

Фазовые измерения, обработанные на опорном пункте, позволяют разрешить фазовые неоднозначности и инициализировать приемник пользователя с установкой состояния счетчика целых циклов. В радиусе до 10 км от опорного пункта измерения в реальном времени подвижным приемником имеют среднеквадратичную погрешность координат 2-3 см.

В отличие от GPS, где принят кодовый способ разделения сигналов, спутники ГЛОНАСС различаются несущими частотами навигационных радиосигналов. В диапазоне L1 (1598,0625 – 1605,375) МГц несущая частота НКА с выделенным ему номером n равна $1602 \text{ МГц} + n \cdot 562,5 \text{ кГц}$, в диапазоне L2 $1246 + n \cdot 437,5 \text{ кГц}$. Отношение рабочих частот L2 к L1 составляет $7/9$. Радиосигналы на обеих частотах формируются когерентно от эталона частоты с номинальным значением 5,0 МГц (с точки зрения наблюдателя на Земле). На борту для компенсации релятивистских эффектов введена поправка на величину $\Delta f = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$. Взаимноантиподные спутники в орбитальных плоскостях могут иметь одинаковые несущие частоты,

поскольку земные наблюдатели в своей зоне радиовидимости не наблюдают их одновременно. На низкоорбитальных КА наблюдения взаимноантиподных спутников возможны, однако их сигналы будут надежно разделены по признаку положения относительно местного горизонта (выше, ниже) и/или путем доплеровской селекции. В сеансе навигации НАП поиск несущей частоты каждого радиосигнала ведется в пределах узкой полосы ≈ 1 кГц около прогнозируемого значения с учетом доплеровского сдвига, составляющего ± 5 кГц для приземных пользователей и до ± 40 кГц на низкоорбитальных КА. Таким образом, для 24 НКА штатной группировки необходимо иметь как минимум 12 пар несущих частот. На практике передатчики НКА могут излучать навигационные радиосигналы на любой паре несущих частот с номером от -7 до +6, включая 0.

Навигационный радиосигнал диапазона L1 – двухкомпонентный. На заданной несущей частоте формируются два одинаковых по мощности шумоподобных фазоманипулированных радиосигнала, излучаемых со сдвигом фазы на 90° . Один из них, узкополосный со стандартной точностью, предназначен для гражданских потребителей, как сигнал C/A GPS. Широкополосный сигнал высокой точности адресован санкционированным потребителям.

Модулирующая последовательность, используемая для формирования сигналов стандартной точности в диапазонах L1 и L2, образуется сложением по модулю 2 трех двоичных сигналов: псевдослучайной последовательности дальномерного кода, передаваемой со скоростью 511 кбит/с; сигналов цифровой информации навигационного сообщения, передаваемых со скоростью 50 бит/с и меандрового колебания, передаваемого со скоростью 100 бит/с. Псевдослучайный дальномерный код с периодом повторения 1 мс снимается с 7-го разряда 9-ти разрядного регистра сдвига. Методы формирования узкополосных и широкополосных сигналов в GPS и ГЛОНАСС сходны.

Навигационные данные передаются путем инвертирования псевдослучайных последовательностей обоих сигналов. Поскольку частоты инвертирования псевдослучайной последовательности много меньше ее тактовой частоты, то ширина основного «лепестка» огибающей спектра мощности фазоманипулированного навигационного радиосигнала равна удвоенной тактовой частоте псевдослучайной последовательности. Следовательно, ширина основного «лепестка» огибающей спектра мощности узкополосного навигационного радиосигнала равна 1,022 МГц, широкополосного – 10,22 МГц. Номинал тактовой частоты в GPS вдвое выше.

Опыт эксплуатации ГЛОНАСС показал, что концепция доступа с частотным мультиплексированием по сравнению с множественным доступом при кодовом разделении каналов привела к усложнению НАП (сложный синтезатор, множественные входные модули, антенны). Фазовые центры антенн должны быть калиброваны и определены с точностью до 1 мм.

В конце 2005 г. в первый раз на орбиту были выведены два модернизированных спутника «Глонасс-М» (вместе с одним стандартным аппаратом). Первый «Глонасс-М» был изготовлен и запущен в 2003 г. и введен в состав системы 12 декабря 2004 г. Термостабилизированный бортовой стандарт частоты спутников этого типа характеризуется суточной нестабильностью на уровне не хуже $1 \cdot 10^{-13}$ против $5 \cdot 10^{-13}$ у КА «Глонасс», взаимная синхронизация бортовых шкал времени повышена с 20 до 8 нс, гарантированный срок активного существования увеличен до 7 лет. Сигналы с кодом стандартной точности передаются не только в диапазоне L1, но и в L2. В США вторая навигационная частота для гражданских пользователей используется на модернизированных аппаратах GPS Block 2R-M, первый из них вышел на орбиту 25 сентября 2005 г. Разрабатывается КА «Глонасс-К», на котором сигналы с кодом стандартной точности будут передаваться также в поддиапазоне L3. Они будут содержать информацию о целостности радионавигационного поля и глобальные дифференциальные поправки к

эфемеридам и бортовым шкалам времени, что обеспечит точность навигации 1 м (региональной – 5 см) в реальном времени для мобильных потребителей. Спутники этого класса создаются на базе платформ «Экспресс-1000» в негерметичном исполнении, масса КА составит 850 кг (против 1415 кг у КА двух предшествующих типов), а срок активного существования будет увеличен до 10 лет.

Орбитальная группировка НКА ГЛОНАСС в штатной конфигурации состоит из 24-х спутников, размещенных в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе восходящего узла на 120° . В каждой плоскости находится по 8 КА с равномерным сдвигом между соседними на 45° по аргументу широты. НКА из разных плоскостей сдвинуты относительно друг друга по аргументу широты на 15° . Предполагалось разместить спутники на синхронных 12-ти часовых круговых орбитах с высотой 20 000 км, что позволило бы обеспечить оптимальное соотношение между числом НКА в системе и условиями радиовидимости. Однако прецессия таких орбит под влиянием несферичности Земли приводит к нестабильности видимого положения НКА. Поэтому были выбраны круговые орбиты высотой 19 130 км, наклоном $64,8^\circ$ и драконическим периодом обращения 11 час. 15 мин. 4 с. Средняя скорость прецессии орбитальных плоскостей составляет – $0,5921 \cdot 10^{-3}$ рад/сут. Орбитальным плоскостям присвоены номера 1, 2 и 3. Возрастание порядкового номера орбитальной плоскости следует в направлении вращения Земли. Интервал повторяемости трасс НКА составляет 17 витков (7 суток 23 часа 27 минут 28 секунд).

Спутники орбитальной группировки GPS размещены в шести орбитальных плоскостях (от А до F), восходящие узлы которых разнесены на 60° . Период обращения НКА на орбитах с наклоном 55° и высотой над поверхностью Земли 20 180 км составляет половину звездных суток (11 часов 58 минут), поэтому наблюдаемая в данном месте Земли совокупность («созвездие») повторяется каждый раз на 4 мин раньше, чем накануне. В любой точке Земли, кроме высоких широт, всегда можно наблюдать выше

15° над горизонтом от 4 до 8 спутников GPS. По оценке экспертов Бюджетно-контрольного управления (Government Accountability Office) вероятность того, что в 2010 г. на орбите останутся все 24 работающих аппарата составляет 95%, к 2014 году она понизится до 80%.

Орбитальная группировка российской ГНСС в отличие от GPS регулярно пополняется аппаратами «Глонасс-М» и предполагается развернуть ее полностью в 2010 г. Однако модернизация наземного комплекса управления, комплекса эфемеридно-временного обеспечения, создание функциональных дополнений системы, разработка и производство различных вариантов НАП отстают от темпов развертывания орбитальной группировки. Складывающийся дисбаланс космического и наземного сегментов обеих ГНСС обусловлен отсутствием, как в России, так и в США, единого центра, координирующего организацию работ и управление ГНСС в целом.

С вводом в эксплуатацию европейской ГНСС Galileo в составе 30 спутников, размещенных в трех плоскостях, пользователи, имеющие комбинированные приемники, предназначенные для обработки сигналов трех ГНСС, будут обладать возможностью одновременно наблюдать более 30 НКА.

Для расчета бортовых эфемерид и для эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС используется система координат ПЗ-90.02, система взаимосогласованных геодезических параметров, таких как фундаментальные постоянные, параметры референц-эллипсоида, параметры гравитационного поля Земли. Геодезическая система ПЗ-90.02 реализована сетью опорных пунктов космической геодезической сети. Связь с пунктами Международной наземной опорной сети ITRF 2000 осуществляется через смещение начала координат ПЗ-90.02 по осям X,Y,Z на -0,36 м, +0,08 м и +0,18 м соответственно. Передаваемые каждым НКА системы ГЛОНАСС бортовые эфемериды описывают положение фазового центра передающей

антенны данного НКА в геоцентрической пространственной системе координат, определяемой следующим образом:

- начало координат совмещено с центром масс Земли, включая массы океанов и атмосферы, задаваемым моделью гравитационного поля Земли;

- ось Z направлена на условный Северный полюс Земли, как определено IERS;

- ось X направлена в точку пересечения плоскости экватора и начального (нулевого) меридиана, установленного Международным бюро времени (Bureau International de l'Heure);

- ось Y дополняет геоцентрическую прямоугольную пространственную систему координат до правой;

- центр эллипсоида совмещен с началом геоцентрической прямоугольной пространственной системы координат, большая полуось $a=6\,378\,136$ м, полярное сжатие $f=1/298,257\,839\,303$;

- ось вращения эллипсоида совмещена с осью Z геоцентрической прямоугольной пространственной системы координат и совпадает с направлением на Международное условное начало положения полюсов Земли (Conventional International Origin for the Polar Motion).

Геодезическая широта B точки M определяется как угол между нормалью к поверхности эллипсоида в точке M и плоскостью экватора.

Геодезическая долгота L точки M определяется как двугранный угол между плоскостью начального (нулевого) меридиана и плоскостью меридиана, проходящего через точку M . Положительное направление счета долготы – от начального (нулевого) меридиана к востоку, от 0 до 360 градусов. Широта отсчитывается в обе стороны от экватора (к северу – северная или положительная, к югу – южная или отрицательная), от 0 до 90 градусов.

Геодезическая высота H точки M определяется как расстояние по нормали от поверхности эллипсоида до точки M .

Переход на ПЗ – 90.02 позволил сократить расхождение между передаваемыми в навигационном сообщении НКА параметрами орбит и определенными апостериорно в системе ITRF – 2000 с 30-35 м до примерно 5 м. Система ITRF – 2000 практически эквивалентна современной версии системы координат WGS – 84, используемой в GPS: определяемые в них координаты наземных пунктов отличаются менее чем на 10 см.

В качестве шкалы системного времени ГЛОНАСС принята условная непрерывная шкала времени, формируемая на основе шкалы времени Центрального синхронизатора системы, оснащенного водородными стандартами частоты с суточной нестабильностью $2 \cdot 10^{-15}$.

Опорной шкалой времени для системы ГЛОНАСС является национальная координированная шкала времени России UTC (SU). Расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и UTC (SU) не должно превышать 1 мс. Поправки к шкале системного времени 1-2 раза в сутки закладываются на борт каждого НКА. Погрешность сверки шкалы времени НКА со шкалой времени Центрального синхронизатора не превышает 10нс на момент проведения измерений.

Основные характеристики систем ГЛОНАСС и GPS приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3.

Основные характеристики систем ГЛОНАСС и GPS

Параметр, способ	ГЛОНАСС	GPS
Число НКА (резерв)	24(3)	24(3)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число НКА в орбитальной плоскости	8	4
Тип орбиты	Круговая ($e = 0 \pm 0,01$)	Круговая
Высота орбиты, км	19 120	20 180
Наклонение орбиты, град	$64,8 \pm 0,3$	55
Драконический период обращения	11 час 15 мин 44с ± 5 с	11 час 56 мин 54 с
Способ разделения сигналов НКА	Частотный FDMA	Кодовый CDMA
Несущая частота, МГц:		
L1	1598,0625 – 1604,25	1575,42
L2	7/9 L1	60/77 L1
Период повторения псевдошумовой последовательности дальномерного кода или его сегмента	1 мс	1 мс (C/A код) 7 дней (P – код)

Тактовая частота псевдошумовой последовательности, МГц	0,511	1,023 (C/A код) 10,23 (P – код)
Уровень внутрисистемных помех, дБ	-48	-21,6
Структура навигационного сообщения:		
скорость передачи, бит/с	50	50
вид модуляции	BPSK (Манчестер)	BPSC NRZ
длительность суперкадра, мин	2,5 (5 кадров)	12,5 (25 кадров)
длительность кадра, с	30 (15 строк)	30 (5 строк)
длительность строки, с	2	6
система координат	ПЗ – 90.02	WGC – 84
эталонное время	UTC (SU)	UTC (NO)
представление эфемерид	Геоцентрические координаты и их производные	Модифицированные кеплеровы элементы

Потребительские характеристики ГНСС, - доступность, точность и надежность местоопределения, зависят от многих обстоятельств. Реальная точность меняется в зависимости от места и времени наблюдения навигационных спутников, зависит от располагаемых средств и способов приема, будь то одно- или двухчастотный приемник, автономный или дифференциальный режим, обработка данных в реальном времени или постобработка.

Геометрический фактор потери точности минимален, если один из НКА находится в зените, а три других расположены вблизи горизонта и равномерно разнесены по азимуту. Ошибка определения в вертикальном направлении больше, чем в горизонтальной плоскости, поскольку все наблюдаемые спутники обычно находятся выше приемника. Такое неравенство точностей усугубляется в высоких широтах, потому что оттуда видно меньше высоких спутников. При наклонении орбит спутников GPS около 55° невозможно наблюдать НКА в зените с широты севернее или южнее 55°. Спутники ГЛОНАСС с наклонением орбит 64,8° в этом

отношении предпочтительнее. Точность определения местоположения уменьшается, если НАП получает сигналы из ограниченной области небосвода из-за препятствий (сильно залесенная местность, горная долина и т.д.). Возможность слежения за большим количеством спутников и применение совмещенных приемников GPS/ГЛОНАСС способствует повышению точности в любых условиях места и времени наблюдений.

Одним из основных факторов, от которых зависит точность определения координат потребителя, является качество эфемеридно-временной информации (ЭВИ), принимаемой НАП в составе навигационного сообщения. Повышение точности ЭВИ достигается путем совершенствования НКУ ГЛОНАСС, бортовой аппаратуры НКА, методов и технологии определения эфемерид и частотно-временных поправок.

Перспективным направлением развития наземного комплекса управления ГЛОНАСС является создание сети беззапросных измерительных систем, позволяющих непрерывно проводить высокоточные измерения по всем НКА, находящимся в зоне радиовидимости. Развертывание сети беззапросных средств измерений в составе НКУ позволит повысить точность расчета эфемерид и определение частотно-временных поправок путем совместной обработки кодовых и фазовых измерений и совершенствования методов определения орбит НКА. Технологии эфемеридно-временного обеспечения основаны на использовании ряда математических моделей. Баллистические модели позволяют прогнозировать оскулирующие элементы орбит с учетом гравитационных сил и сил светового давления, приложенных к поверхности НКА. Модель гравитационного поля Земли учитывает вековое изменение коэффициентов ГПЗ, изменения нормального поля под влиянием притяжения Луны и Солнца, приливные вариации. Геодезическая модель вариаций координат измерительного пункта учитывает тектонику плит земной коры, приливные смещения, атмосферную нагрузку и снятие упругих деформаций (постледниковую отдачу). Геодинамическое обеспечение, определение параметров вращения Земли, основано на совместной обработке

данных сетей беззапросных систем и на непосредственной обработке краткосрочных оперативных РСДБ-сессий. РСДБ-технология позволяет измерять все параметры ориентации как небесной, так и земной систем отсчета и уникальным образом определять Всемирное время.

Моделируемые физические процессы описываются медленно меняющимися параметрами, значения которых при решении задач ЭВО известны приближенно. Погрешности оценок параметров математических моделей приводят к неточностям в расчетах эфемерид и частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени НКА и их прогнозируемых значений на интервалах времени между технологическими циклами ЭВО. Для повышения точности навигационного поля производится согласование параметров математических моделей и оценивание совокупности их погрешностей путем апостериорного анализа. В системе GPS высокоточные средства наземной поддержки представлены глобальной сетью станций, равномерно размещенных в экваториальных широтах. Региональная сеть из 8-9 беззапросных станций на территории России не может охватить непрерывными наблюдениями все НКА группировки.

Обеспечить глобальность измерений призвана создаваемая в НИИ прецизионного приборостроения межспутниковая лазерная навигационно-связная система, основными функциями которой являются измерение расстояний между НКА с сантиметровой точностью, передача измерительной информации между ними, синхронизация бортовых шкал времени с наносекундной точностью, калибровка радиотехнической навигационной аппаратуры. Межспутниковые измерения дальности основаны на измерении временных интервалов между лазерными импульсами с передачей информации методом относительной времяимпульсной модуляции. Каждым лазерным импульсом может передаваться 18-27 информационных бит. В подсистеме взаимного наведения и сопровождения по угловым координатам предполагается использовать корреляционную обработку наблюдений звездного поля и

автосопровождение лазерных маяков. Если при этом измерять дальность с погрешностью не более 10 см и определять относительный сдвиг бортовых шкал времени двух НКА с погрешностью не превышающей 1 нс, радиальную составляющую координаты НКА можно будет оценивать с ошибкой 0,2-0,4 м, а продольную компоненту с ошибкой 1м, в несколько раз точнее, чем в системе GPS.

Среди гражданских приложений данных ГНСС наибольшие требования к точности определения координат постоянных или временных пунктов на местности предъявляются в геодезии.

Точные геодезические приемники отличаются тем, что в них измеряются и фазовые смещения самой несущей частоты по отношению к опорному сигналу. Периоды несущих частот L1 и L2 GPS короче тактовых периодов кодовых последовательностей в 154 и 120 раз соответственно, поэтому точность определения псевдодальностей существенно улучшается. Измеряемая фаза несущей между НКА и фазовым центром антенны НАП состоит из целого числа циклов и дробной части. Измерения позволяют получить дробную часть цикла в фазовом смещении, а затем отслеживать ее изменения. Неопределенность в целое число длин волн устраняется в ходе последующей совместной обработки на нескольких пунктах региональной сети опорных станций ГНСС.

Для получения координат с сантиметровой точностью непосредственно во время проведения полевых измерений используется технология RKT (кинематика в реальном времени), основанная на фазовых измерениях и сравнении двух рядов измерений, полученных приемниками, координаты одного из них, опорного, заведомо точны. Данные с опорной станции поступают в вычислительное устройство НАП по радиоканалу. В режиме RTK «возраст» поправок не должен превышать 0,5-0,2 с, поэтому скорость передачи данных может состоять от 2400 бит/с до 19200 бит/с. В Северной Америке для производства работ в реальном времени лицензированы полосы частот от 150 до 174 МГц в УКВ диапазоне и 450-470

МГц в УВЧ диапазоне. Точность местоопределения зависит от удаления от опорной станции, а радиосредства обладают ограниченным радиусом действия. Если, например, передающая антенна имеет высоту 30 м, а принимающая 2 м, то максимальная расчетная дальность распространения радиосигнала составляет 28 км.

Самой известной службой, осуществляющей дифференциальную навигацию в реальном времени, располагает Береговая охрана США. В ее составе имеется сеть башен, принимающих сигналы GPS и предлагающих дифференциальные поправки, используя всенаправленные передатчики маяков. Чтобы получать эти данные пользователь в дополнение к аппаратуре GPS должен иметь специальный приемник с антенной, настроенный на волну маяка. Никакого дополнительного оборудования не требуется для использования данных систем WAAS (Wide Area Augmentation System), которая поддерживается Федеральной администрацией авиации США. В начале эксплуатации система состояла из 25 наземных базовых станций с точно известными координатами, распределенных по территории США, которые отслеживают сигналы спутников GPS. Две ведущие станции, одна на Западном, другая на Восточном побережье, собирают данные станций и формируют комбинированные корректирующие сообщения в соответствии со спецификой их местоположения. Сообщение транслируется одним из двух геостационарных спутников, обслуживающих соответствующую территорию. Приемник пользователя WAAS имеет доступ к этим сигналам и определяет, какие поправки к псевдодальности соответствуют его местоположению. Безопасность полетов существенно повышается, если пилоту известны точные координаты самолета. WAAS увеличивает точность навигации до одного-двух метров по горизонтали и до двух-трех по вертикали в реальном времени на всей территории страны. Кроме того, WAAS контролирует целостность навигационного поля путем проверки качества метрологической достоверности дальномерных сигналов и навигационных сообщений. Прием сигналов WAAS пользователями на

открытой местности, воздушными и морскими судами осуществляется беспрепятственно, но, поскольку геостационарные спутники расположены на экваториальных орбитах, прием ретранслируемых ими сигналов затруднен в гористой или лесистой местности, когда горизонт заслонен. Уровень приемлемости ошибки зависит от типа и места проведения работ. Безопасное управление судами в открытом океане требует километровой точности, тогда как при работах в прибрежных водах необходима точность 2-5 м.

Другим функциональным дополнением GPS является сеть из тысяч непрерывно работающих базовых станций Национальной геодезической службы США. Общегосударственная CORS (Continuously Operating Reference Stations) имеет 800 сайтов, отображающих в Интернете навигационную информацию, которая используется для дифференциальной коррекции в режиме постобработки. Кроме национальной сети работает «кооперативная CORS», состоящая из дополнительных базовых станций GPS, обслуживаемых разными агентствами и организациями, заключившими соглашения о некоторых стандартах сбора и распространения данных.

Наряду с WAAS, спутниковой по типу передачи данных, работают аналогичные службы в Японии – MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System), обслуживающая Азию, европейская EGNOS (European Geostationary Navigation Service), индийская GAGAN. К этой группе функциональных дополнений относятся коммерческие системы, такие как StarFire, принадлежащая американской корпорации John Deere и Starfix DGPS немецкой компании Fugro NV.

С развитием технологии RTK получили широкое распространение кластеры и сети опорных станций, обслуживающие высокоточными спутниковыми данными топографо-геодезическую работу, строительство, кадастровые службы, сельское хозяйство. Сети RTK состоят из опорных станций, размещенных на определенной территории. Измерительные данные, собираемые всеми опорными станциями, посылаются на центральный сервер, который их обрабатывает и формирует для абонентов сети

дифференциальные поправки к псевдодальностям. Сети RTK используют специальное программное обеспечение, например, SpiderNet или TopNet, позволяющие значительно уменьшить ошибку, связанную с удаленностью НАП от базовой станции. Программное обеспечение типа VRS (RTKNet) позволяет создать виртуальную базовую станцию, расположенную в непосредственной близости от перемещающегося потребителя, позволяя ему принимать RTK-поправки от нее как от реальной базовой станции.

Кластеры опорных станций RTK отличаются тем, что не имеют центрального сервера, и при перемещении пользователя в пределах охваченной кластером ограниченной территории он самостоятельно выбирает ближайшую станцию. С удалением НАП от используемой опорной станции точностные характеристики RTK-поправок ухудшаются. Кластеры RTK распространены на рынке сельскохозяйственных применений, в точном земледелии. Стоимость услуг RTK-кластеров существенно ниже, чем сетей, поскольку разворачивание и эксплуатация сети по сравнению с кластером гораздо сложнее.

Технология RTK дает значительный выигрыш в производительности топографо-геодезических работ, в строительстве и в других приложениях. Так после внедрения геодезической компанией Travis Pruitt (шт. Джорджия, США) VRS-сети из 10 базовых станций, охватившей территорию около 25 тысяч кв. км, производительность труда в ней выросла более чем на 50%. Отдельные страны, например Хорватия и Турция, внедряют RTK-сети национального масштаба.

В России развертыванием инфраструктуры ГЛОНАСС/GPS от установки одиночной базовой станции до создания сетей VRS с региональным охватом занимается компания НАВГЕОКОМ. В Оренбургской области для компании ОАО «ТНК-ВР» установлено 8 постоянно действующих станций с поддержкой VRS-технологии, на территории Российской Федерации действует более 20 базовых станций, обслуживающих различные организации.

Научные приложения ГНСС относятся главным образом к геодинамическим и геофизическим исследованиям. Камчатская региональная сеть GPS с двухчастотными приемниками, действующая с 1996 г. включает 9 пунктов непрерывных наблюдений. Станция PETR (Петропавловск-Камчатский) в ее составе включена в систему IGS (International GPS Service Geodynamics), и относительно нее вычисляются смещения остальных пунктов. В районе Камчатки находятся высокосейсмичные области субдукции тихоокеанской и североамериканской литосфер под окраину Евразии. Данные непрерывных наблюдений используются для определения направлений и скоростей движения станций. По результатам GPS-измерений на Сихоте-Алинском профиле в Приморье получены оценки левостороннего смещения по Центрально-Сихотэалинскому разлому ($1,5 \pm 0,5$ мм в год). Определены координаты полюса вращения Амурской плиты и скорость ее вращения.

GPS-просвечивание ионосферы позволяет исследовать акустические возмущения (ударно-акустические волны), связанные с сейсмичностью.

IGS располагает более чем тремястами станциями, размещенными на всех континентах и ряде островов. Работа в режиме реального времени не является для IGS приоритетной, основная задача – достижение максимальной точности. Данные постобработки, получаемые с задержкой в 13 суток, используются для вычисления параметров вращения Земли, уточнения модели геоида, геоцентрической системы координат.