

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

**В.В. Пасынков¹, А.Н. Жуков², С.М. Зотов²,
А.В. Лобанов², И.Н. Тупицын², Н.С. Чурилов²**

ОАО «НПК «СПП»¹

Филиал ПНБО ОАО «НПК «СПП»²

Основными задачами космической геодезии являются:

- создание высокоточных систем координат;
- создание высокостепенных моделей ГПЗ (уточнение коэффициентов, определение аномалий силы тяжести, определение высот квазигеоида);
- построение опорных геодезических сетей;
- уточнение модели движения тектонических плит.

Для решения перечисленных задач используется следующий состав измерительной информации:

- информация бортовой аппаратуры спутниковой навигации;
- градиентометрическая измерительная информация;
- межспутниковые измерения;
- измерительная информация сети DORIS;
- спутниковая альтиметрическая измерительная информация;
- измерительная информация беззапросных измерительных систем глобальной сети - кодовые и фазовые измерения L1, L2, L5 (GPS), L1, L2, L5 – L8 (GALILEO), L1, L2, L3 (ГЛОНАСС);
- лазерные измерения дальности до спутников специального назначения;
- измерительная информация КНС ГЛОНАСС, GPS со спутников геодезического назначения;
- сводные каталоги средних значений аномалий силы тяжести и нормальных высот;
- каталоги координат геодезических пунктов;
- гравиметрические данные.

Ключевым аспектом реализации методов космической геодезии является высокоточное определение орбит геодезических спутников.

В настоящее время в состав геодезических спутников включают:

- бортовую аппаратуру DORIS, работающую по сигналам развитой сети наземных станций;
- бортовую навигационную аппаратуру, работающую по сигналам ГНСС;

- уголкового отражатели для проведения лазерно-дальномерных измерений.

В таблице представлен текущий уровень точности, достигаемый с использованием этих бортовых систем.

Таблица

Точностные характеристики бортовой аппаратуры

Аппаратура		Точностные характеристики	Методы решения
Аппаратура спутниковой навигации	Кодовые измерения в РМВ	1-5 м	-
	Фазовые измерения в РМВ (PPP)	0,1-0,3 м	-
	Фазовые измерения в постобработке	0,01-0,05 м	Динамический/Кинематический
DORIS		0,01-0,05 м	Динамический
Квантово-оптические системы		0,01-0,05 м	Динамический

Видно, что динамические определения орбит по доплеровским и ГНСС данным примерно эквивалентны по точности. Орбиты, полученные по данным лазерной локации (ввиду их недостаточного количества и неравномерности покрытия дуг орбит геодезических спутников), в настоящее время не могут конкурировать с доплеровским и ГНСС методами по точности и могут быть использованы только как дополнительные или для независимого контроля точности полученных решений.

ГНСС-метод в отличие от доплеровского позволяет кроме динамических решений получать кинематические, то есть восстанавливать положения спутника без использования модели движения с примерно эквивалентной точностью в сравнении с динамическим POD.

Перечисленные методы реализованы ОАО «НПК «СПП», но сравнение с возможностями зарубежных центров анализа показало, что ещё не достигнут лучший мировой уровень по каждому инструменту, прежде всего в динамике движения низкого спутника по причине неиспользования данных бортовых акселерометров и ряда рекомендованных Международными соглашениями параметров модели движения низкого КА. Проблемной оказалась реализация и стохастических импульсов, которая на практике оказалась более выгодной в сравнении с технологией уточнения эмпирических ускорений.

В перспективе рассматривается также реализация совместной обработки всех видов измерений в рамках одной задачи. Здесь проблемным будет автоматическое взвешивание различных видов измерений между собой.

Спутниковая градиентометрия

Для получения градиентометрических данных в настоящее время доступны результаты измерений 3-х типов градиентометрических миссий:

«спутник-спутник» в режиме высокий-низкий (CHAMP), измерение ускорений на одном низкоорбитальном КА;

«спутник-спутник» в режиме низкий-низкий (GRACE) – измерение разностей ускорений между двумя низкоорбитальными КА;

с градиентометром на борту (GOCE) – измерения градиентов ускорений в пределах одного низкоорбитального КА.

Все типы данных обеспечивают лишь дифференциальные или разностные динамические методы космической геодезии и имеют низкую чувствительность к глобальным (описываемым низкими гармониками) аномалиям геопотенциала и являются качественным дополнением к общему динамическому методу космической геодезии, который как раз, наоборот, более «чувствителен» к глобальным аномалиям геопотенциала.

Система «спутник-спутник», включающая 2 спутника, находящихся на одной орбите, не «чувствительна» к длинам волн геоида, превышающим расстояние между спутниками (как правило, это более 100 км), а решения, полученные по спутникам на разных орбитах, будут содержать как длинные волны геоида (свыше 100 км), так и короткие волны геоида.

Динамические методы космической геодезии уверенно определяют гармоники не выше 30-го порядка и степени, системы «спутник-спутник» - в диапазоне гармоник от 30-го до 160-го порядка и степени гармоник (в зависимости от различных комбинаций спутников). Более высокие гармоники уверенно определяются методами спутниковой градиентометрии, так как градиентометры более «чувствительны» к тонкой структуре гравитационного поля Земли.

Проект GOCE является примером спутника с градиентометром на борту, который измеряет вторые производные геопотенциала с недоступной ранее точностью в несколько миллизеттвеш (мЕ) ($1\text{Е} = 10^{-9}\text{с}^{-2} = 1 \text{ мГал} / 10 \text{ м}$). Космический аппарат миссии GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) предназначен для исследования гравитационного поля Земли и течений океанов. Задачами проекта являются измерение гравитационного поля Земли и моделирование формы геоида с высокой точностью и большим пространственным разрешением. Проект GOCE является первым в ряду новых проектов по исследованию Земли, который реализован в рамках программы Европейского космического агентства (ЕКА) «Живая планета» силами 10 ведущих университетов Европы.

Миссия GOCE показывает наилучшие результаты при определении ГПЗ в диапазоне степеней разложения приближённо от $n_1 = 50$ до $n_2 = 240$, что примерно соответствует используемой полосе $0,005 \text{ Гц} \leq \nu \leq 0,05 \text{ Гц}$ в спектре шумов [1]. Практически рекомендуется фильтровать исходную

информацию и выполнять вычисления до более высокой степени разложения (до $n_2 = 300$), но конечный результат ограничить по-прежнему наивысшей степенью $n_2 = 240$. Это уменьшает искажения коэффициентов за счёт наложения высокочастотных составляющих исходных данных. Длинноволновая часть до степени $n_1 = 50$ убирается из исходных данных с помощью одной из надёжных спутниковых моделей ГПЗ или с использованием GPS измерений (решение SST).

Система «спутник-спутник», в которой оба спутника низкие, реализована в проекте GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) Проект GRACE – совместный проект Американского национального управления по авионавтике и космонавтике (NASA) и Немецкого центра авиационных и космических полетов (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR).

В терминах гармонических CS-коэффициентов результаты другого известного проекта GRACE считаются более точными до степени n порядка 100, но при $n > 140$ сравнение однозначно в пользу GOCE. В полосе $100 < n < 140$ оба проекта можно приближённо считать сопоставимыми. Поэтому нижнюю границу полосы частот при гармоническом анализе ГПЗ по результатам спутниковой градиентометрии нет необходимости выбирать ниже порядка 60 - 80, а верхнюю - выше 240 - 260.

Расстояния между ними и скорости изменения этих расстояний измеряются с предельно возможной точностью (до 10 микрон). Орбита каждого спутника подвержена индивидуальному влиянию возмущающих ускорений, которые соответствуют первым производным гравитационного потенциала.

Информация от обоих спутников дает разность ускорений. Кроме того, положения спутников на околоземной орбите определяются по GPS данным. Поэтому режим «высокий – низкий» также, по существу, имеет место. Эффект действия на спутник негравитационных сил, например, за счет аэродинамического сопротивления, должен быть компенсирован или измерен акселерометрами.

Система «спутник-спутник», из которых один высокий, другой низкий, реализована в проекте CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical and Application). Реализация данного проекта была возложена на научно-исследовательский центр Потсдама (Geo Forschung Zentrum Potsdam (Германия).

Проект предусматривает следующие цели:

изучение глобального поля силы тяжести, а именно, уточнение длинноволновой части статического поля и ее временных вариаций (вызванных, например, перераспределениями атмосферных масс, океанической циркуляцией, изменением уровня моря за счет таяния полярного льда);

изучение глобального магнитного поля, уточнение основного магнитного

поля и магнитного поля земной коры и их пространственно-временных вариаций;

профилирование ионосферы и тропосферы, уточнение атмосферы с точки зрения ее температуры, содержания водяных паров и электронной структуры по данным о преломлении сигналов GPS.

Основные проблемные вопросы, требующие решения при уточнении параметров модели ГПЗ с использованием измерений спутниковой градиентометрии; следующие:

формирование и решение системы линейных уравнений большого порядка;

решение математически некорректной задачи с использованием методов регуляризации;

отсутствие измерений в близполюсных районах Земли;

сложный спектр ошибок измерений;

обработка значительных объемов измерительной информации (за 6 месяцев более 20 Гб разнородной измерительной информации);

высокоточное определение поправок к измеряемым параметрам.

Спутниковая радиотехническая система DORIS

Спутниковая радиотехническая система DORIS (Determination d'Orbite Radiopositionnement Integrespar Satellite) была разработана и реализована Французским Космическим агентством (CNES) совместно с научно-исследовательской группой космической геодезии (GRGS) и французским Национальным институтом географии (IGN) для высокоточного контроля орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецизионные альтиметры, и определения координат наземных пунктов.

В рамках программы DORIS участвуют 5 космических аппаратов («Jason-2», «HY-2A», «Spot-5», «Sarat», «Cryosat-2») и около 60 наземных станций [2].

Использование данных системы DORIS для решения целевых задач космической геодезии предполагает разрешение следующих проблемных вопросов:

выбор моделей расчета поправок в «сырые» измерения: поправки на рефракцию радиосигналов в ионосфере и тропосфере, на вынос фазовых центров антенн КА и наземных пунктов, на влияние релятивистских и приливных эффектов, на ошибки формирования бортовых и наземных шкал времени;

отработка технологии решения эфемеридной задачи в части выбора состава уточняемых параметров: коэффициентов светового давления, баллистических коэффициентов, задержек радиосигнала в тропосфере, интервалов оценивания параметров;

отработка технологии совместного использования DORIS данных с данными других систем в части решения геодезических задач.

Метод спутниковой альтиметрии

Метод спутниковой альтиметрии (МСА) широко применяется в мировой и российской практике для детального изучения ГПЗ в Мировом океане. Доступны данные проектов TOPEX, JASON-1,2.

В настоящее время МСА интенсивно развивается. Появились новые виды спутниковых высотомеров [2]:

- высотомеры SAR на основе радара с синтезированной апертурой;
- высотомеры интерферометрические SAR на основе радара с синтезированной апертурой;
- высотометрия с использованием полос захвата.

На точность измерений методом спутниковой альтиметрии оказывают влияние следующие факторы:

влияние внешней среды на прохождение радиосигнала и отклонения морской поверхности от геоида в момент измерения, это: тропосфера (температура и давление в подспутниковой точке, интегральное значение влажности по данным радиометра), ионосфера (существенно ослабляется влияние при использовании двухчастотного метода), состояние морской поверхности;

инструментальные ошибки измерений высоты спутника над морской поверхностью (учет по средствам использования моделей Брауна, Хайна, статистическая модель, необходимость калибровки с использованием полигонов);

орбитальные погрешности положения спутника (необходимость использования высокоточных измерительных средств, трехмерная модель спутника, модель отражательных коэффициентов с учетом материалов поверхности спутника).

Дальнейшее повышение точности решения фундаментальных задач космической геодезии должно быть связано с совместной обработкой всего состава и объема разнородной измерительной информации, полученной по следующим системам [3]:

- ГНСС;
- спутниковая градиентометрия;
- спутниковая альтиметрия;
- спутниковая радиотехническая система DORIS.

В перспективных геодезических программных комплексах необходимо разработать технологию совместной обработки всех видов измерений для решения целевых задач.

Литература

1. The European GOCE Gravity Consortium (EGG-C, R. Rummel, Th. Gruber), GOCE High Level Processing Facility. Technical Note: Product Acceptance Review (PAR) - Level 2 Product Report, 2012.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей *Альманах современной метрологии, 2015, №3*

- России, М.: ИКИ РАН, 2011, 480 с.
3. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) – Doris System Definition (version 1.2).