

УДК 528.3

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТА GOCE**А.А. Ключков***Институт астрономии РАН, Москва
kaa5774@yandex.ru*

Проект GOCE имеет целью создание высокоточной модели статического гравитационного поля Земли в виде коэффициентов сферических гармоник степени и порядка выше 250, соответствующей коротковолновой его части с пространственным разрешением менее 100 км. Решение целевых задач проекта GOCE основано на математической обработке измерительной информации следующих сенсорных систем: аппаратуры спутниковой навигации, спутникового гравитационного градиентометра, звездной камеры. Данные в проекте GOCE делятся на три уровня: уровень 0, уровень 1b и уровень 2. Математическая обработка данных проекта GOCE выполняется в два этапа: этап предварительной обработки и этап решения целевой задачи проекта GOCE. В данной статье изложена краткая стратегия предварительной обработки в виде блок-схемы и разработан алгоритм вычисления компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b по акселерометрическим измерениям, полученным дифференциальным методом.

Ключевые слова: гравитационное поле, спутниковая градиентометрия, математическая обработка измерений, системы координат, уравнение градиентометрических измерений.

PREPROCESSING OF GRADIOMETRIC MEASUREMENTS OF THE GOCE PROJECT**A.A. Kluykov***Institute of Astronomy of RAS, Moscow
kaa5774@yandex.ru*

The GOCE project aims to create a high-precision model of the Earth's static gravitational field in the form of coefficients of spherical harmonics of degree and order higher than 250, corresponding to its short-wave part with a spatial resolution of less than 100 km. The solution of the GOCE project's objectives is based on mathematical processing of measurement information from the following sensor systems: satellite navigation equipment, satellite gravity gradiometer, star camera. Data in the GOCE project is divided into three levels: level 0, level 1b, and level 2. Mathematical processing of GOCE project data is performed in two stages: the preprocessing stage and the solution stage of the GOCE project target. This article presents a brief preprocessing strategy in the form of a block diagram and developed an algorithm for calculating the components of the gravitational potential tensor of level 1b from measurements of accelerometers obtained by the differential method.

Keywords: gravitational field, satellite gradiometry, mathematical processing of measurements, coordinate systems, equation of gradiometric measurements.

Введение. Проект GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, ESA, 1999 г.) направлен на создание высокоточной модели статического гравитационного поля Земли с высоким разрешением, представленной через коэффициенты сферических гармоник степени и порядка выше 250, соответствующей коротковолновой его части с пространственным разрешением менее 100 км [1].

Целью данной статьи является изложение стратегии предварительной обработки градиентометрических измерений.

В результате выполнения проекта GOCE пользователи обладают огромным количеством данных, состоящих из сотен миллионов орбитальных данных по линии «спутник-спутник», полученных методом «высокий-низкий» («high-low» Satellite-to-Satellite Tracking — hl-SST), плюс высокоточные градиентометрические измерения (SGG — Satellite Gravity Gradiometry). Эти данные содержат информацию о гравитационном поле Земли в глобальном масштабе. Их частотный спектр включает как длинноволновую часть гравитационного поля, определенную по линии «спутник-спутник», так и коротковолновую (высокочастотную) часть, определенную по градиентометрическим измерениям.

Определение полного вектора параметров (коэффициентов сферических гармоник) по полному объему измерительной информации представляет собой трудную вычислительную задачу, решение которой должно основываться на использовании стратегии параллельных вычислений.

Решение целевых задач проекта GOCE основано на синтезе обработки измерительной информации следующих сенсорных систем:

аппаратуры спутниковой навигации, осуществляющей наблюдения спутников навигационной системы GPS по линии «спутник-спутник» (hl-SST); спутникового гравитационного градиентометра (SGG); звездной камеры (Star Tracker).

1. Уровни данных в проекте GOCE

В проекте GOCE имеется три основных уровня данных [1].

Данные уровня 0 (Level 0) представляют собой «сырые» данные, полученные сенсорными системами, которые включают в себя:

- инструментальные данные (например, измерения звездной камеры с частотой 2 Гц);
- выходные данные 6 акселерометров по трем измеряемым осям с частотой 1 Гц (более точно 1/0,999360 Гц);
- SST-данные с частотой 1 Гц.

Каждый из этих типов данных является основой для получения данных уровня 1b.

Данные уровня 1b (Level 1b). Переход от данных уровня 0 к данным уров-

ня 1b осуществляется путем конвертирования временных рядов данных уровня 0 в технические единицы уровня 1b и выполнением калибровки.

Данные уровня 1b включают в себя:

- гравитационные градиенты в инструментальной системе координат градиентометра GRF — Gradiometer Reference Frame;
- матрицы преобразования систем координат;
- линейные ускорения, угловые скорости и ускорения;
- SST-измерения;
- орбитальные данные (положения, скорости на моменты времени).

Данные уровня 2 (Level 2). Данные уровня 2 генерируются с использованием данных уровня 1b.

Данные уровня 2 включают в себя:

- предварительно обработанные, внешне откалиброванные и скорректированные гравитационные градиенты в инструментальной системе координат градиентометра (GRF) и в земной системе координат (TRF — Terrestrial Reference Frame);
- «быстрые» (Rapid) и точные орбиты;
- решения по гравитационному полю, включая ковариационную матрицу и определяемые величины (высоты геоида, гравитационные аномалии и уклонения отвесной линии).

В таблице 1 приведено описание продуктов данных проекта GOCE.

Таблица 1

Продукты данных проекта GOCE

Уровни	Идентификатор продукта		Описание продукта
	Входной файл	Выходной файл	
Level_1b	EGG_NOM_1b	EGG_CCD_DS	Внутренне калиброванные общие и дифференциальные ускорения. Тензор гравитационного градиента в инструментальной системе координат градиентометра (GRF). Кватернионы ориентации градиентометра в инерциальной системе координат (IRF).
		EGG_CCD_DS	
		EGG_IAQ_DS	
	SST_NOM_1b	SST_COV_DS SST_PVT_DS	Ковариационная матрица. Ошибка часов и вектор положения спутника.
STR_VC2_1b /	STR_VC2_DS	Кватернионы звездной камеры (уровень 1b). Кватернионы звездной камеры (уровень 1b).	
STR_VC3_1b	STR_VC3_DS		

Продолжение таблицы 1

Level_2	EGG_NOM_2	—	Гравитационные градиенты уровня 2 в инструментальной системе координат градиентометра (GRF) с поправками.
	EGG_TRF_2	—	Гравитационные градиенты уровня 2 в локальной системе координат, имеющей северную ориентировку (LNOF — Local North Oriented Frame) с поправками.
	EGM_GOC_2	EGM_GCF_2 EGM_GEO_2 EGM_GAN_2 EGM_GVE_2 EGM_GVN_2 EGM_GER_2 EGM_GRP_2	Ряд сферических гармоник. Сетка высот геоида. Сетка гравитационных аномалий. Сетка уклонов отвесной линии в направлении «восток-запад» («east-west»). Сетка уклонов отвесной линии в направлении «север-юг» («north-south»). Сетка ошибок высот геоида. Отчет.
	SST_AUX_2	—	Коэффициенты сферических гармоник для неприливных временных поправок.
	SST_PSO_2	SST_PRD_2 SST_PKI_2 SST_PCV_2 SST_PRM_2 SST_PSO_2	Определение орбиты редуцированным динамическим методом. Определение орбиты кинематическим методом. Ковариационная матрица (кинематический метод). Матрицы вращения между инерциальной системой координат (IRF) и земной системой координат (EFRF — Earth-Fixed Reference System) (кватернионы). Отчет.

Для пользователей доступны данные уровней 1b и 2. Эти данные пользователи получают по запросу из базы данных проекта GOCE. Доступ к базе данных проекта GOCE для зарегистрированных пользователей осуществляется через GOCE Virtual Online Archive.

Поскольку измерительная информация проекта GOCE к пользователям поступает в архивированном виде с расширением «*.tar», то для ее дальнейшего использования необходим этап разархивации. При этом используется архиватор WinZip. В результате этой операции получают файл в формате EEF — Earth Explorer File.

Далее выполняется конвертирование файлов из формата EEF в текстовый формат. Для этого используются так называемые синтаксические обработчики — «парсеры» (от англ. parse — анализ, разбор) — небольшие программы синтаксического анализа, принимающие на вход файлы данных в XML-формате, и в соответствии с заданными параметрами конвертирующие их в

текстовый формат [3]. В проекте GOCE используется программа «GOCE XML Parser». Она написана на языке Perl.

2. Этапы математической обработки спутниковых градиентометрических измерений

Математическая обработка спутниковых градиентометрических измерений включает два этапа:

- этап предварительной обработки;
- этап решения целевой задачи.

Конечной целью этапа предварительной обработки является получение данных уровня 2.

Блок-схема этапов предварительной обработки градиентометрических измерений

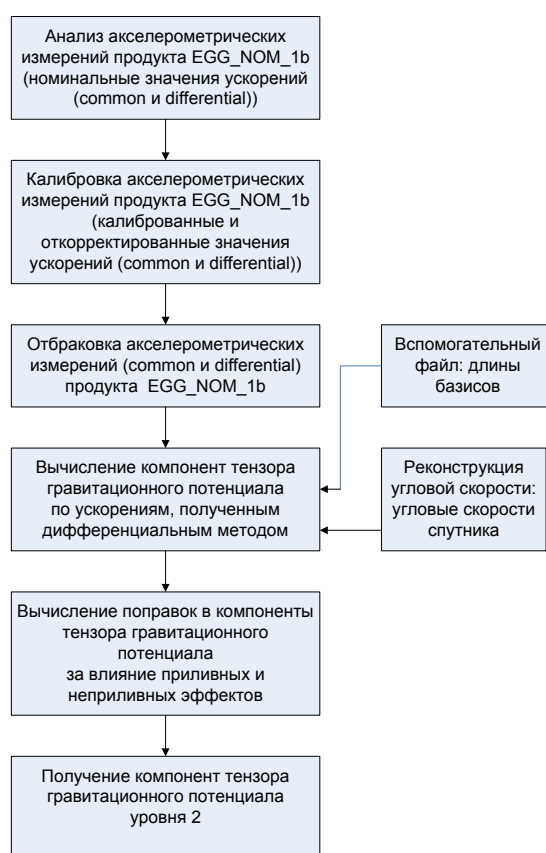


Рис. 1. Блок-схема этапов предварительной математической обработки градиентометрических измерений

Предварительная обработка градиентометрических данных проекта GOCE включает в себя следующие этапы (рисунок 1):

- анализ акселерометрических измерений;
- калибровка акселерометрических измерений;
- отбраковка аномальных акселерометрических измерений;
- вычисление компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b по акселерометрическим измерениям, полученным дифференциальным методом;
- расчет поправок в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние приливных и неприливных эффектов;
- получение компонент тензора гравитационного потенциала уровня 2.

При вычислении компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b по акселерометрическим измерениям используются значения угловых скоростей спутника, полученным в результате комбинирования измерений звездной камеры и градиентометра.

3. Системы координат, используемые при математической обработке градиентометрических измерений

При предварительной математической обработке градиентометрических измерений используются следующие основные системы координат [2]:

- инерциальная система координат (IRF);
- земная система координат (EFRF);
- орбитальная система координат (LORF);
- система координат градиентометра (GRF).

На рисунке 2 показана ориентация друг относительно друга основных систем координат, используемых при математической обработке данных в проекте GOCE.

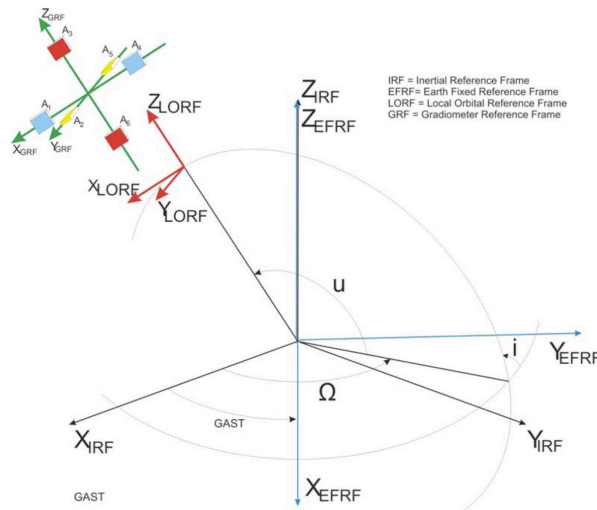


Рис. 2. Основные системы координат, используемые при математической обработке данных в проекте GOCE

4. Вычисление компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b

Измеряемой величиной в спутниковой градиентометрии является ускорение пробной массы относительно основы, которое может быть описано следующим векторным уравнением [3]

$$a_i = -(V - \Omega^2 - \dot{\Omega}) \cdot r_i + d, \tag{1}$$

где i - номер акселерометра;

r_i - радиус-вектор положения пробной массы i -ого акселерометра относительно центра масс спутника.

Первый член формулы (1) представляет собой линейное ускорение пробной массы акселерометра, обусловленное гравитационными градиентами.

Второй и третий члены отражают инерциальные ускорения: $\Omega^2 r_i$ - ускорение пробной массы акселерометра, обусловленное вращением спутника в инерциальном пространстве, а $\dot{\Omega} r_i$ - ускорение пробной массы акселерометра, обусловленное угловыми ускорениями спутника. Вектор d представляет собой вектор неконсервативных ускорений, обусловленных сопротивлением атмосферы и солнечного давления, влияющих на орбиту спутника GOCE.

Измерения выполняются в двух режимах: общем (common) и дифференциальном (differential).

Измерения, полученные в общем режиме, используются для оценки влияния негравитационных эффектов (атмосферного торможения и светового давления) на орбиту спутника GOCE

$$\mathbf{a}_{c,ij} = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j) \approx \mathbf{d}. \quad (2)$$

Измерения, полученные в дифференциальном режиме, используются для вычисления вторых производных (градиентов) гравитационного потенциала:

$$\mathbf{a}_{d,ij} = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j) = -\frac{1}{2} \cdot (V - \Omega^2 - \dot{\Omega}) \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j). \quad (3)$$

На основании формулы (3) компоненты тензора гравитационного градиента могут быть получены с использованием следующих соотношений:

для главных диагональных компонент

$$\left. \begin{aligned} V_{xx} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{a_{d,14,x}}{L_x} - \omega_y^2 - \omega_z^2 \\ V_{yy} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{a_{d,25,y}}{L_y} - \omega_x^2 - \omega_z^2 \\ V_{zz} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{a_{d,36,z}}{L_z} - \omega_x^2 - \omega_y^2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

для недиагональных компонент

$$\left. \begin{aligned} V_{xy} &= -\frac{a_{d,14,y}}{L_x} - \frac{a_{d,25,x}}{L_y} + \omega_x \omega_y \\ V_{xz} &= -\frac{a_{d,14,z}}{L_x} - \frac{a_{d,36,x}}{L_z} + \omega_x \omega_z \\ V_{yz} &= -\frac{a_{d,25,z}}{L_y} - \frac{a_{d,36,y}}{L_z} + \omega_y \omega_z \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Как следует из формул (4) и (5), для получения компонент тензора гравитационного градиента необходимо знать составляющие угловой скорости спутника в инерциальном пространстве. Эти данные получают из комбинированной математической обработки измерений звездной камеры и измерений угловых ускорений, определяемых на основе следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{a_{d,36,Y}}{L_Z} + \frac{a_{d,25,Z}}{L_Y} &= \dot{\omega}_X \\ -\frac{a_{d,14,Z}}{L_X} + \frac{a_{d,36,X}}{L_Z} &= \dot{\omega}_Y \\ -\frac{a_{d,25,X}}{L_Y} + \frac{a_{d,14,Y}}{L_X} &= \dot{\omega}_Z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, компоненты тензора гравитационного градиента представляют собой косвенные измерения, которые являются функциями измеренных акселерометрами ускорений пробных масс.

В соответствии с формулами (4), (5) был разработан алгоритм и составлена программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН для вычисления компонент тензора градиента гравитационного потенциала уровня 1b. Сравнение результатов, полученных с помощью разработанной программы, с данными файла GOCE показало полное их совпадение, что свидетельствует о правильности разработанного алгоритма и корректной его реализации в программном коде.

5. Вычисление компонент тензора гравитационного потенциала уровня 2

Компоненты тензора гравитационного потенциала уровня 2 получают посредством коррекции компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b за влияние приливных и неприливных факторов [4].

$$G_{L2} = G_{L1b} - \Delta G_{D.Tides} - \Delta G_{S.Tides} - \Delta G_{Ocean Tides} - \Delta G_{Pol.Tides} - \Delta G_{NonTides var.}, \quad (7)$$

где G_{L2} - компонент тензора гравитационного потенциала уровня 2;

G_{L1b} - компонент тензора гравитационного потенциала уровня 1b;

$\Delta G_{D.Tides}$ - поправка в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние прямых приливов;

$\Delta G_{S.Tides}$ - поправка в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние приливов в твердой Земле;

$\Delta G_{Ocean Tides}$ - поправка в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние океанических приливов;

$\Delta G_{Pol.Tides}$ - поправка в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние полюсных приливов;

$\Delta_{GNontides\ var}$ - поправка в компоненты тензора гравитационного потенциала за влияние неприливных эффектов.

Литература

1. Ключиков А.А. Технология определения параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям. Данные проекта GOCE и стратегия их обработки// Геодезия и картография. 2014. № 8. С. 6-12.
2. Ключиков А.А. Технология определения параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям. Системы координат и времени в спутниковой градиентометрии// Геодезия и картография. 2015. № 1. С. 4-11.
3. Ключиков А.А. Технология определения параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям. – Уравнение поправок градиентометрических измерений// Геодезия и картография. 2015. № 2. С. 7-11.
4. GO-MA-HPF-GS-0110. GOCE Level 2 Product Data Handbook. The European GOCE Gravity Consortium, 2010. 77 pp.