

УДК 006.91.528.063.1

ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

О.В. Денисенко

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область,
email: denisenko@vniiftri.ru

В работе рассмотрены вопросы уточнения Государственной геоцентрической системы координат на основе совершенствования средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС. Показано текущее состояние разработки комплекса программно-аппаратных средств, создаваемого для оценки и уточнения Государственной геоцентрической системы координат, планетарной модели гравитационного поля Земли и цифровой модели квазигеоида.

Ключевые слова: комплекс средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС, Государственная геоцентрическая система координат, фундаментальные астрономо-геодезические параметры, сеть высокоточных полигонов.

Основной целью Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 гг.» (ФЦП), утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2012 г. № 189, является расширение внедрения отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг с использованием системы ГЛОНАСС в интересах специальных и гражданских потребителей за счет поддержания и развития системы ГЛОНАСС. Основными задачами выполняемых по ФЦП работ являются поддержание системы ГЛОНАСС с гарантированными характеристиками навигационного поля на конкурентоспособном уровне и развитие системы ГЛОНАСС в направлении улучшения ее тактико-технических характеристик. При этом одной из основных совершенствуемых составных частей системы ГЛОНАСС, без развития которой невозможно выполнение требований к системе в целом, является комплекс средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС.

Комплекс средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС включает в себя средства формирования национальной шкалы времени UTC(SU), средства определения и прогнозирования параметров вращения Земли и средства уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров (ФАГП), в том числе – Государственной геоцентрической системы координат (ГГСК). При этом и для существующих и для перспективных систем координат необходимо обеспечить оценку и надлежащий контроль декларируемой точности. На решение задачи развития данной составляющей комплекса уточнения ФАГП направлено выполнение работы по созданию аппаратно-программного комплекса уточнения Государственной геоцентрической системы координат.

Альманах современной метрологии, 2015, №3

Для достижения заданной в работе цели совершенствуются методы обработки измерительной информации, полученной от навигационных, геодезических и других космических систем, наземных астрономо-геодезических и гравиметрических данных, а также повышается точность проведения первичных измерений.

Задачи работы:

сбор, анализ, систематизация и хранение исходной измерительной информации для обеспечения расчетов ГГСК, планетарной модели гравитационного поля Земли и цифровой модели квазигеоида, а также проведение в случае необходимости дополнительных исходных измерений;

расчет и оценка точности ГГСК, расчет параметров матрицы перехода из ГГСК в другие системы координат;

расчет и оценка точности планетарной модели гравитационного поля Земли с учетом временных изменений параметров;

расчет и оценка точности цифровой модели квазигеоида.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат» установлены:

геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) - для использования при осуществлении геодезических и картографических работ;

общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) - для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

Под пунктами ГГСК понимается совокупность пунктов ПЗ-90.11, ГСК-2011, а также дополнительных пунктов, для которых заданы координаты в единой системе координат.

Программа расчета и оценки точности уточненной версии ГГСК должна обеспечивать решение следующих задач:

расчет параметров ГГСК уточненной версии и параметров её связи с Международной Земной системой отсчета (ITRS);

расчет параметров спутниковой модели гравитационного поля Земли;

оценка точности параметров уточненной версии ГГСК;

оценка точности параметров спутниковой модели гравитационного поля Земли.

Для достижения этих требований разрабатываемое программное обеспечение использует результаты измерений следующих систем:

глобальной сети доплеровских измерительных систем (DORIS),

глобальной сети лазерных измерительных систем,

глобальной сети станций РСДБ,

навигационной аппаратуры потребителей ГНСС,

сети высокоточных полигонов, высокоточные сети беззапросных измерительных средств.

Рассмотрим характеристики существующих источников измерительной информации, привлекаемых для решения задач поставленных в работе.

Глобальная сеть доплеровских измерительных систем

DORIS (Dopler Orbit determination and Radio Positioning Integrated on Satellite) - доплеровская спутниковая система определения орбит и местоположения была разработана в начале 1990-х гг. Национальным центром космических исследований Франции (CNES) совместно с французским Национальным институтом географии (IGN) и Исследовательской группой по космической геодезии (GRGS).

Система DORIS включает оборудование наземных станций (радиомаяков), излучающих в верхнюю полусферу непрерывные радиосигналы, а также бортовые спутниковые радиоприемники, измеряющие доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиоизлучения. В силу высокого значения несущей частоты и, соответственно, значительного доплеровского смещения обеспечивается высокая точность измерения радиальной скорости спутника относительно наземного маяка – порядка 0,3 мм/с. Двухчастотный режим работы позволяет компенсировать влияние ионосферы на точность измерений.

Обработка и анализ данных производится Международной службой DORIS - IDS (International DORIS Servis) в Центрах анализа: CNES, IGN, LAREG (Франция), CSA (США, Техас), ИНАСАН (РФ, Москва).

Основная цель службы IDS состоит в предоставлении услуг для поддержки геодезических и геофизических исследований на основе сбора, архивирования и распространения данных измерений сети DORIS. Высокая точность данных измерений достаточна для решения целого ряда прикладных задач. На их основе определяются:

- координаты и скорость изменения координат наземных станций DORIS;
- координаты центра Земли и масштаб геоцентрической системы координат;
- высокоточные эфемериды спутников, оснащенных приемной аппаратурой DORIS;
- параметры ориентации Земли.

Схема расположения станций DORIS на Земном шаре приведена на рис. 1.



Рис. 1. Размещение станций DORIS

В настоящее время сеть наземных станций DORIS состоит из 54-х станций. На территории России находятся 3 станции системы DORIS – в Красноярске, Бадарах и Южно-Сахалинске. Информация по точным координатам станций и редуцированным величинам размещена на сайте Международной службы DORIS в Интернете.

В настоящее время точность определения орбит (СКП) КА системы DORIS составляет около 2-3 см.

Помимо определения орбит система DORIS позволяет определять координаты вновь включенных в сеть станций, а также уточнять координаты уже имеющихся маяков.

В настоящее время точность определения координат пунктов (СКП) составляет 1-3 см. Вид маяка системы DORIS, расположенного в п. Бадары (РФ), приведен на рис. 2.



Рис. 2. Маяк системы DORIS в п. Бадары

Глобальная сеть лазерных измерительных систем

Мировая сеть лазерных измерительных средств включает около 50 станций, размещенных на всех континентах и объединяется Международной службой лазерных дальномерных измерений ILRS (International Laser Ranging Servis). Информация о координатах и особенностях всех станций сети размещена на сайте этой службы: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>.

Российская сеть квантово-оптических систем (КОС) высокоточного измерения расстояний до навигационных и геодезических спутников в настоящее время включает станции, размещенные в следующих пунктах:

- г. Щелково (Подмосковье) – КОС «Сажень-Т»;
- Алтайский оптико-лазерный центр – Наземная оптико-лазерная система. Телескоп траекторных измерений (НОЛЦ ТТИ);
- г. Комсомольск-на-Амуре - КОС «САЖЕНЬ-С»;
- п. Архыз (Северный Кавказ) – КОС «САЖЕНЬ-ТМ-Д»;
- космодром Байконур – КОС «САЖЕНЬ-ТОС»;
- Менделеево - ФГУП «ВНИИФТРИ»;
- п. Светлое - ИПА РАН;
- Бадары - ИПА РАН;
- ст. Зеленчукская - ИПА РАН.

Достигнутая к настоящему времени точность измерения дальности до навигационных, геофизических и геодезических спутников характеризуется погрешностью 3-5 мм.

Российские и зарубежные наземные лазерные средства измеряют дальность до всех специализированных КА, оснащенных уголковыми отражателями:

- навигационных (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, COMPASS, BEIDOU);
- пассивных геодезических (LAGEOS, LARETS, STARLETTE, ETALON, BLITS);
- активных геодезических и геофизических (CHAMP, GRACE, GOCE; TOPEX/POSEIDON, ERS-2, JASON-1,2, ENVISAT, SENTINEL, CRYOSAT-2, SARAL, SWOT, HY19, ICESAT-2, ГЕО-ИК 2,3).

Глобальная сеть станций РСДБ

РСДБ - радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ, VLBI). В состав глобальной РСДБ-сети Международной службы РСДБ (IVS) входит более 40 радиоастрономических обсерваторий, глобально расположенных по всей поверхности земного шара. Расположение РСДБ – обсерваторий IVS изображено на рис. 3.



Рис. 3. Расположение РСДБ - обсерваторий Международной РСДБ службы (IVS)
(<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ns-map.html>)

Результаты РСДБ измерений используются как для определения параметров вращения Земли (ПВЗ), так и для целей установления и поддержания земной и небесной систем координат (ITRF и ICRF). Поэтому из обработки измерений каждой сессии можно извлечь некоторую информацию о координатах пунктов.

Наивысшая точность определения и уточнения координат глобальной сети станций достигается в проводимых Международной РСДБ-службой специальных измерительных сессиях по программе IVS-T2. Эта программа направлена на установление и поддержание ITRF. Измерения по этой программе проводятся раз в месяц и в измерительной сессии участвует около 16 станций. Каждая отдельная станция принимает участие в этих измерениях около пяти раз в год.

Результаты вторичной обработки результатов РСДБ-измерений сохраняются в виде файлов в международном формате SINEX, которые затем используются как для построения реализации земной системы координат (ЗСК) только по VLBI измерениям (VLBI - only terrestrial reference frame - VTRF), так и при построении ITRF. При построении VTRF ввиду вышеуказанных особенностей метода РСДБ часть пунктов считаются определяющими, т.е. им приписываются заданные значения координат. Остальные же пункты являются определяемыми, и их координаты уточняются из обработки данных измерений.

Средняя точность (СКО) определения координат отдельной станции в одной сессии для старой системы составляет около 1 см в плане и 2 см по

высоте. При установлении и поддержании земной системы координат совместно обрабатывается большое количество измерений за длительный промежуток времени. При многосессионном годовом решении достигаются точности определения положений и скоростей пунктов 2-5 мм и 0,3-0,5 мм/год.

Среднеквадратическая ошибка определения параметров преобразования Гельмерта между ITRF и VTRF в настоящее время составляет не более 70 угловых микросекунд по углам разворота, 2 мм для компонент вектора сдвига и $0,2 \cdot 10^{-9}$ для масштаба.

На существующей сети РСДБ получены выдающиеся результаты. Однако в настоящее время стали очевидны проблемы, которые препятствуют дальнейшему прогрессу. Главным недостатком антенн систем, используемых в настоящее время в сетях РСДБ, является малая скорость их переустановки в новое положение при смене объекта, что делает невозможным дальнейшее повышение точности определения ПВЗ. Число наблюдений квазаров на антеннах диаметром 30-70 м не может быть значительно увеличено из-за их малой угловой скорости при переустановке (1-2 градуса в секунду). Большие антенны имеют огромный вес (например, 70 метровая антенна П-2500 ВЦДКС весит 800 т), из-за которого увеличение скорости вращения невозможно из-за опасности разрушения конструкций и механизмов. При таких скоростях вращения более 80 процентов времени уходит на перевод антенны из одного положения в другое и только 20 процентов времени остается на наблюдения. Так как ошибки определения координат пунктов обратно пропорциональны корню квадратному из числа наблюдений, то число их необходимо увеличить.

В опубликованном в 2005 г. отчете рабочей группы (WG) IVS были разработаны основные требования и принципы построения новой системы для определения ПВЗ в режиме службы с помощью средств РСДБ, основанной на новейших достижениях современной науки и техники. Новая международная РСДБ сеть будет построена на 20-40 малых (10-12-метровых) быстровращающихся (больше 5 градусов в секунду) антенн, установленных в колокационных пунктах на всех континентах Земли. Они будут соединены оптоволоконными линиями связи с центром корреляционной обработки и анализа и должны работать непрерывно. Большие антенны будут участвовать совместно с новой сетью IVS, в основном, в программах по уплотнению земной системы координат и расширению небесной системы координат на слабые источники и на диапазоны длин волн, не охватываемые сетью VLBI на малых антеннах.

В настоящее время во всем мире ведутся активные работы по созданию РСДБ-сети нового поколения на основе быстровращающихся антенн малого диаметра VLBI-2010. Координируются эти работы Комитетом по VLBI-2010 (V2C) Международной РСДБ службы.

В настоящее время отечественная измерительная РСДБ-сеть представлена

Альманах современной метрологии, 2015, №3

обсерваториями РСДБ-комплекса КВАЗАР-КВО, созданном в институте прикладной астрономии РАН (ИПА РАН). Расположение обсерваторий РСДБ-комплекса КВАЗАР-КВО показано на рис. 4.

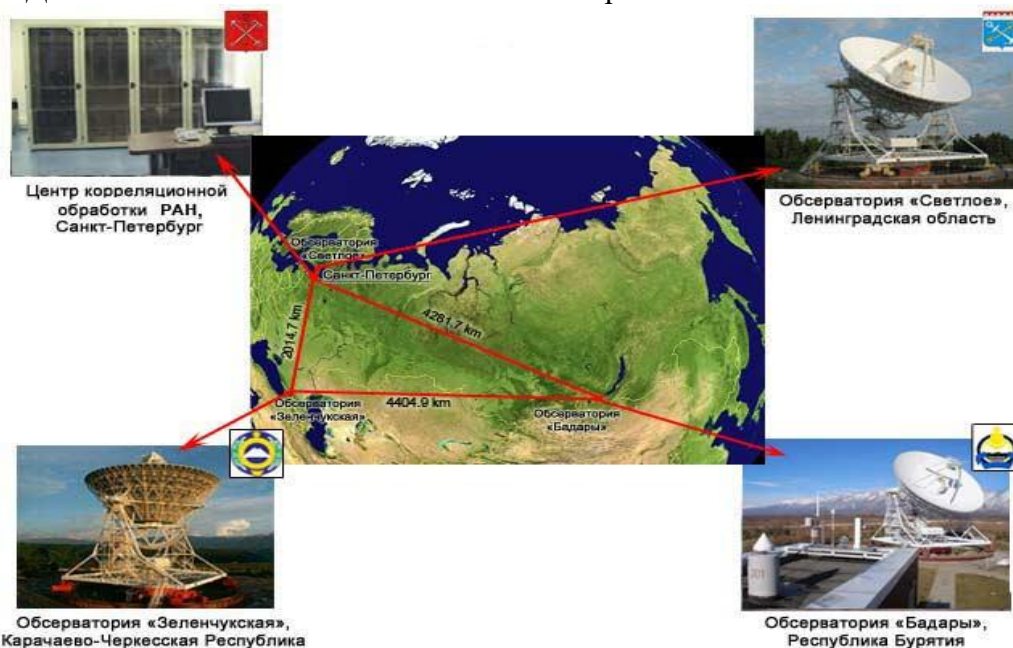


Рис. 4. Расположение радиоастрономических обсерваторий РСДБ-комплекса КВАЗАР-КВО (<http://www.ipa.nw.ru>)

Пункты РСДБ-комплекса КВАЗАР-КВО активно участвуют в работе Международной сети РСДБ, их измерения привлекаются совместно с измерениями зарубежных станций к совместной обработке с целью построения новой реализации ITRF.

Навигационная аппаратура потребителей ГНСС (НАП)

НАП состоит из приёмной антенны и аппаратуры приема спутниковых сигналов с сопутствующей инфраструктурой (кабели, система электропитания, накопители, интерфейс обмена данными, система установки или закрепления в точке приема).

В данном описании назовем «базами» НАП, которые неподвижно закреплены в точках долговременной сохранности положения (стационарные, или опорные). Те же приёмники, которые непосредственно используются для определения неизвестных координат точек и траекторий, будем называть «роверами».

Измеряемыми объектами в НАП являются параметры несущих и модулирующих колебаний электромагнитных волн, передаваемых со спутников. Задача приемника — измерение времени прихода, частоты и фазы приходящих со спутников сигналов относительно параметров

опорного сигнала приемника. По измеренным задержкам и разностям фаз вычисляются псевдодальности от точки приема до спутников. При известных значениях положений спутников на небесной сфере (эфемеридах) по измеренным псевдодальностям известными методами вычисляется положение приемника относительно спутников.

При дифференциальном методе приемники ведут соответствующие измерения разностей фаз и задержек, а результатом вычислений является взаимная разность геоцентрических координат базы и ровера, которую принято называть вектором.

Все существующее многообразие методов получения точных координат наземных точек с применением ГНСС сегодня можно свести к нижеприведенному короткому списку.

Метод «Постпроцессинг (PP) дифференциальный»

Он характеризуется отсутствием связи между базой и ровером в момент измерений. Накопленные ровером данные получают реальные координаты и оценку точности лишь после совместной с базой обработки. При решении глобальных задач и задач фундаментальной науки длины определяемых векторов превышают 2000 км, а требуемая точность составляет доли миллиметра. Вместе с тем, они тоже сегодня достижимы методами постпроцессинга.

Недостатками метода являются его невысокая оперативность и необходимость накопления представительной статистики измерений каждым приемником в отдельности для достижения лучшей точности вычисления векторов. Отсутствие возможности оценить качество приема базой на ровере требует длительных сессий накопления измерений.

Метод «Реального времени (RTK)»

Метод обеспечивает непрерывную и быструю коррекцию позиции ровера в движении, позволяющую выводить средство измерения в заданную точку с нужной точностью.

Наличие связи между базой и ровером — необходимое условие. В задачах определения координат метод не является более точным, так как ровер использует в решении то, что принял от базы, без достаточной аналитики собственных шумов и переотражений сигнала, подавление которых в постпроцессинге происходит корректнее.

Ограничением метода «RTK» в условиях удаленности ровера является отсутствие технологической беспроводной связи. Голосовую связь GSM и пакетную GPRS-связь обычно не рассматривают в качестве надежного и гарантированного носителя в технических задачах. Производителям оборудования такое положение со связью тоже выгодно. Метод RTK без дополнительных ухищрений связывает базу и ровер с использованием GSM-модемов на длинах векторов до 30 км. Решения возможны и на больших удалениях, но возникнут вопросы качества связи, подавления влияния ионосферы и тропосферы и др.

Прогрессивность новаций в сфере ГНСС сводится к одной задаче: получение вероятнейших значений координат с абсолютной точностью, близкой к сантиметру, за минимальное время измерений в условиях неидеального приема. При определенных условиях достижима точность, исчисляемая миллиметрами. Наиболее интересные решения в ГНСС-методах с использованием оптимизации соотношения времени и точности реализованы у производителей программ, не привязанных к конкретному исполнению НАП.

Еще одна технология, заслуживающая внимания, — точное позиционирование (Precise point positioning — PPP). Суть ее в том, что ровер получает точные координаты позиции по результатам собственных измерений, корректируемых поправкой в собственном времени и в получаемых эфемеридах. Поправка формируется системой непрерывного мониторинга, образованного сетью из нескольких десятков измерительных станций и стандартов частоты, а также нескольких дальномерных станций, уточняющих параметры орбит спутников ГНСС методами лазерной дальнометрии. Преимущества метода в том, что при этом обеспечивается точность позиционирования на уровне единиц сантиметров в реальном масштабе времени.

Сеть высокоточных полигонов

Создается сеть высокоточных измерительных полигонов на территории РФ, предназначенных для подтверждения характеристик точности уточненной версии ГГСК. Эта сеть включает:

Центральный высокоточный полигон на территории Московской области с центром во ФГУП «ВНИИФТРИ» (Менделеево);

Северо-Западный высокоточный полигон на территории Ленинградской области с центром во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (Санкт-Петербург);

Восточный высокоточный полигон на территории Иркутской области с центром в Иркутском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» (Иркутск).

Типовой состав измерительных средств полигона включает:

стационарные измерительные средства;

мобильные измерительные средства;

комплекс средств размещения и перемещения измерительных средств (транспортные средства);

существующие сети наблюдательных пунктов других ведомств.

Высокоточные сети беззапросных измерительных средств

Для получения результатов высокоточных измерений на территории страны предлагается провести совместную обработку результатов измерений ведомственных сетей (Росстандарт, ИПА РАН, Росреестр, МО, Роскосмос), а наиболее стабильные пункты включить в состав сети опорных пунктов на основе совместных решений об оснащении и использовании.

Альманах современной метрологии, 2015, №3

Требования к опорным пунктам сети:

- геодезический пункт в заданных системах координат с требуемой точностью;
- НАП ГНСС, выполняющая высокоточные фазовые измерения;
- стандарт частоты и времени (система синхронизации);
- абсолютные и относительные гравиметры (результаты гравиметрических измерений на геодезическом пункте).

Полученные результаты измерений, включая измерения гравитационного поля Земли и его трансформант, данные глобальных измерительных сетей беззапросных измерительных средств, после верификации будут использованы в комплексе программно-аппаратных средств для оценки и уточнения ГГСК, планетарной модели гравитационного поля Земли и цифровой модели квазигеоида. Использование новых высокоточных измерительных средств, в том числе на основе новых технологий, большого измерительного объема данных и новых методических подходов по обработке результатов измерений, позволит получить новые уточненные характеристики геодезической системы координат. Совместное использование полученных результатов с организациями, ответственными за эксплуатацию и развитие систем координат в Российской Федерации, позволит совершенствовать действующие в стране системы координат.

Заключение

Реализация вышеприведенных научных и технических решений позволит создать комплекс, для проведения оценки и уточнения Государственной геоцентрической системы координат с требуемой точностью в интересах различных потребителей. Совместное использование результатов измерений комплекса с организациями, ответственными за эксплуатацию систем координат в Российской Федерации, даст возможность уточнить и совершенствовать действующие в стране системы координат.