

НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

РАБОТЫ В ИНТЕРЕСАХ СОЗДАНИЯ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ ПО МАТЕРИАЛАМ ЗАРУБЕЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ

К.В. Епишин, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., epishin@extech.ru

Д.В. Зернюков, зам. дир. центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, d255@yandex.ru

И.М. Комаров, дир. центра ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, komarovim@extech.ru

Е.Л. Хицунов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, hidi88@extech.ru

Статья посвящена зарубежным разработкам в области навигации по магнитным и гравитационным полям Земли.

Ключевые слова: перечень критических военных технологий (США), навигация, основанная на базах данных, аномалия магнитного поля, датчик магнитного поля, сверхпроводящий квантовый интерферометр, гравитационные возмущения, интерферометрический гравиметр на холодных атомах.

WORK TO CREATE A PASSIVE SYSTEM OF NAVIGATION BASED ON MAGNETIC AND GRAVITATIONAL FIELDS OF THE EARTH ON THE MATERIALS OF FOREIGN SOURCES

K.V. Epishin, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, epishin@extech.ru

D.V. Zernykov, Deputy Director of Centre, SRI FRCEC, d255@yandex.ru

I.M. Komarov, Director of Centre, SRI FRCEC, komarovim@extech.ru

E.L. Khitsunov, Head of Department, SRI FRCEC, hidi88@extech.ru

This article is devoted to foreign developments in the navigation area on the magnetic and gravitational fields of the Earth.

Keywords: Militarily critical technologies list (MCTL), DBRN (databased referenced navigation), magnetic signatures, magnetic field sensor, SQUID (Quantum Interference Device), gravity disturbances, cold atom interferometric gravimeter.

Список сокращений

ВВСТ – вооружение, военная и специальная техника;

ГПЗ – гравитационное поле Земли;

ГрНС – гравиметрические навигационные системы;

ИНС – инерциальная навигационная система;

КЭНС – корреляционно-экстремальная навигационная система;

ЛА – летательный аппарат;

МПЗ – магнитное поле Земли;

МСНО – магнитометрическая система навигационного обеспечения;

УСП – ускорение свободного падения;

ЭПР – электронно-парамагнитный резонатор (магнетометр);

ЯМР – ядерный магнитный резонатор;

MCTL – militarily critical technologies list (перечень критических военных технологий);

NMR – nuclear magnetic resonance (ядерный магнитный резонатор);

SQUID – Superconducting quantum interference device (сверхпроводящий квантовый интерферометр).

Введение

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность применения объектов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), является точность, полнота и подробность исходных магнитных и гравиметрических данных.

Измеряемыми параметрами пространственных полей являются:

- магнитное поле Земли (МПЗ) – модуль вектора магнитной индукции и составляющие вектора (северная, восточная и вертикальная);
- гравитационное поле Земли (ГПЗ) – первые производные гравипотенциала (три компоненты ускорения силы тяжести) и вторые производные гравипотенциала (девять компонент градиента силы тяжести).

В статье рассматриваются следующие типы систем навигации по пространственным полям:

- МагКЭНС-1 – навигация по модулю вектора магнитной индукции;
- МагКЭНС-2 – навигация и наведение по вектору магнитной индукции;
- ГравиКЭНС-1 – навигация по аномалиям силы тяжести;
- ГравиКЭНС-2 – навигация и наведение по градиентам силы тяжести.

Магнитное поле Земли имеет неоднородности и аномалии, вызванные неоднородностью строения коры и ниже лежащих слоев. Карта аномалий может быть использована для навигации с использованием магнитометрических систем навигационного обеспечения подвижных объектов, которые обладают рядом преимуществ: высокой автономностью, помехозащищенностью и надежностью, малой массой и энергопотреблением, большой перегрузочной способностью, отсутствием ограничений на их угловые перемещения и возможностью использования в любое время суток и года, в любых погодных условиях.

Основными направлениями использования информации ГПЗ для определения местоположения объектов являются:

- расчет траектории космических аппаратов и баллистических ракет наземного и морского базирования;
- коррекция показаний инерциальных навигационных систем (ИНС) подводных лодок, самолетов дальней авиации, крылатых ракет воздушного и морского базирования.

Список критических технологий для военного использования

Важным документом, в котором приводятся технические требования к системам навигации по пространственным полям, является перечень критических военных технологий США – MILITARILY CRITICAL TECHNOLOGIES LIST 2014 (MCTL-2014) [1] (рис. 1).

В разделе 16 Positioning, navigation and time technology (Технологии координатно-временного и навигационного обеспечения) содержится информация о пассивных системах наведения на основе магнитного и гравитационного полей Земли:

- подраздел 16.2 посвящен гравиметрам и гравитационным градиентометрам для наземного или мобильного использования;
- подраздел 16.4 посвящен магнитометрам и магнитным градиентометрам различных видов. Акцент сделан на сверхпроводящем квантовом интерферометре (SQUID), ядерных магнитных резонаторах (NMR), магнитометрах на эффекте Оверхаузера, тонкопленочных магнитных резонаторах (MR), магнитометрах с оптической накачкой.

Навигационные системы на основе магнитного поля Земли

Точность магнитометрических систем навигационного обеспечения (МСНО) зависит от решения следующих основных проблем:

- построение бортовых высокоточных моделей и карт МПЗ;
- уменьшение погрешностей магнитометрических средств;
- разработка методов уменьшения отрицательного влияния возмущений МПЗ;
- разработка методов учета и компенсации магнитных помех самого объекта (рис. 2).

Сравнение корреляционно-экстремальных навигационных систем

Характеристики	Классификация по назначению (объект измерения)				
	Рельеф местности	Радиолокационное и тепловое поля	Оптическое поле	Гравитационное поле	Магнитное поле
Принцип измерения	Высотомеры	Локаторы	Фотоматрицы	Гравиметр, градиентометр	Магнитомер
Точность цифровых карт, м	50	25	10	250	250
Преимущества	Стабильность поля, информативность, легкость измерения	Возможность коррекции по участкам местности на большом удалении от ЛА	Высокая точность	Высокая стабильность	Возможность получения трех составляющих координат
Всепогодность	+	+	+	+	+
Недостатки	Не работает на ровных местностях, влияние радиопомех и углового положения ЛА	Сырые алгоритмы, желательное участие оператора, трудность подготовки эталонов	Работа в видимом диапазоне, суточная и сезонная нестабильность	Сложность измерения	Большое количество возмущающих воздействий

DEPARTMENT OF DEFENSE MILITARILY CRITICAL TECHNOLOGIES LIST (MCTL)  January 2014 Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA		Table of Contents 14.2.1 Resin-Impregnated Fiber Prepregs Based on Fibrous or Filamentary Reinforcements 14-9 SECTION 15—NUCLEAR SYSTEMS TECHNOLOGY Sec. Page 15.1 Flash Radiography 15-1 15.2 Detection of Radioactive Sources 15-9 Figures 15.1.1 Sketch of Point Projection Flash X-Ray Systems 15-2 15.1.2 Basics of Flash Radiography 15-3 15.1.3 Principal of Magnetic Lenses 15-3 15.1.4 Pulsed-Power Single-Pulse X-Ray Source Status 15-4 15.1.5 Physics of Femtosecond Laser Interaction With (a) Solids and (b) Gases 15-7 15.1.6 PHERMEX Two-Frame Camera System 15-8 15.1.7 Various Collimator Designs 15-9 SECTION 16—POSITIONING, NAVIGATION, AND TIME TECHNOLOGY 16.1 Inertial Navigation Systems and Related Components 16-1 16.2 Gravity Meters and Gravity Gradiometers 16-10 16.3 Radio, Acoustic and Data-Based Referenced Navigation (DBRN) Systems 16-13 16.4 Magnetic and Electromagnetic Sensor Systems 16-19 16.5 Precise Time and Frequency 16-25 Figures 16.3.1 Underwater Navigation Using Acoustic Transponders Anchored to Seafloor 16-16 16.3.2 Conceptual Description of a DBRN Systems 16-18 16.5.1 Basic Clock/Oscillator Description 16-27 SECTION 17—INFORMATION-SECURITY TECHNOLOGY 17.1 Cryptologic Technology 17-3 17.2 Network Technology 17-12 17.3 Reliable Software Technology 17-18 Figures 17.3.1 Network Threat Assessment 17-21 17.3.2 Inspection and Test Process 17-23 SECTION 18—SIGNATURE CONTROL TECHNOLOGY 18.1 Low Observable Technologies 18-3 18.2 Counter Low Observable Technologies 18-9 18.3 System Integration Technologies 18-12 Figures 18.0.1 Process for Review of Signature Control Technologies 18-2 18.0.2 Computational Electromagnetics Evolution 18-2 Page x 2014 Militarily Critical Technologies List
---	--	--

Рис. 1. Содержание раздела в MCTL-2014, посвященного технологиям координатно-временного и навигационного обеспечения

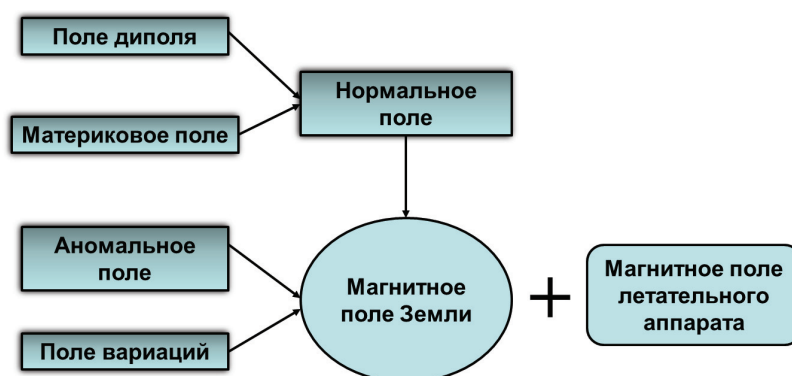


Рис. 2. Составляющие измеряемого магнитного поля

Технология использования магнитных датчиков позволяет измерять величину или направление вектора напряженности магнитного поля или и то и другое вместе. Каждый объект имеет отличительный магнитный профиль, проблема в магнитометрии — как обнаружить и классифицировать профиль или, другими словами, как выделить сигнал из шума. Технология может быть использована для определения координат местоположения и магнитного курса, в том числе с помощью базы данных карт местности.

Магнитометры

По мнению экспертов США перспективные направления использования магнитометров следующие:

1. На основе сверхпроводящего квантового интерферометра (Superconducting Quantum Interference Device — SQUID).

Параметры критической технологии (SQUID-магнитометр должен иметь следующие характеристики):

- магнитометр должен быть разработан для стационарной работы, без подсистем, предназначенных для уменьшения шумов от движения, и имеющий средневзвешенный уровень шума (чувствительность) равный или менее (лучше) 50 fT (фемтотесла 10^{-15}) на частоте 1 Гц;

- иметь средневзвешенный уровень шума в движении (чувствительность) менее 20 pT (пикотесла 10^{-12}) на частоте 1 Гц (специально предназначен для уменьшения шумов от движения).

Основные коммерческие приложения: разведка ресурсов, неразрушающий контроль и медицинская визуализация. Определение химического строения с помощью магнитных маркеров.

2. Основанные на принципе оптической накачки (электронного резонанса) на основе гелия-4, калия, рубидия или цезия.

Параметр критической технологии: оптическая накачка (включая лазерную накачку) магнитометра должна иметь чувствительность менее 20 pT.

Основные коммерческие приложения: разведка ресурсов и обнаружение неразорвавшихся боеприпасов.

3. Основанные на прецессии ядер.

Сверхпроводящие магнитометры — класс устройств, который использует свойства сверхпроводников в сочетании с SQUID, которые используют чувствительность магнитного поля при помощи эффекта Джозефсона [2].

Параметр критической технологии: любой магнитометр на ядерной прецессии (Протон/Оверхаузер) должен иметь средневзвешенный уровень шума менее 20 pT.

Основные коммерческие приложения: разведка ресурсов.

Электронные резонансные магнитометры иногда называют электронно-парамагнитными резонансными (ЭПР) магнитометрами или более общим названием — магнитометры с оптической накачкой. За пределами США их часто называют «квантовые магнитометры». Из-за относительно высоких резонансных частот электронного резонанса магнитометры гораздо меньше зависят от ошибок скорости вращения, чем устройства на базе ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Это, в сочетании с их собственной относительной нечувствительностью к ориентации, делает их хорошими вариантами для работы на движущихся платформах.

4. Прочие виды магнитометров, отраженные в документе:

1) магнитометры на основе индукционной катушки имеют уровень чувствительность выше, чем:

- 0,05 нТл на частотах до 0,1 Гц;
- 1×10^{-3} нТл на частотах 1 Гц и более, но не более 10 Гц;
- 1×10^{-4} нТл на частотах более 10 Гц с уровнем шума менее 0,05 нТл на частотах менее 10 Гц или 1×10^{-4} нТл на частотах более 10 Гц;

2) магнитометры-феррозонды имеют уровень чувствительность выше 20 пТ (10^{-12});

3) оптоволоконные магнитометры имеют уровень чувствительность выше 1,0 нТл.

Магнитные градиентометры

Магнитные градиентометры измеряют скорость изменения градиента магнитного поля. Принцип действия основан на сравнении сигналов пары магнитометров, размещенных на определенном расстоянии друг от друга. Требования к чувствительности магнитных градиентометров следующие:

1) чувствительность градиента магнитного поля не менее 0,3 нТл/м;

2) чувствительность излучателя магнитного поля не менее 0,015 нТл/м.

Навигационные системы на основе гравитационного поля Земли

Основные понятия гравиметрии

Перспективным направлением использования информации о гравитационном поле Земли является информационное обеспечение корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭНС) по аномальному ГПЗ.

Данные о параметрах ГПЗ (первая производная гравитационного потенциала — ускорение свободного падения (УСП) и вторые производные гравитационного потенциала, включая вертикальный градиент УСП) представляются дополнительным источником информации о геофизических полях, используемых в навигационных системах управляемых ракет.

Потенциальным преимуществом гравиметрических навигационных систем (ГрНС) является высокая помехозащищенность (только значительные перераспределения масс могут изменить гравитационное поле на маршруте движения управляемых ракет) и возможность работы над океаном.

Следует, тем не менее, иметь в виду наличие неприливных временных вариаций гравитационного поля, обуславливающих его нестабильность на отдельных участках земной поверхности.

Основой современного состояния геодезического и гравиметрического обеспечения является модернизированная Система геодезических параметров (СГП) «Параметры Земли 1990 года» (последняя версия 2011 г. — ПЗ-90.11).

Существуют отечественные и зарубежные модели гравитационного потенциала Земли (ГПЗ). Отечественные — ПЗ-90 и ГАО-98 (ЦНИИГАиК). Предполагается, что на территории России они точнее представляют гравитационное поле, поскольку построены с учетом данных закрытой советской гравиметрической съемки. Зарубежные модели появляются несколько раз в год, собираются в открытом доступе на сайте International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [3] (рис. 3). В разделе «Table of Models» можно увидеть последние опубликованные модели Global Gravity Field Models (рис. 4).

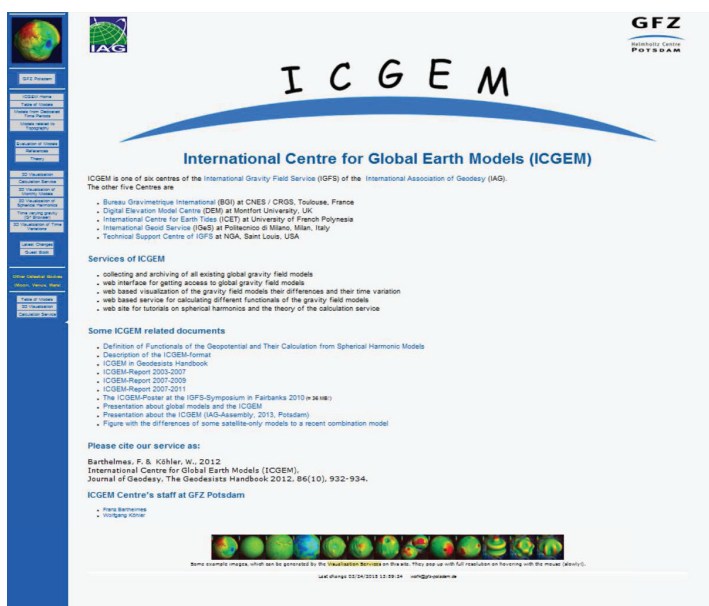


Рис. 3. Страница Международного центра глобальных моделей Земли

Nr	Model	Year	Degree	Data	Reference	download	calculate	show doi
153	GGM05C	2016	360	S(Grace,Goce),G,A	Ries et al, 2016	gfc zip	calculate	show ✓
152	GECO	2015	2190	S(Goce),EGM2008	Gilardoni et al, 2015	gfc zip	calculate	show
151	GGM05G	2015	240	S(Grace,Goce)	Bettadpur et al, 2015	gfc zip	calculate	show
150	GOCO05s	2015	280	S(see model)	Mayer-Gürr, et al. 2015	gfc zip	calculate	show
149	GO_CONS_GCF_2_SPW_R4	2014	280	S(Goce)	Gatti et al, 2014	gfc zip	calculate	show
148	EIGEN-6C4	2014	2190	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2015	gfc zip	calculate	show ✓
147	ITSG-Grace2014s	2014	200	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2014	gfc zip	calculate	show
146	ITSG-Grace2014k	2014	200	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2014	gfc zip	calculate	show
145	GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	2014	280	S(Goce)	Brockmann et al, 2014	gfc zip	calculate	show
144	GO_CONS_GCF_2_DIR_R5	2014	300	S(Goce,Grace,Lageos)	Bruinsma et al, 2013	gfc zip	calculate	show
143	JYY_GOCE04S	2014	230	S(Goce)	Yi et al, 2013	gfc zip	calculate	show
142	GOGRA04S	2014	230	S(Goce,Grace)	Yi et al, 2013	gfc zip	calculate	show
141	EIGEN-6S2	2014	260	S(Goce,Grace,Lageos)	Rudenko et al. 2014	gfc zip	calculate	show
140	GGM05S	2014	180	S(Grace)	Tapley et al, 2013	gfc zip	calculate	show
139	EIGEN-6C3stat	2014	1949	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2012	gfc zip	calculate	show
138	Tongji-GRACE01	2013	160	S(Grace)	Shen et al, 2013	gfc zip	calculate	show

Рис. 4. Глобальные гравитационные модели Земли (Global Gravity Field Models) (только 2013–2016 гг. по состоянию на 22.03.2016)

Информация об особенностях гравиметрии:

— некомпенсированные гравитационные возмущения, вызванные открытием и последующей эксплуатацией месторождений, являются источником больших ошибок инерциальных навигационных систем (ИНС). Эволюция гравитационной модели позволяет лучше компенсировать ошибки ИНС;

— использование базы данных всемирной гравитации обеспечивает автономное и непрерывное обновление данных для ИНС, но прогнозируемо уступает по точности и уровню шума в сравнении с системами ИНС/GPS для коротких временных интервалов;

— гравиметры и точно упорядоченная во времени сеть градиентометров в совокупности с высокопроизводительным вычислителем и требуемой памятью могут обеспечить повышение эффективности слежения за мобильными (в том числе подводными) объектами, шахтами, тоннелями и т.п.

Гравиметры

По назначению гравиметры делятся на следующие типы:

1. Гравиметры для измерения величины ускорения силы тяжести на неподвижной платформе.

Параметры критической технологии — любой гравиметр, разработанный или модифицированный для наземного использования, должен иметь одно из следующих свойств:

- статическую точность выше 0,1 мГал;
- иметь в своем составе акселерометр или гироскоп, что имеет решающее значение в военном применении.

2. Гравиметры для измерения величины ускорения силы тяжести на мобильной платформе.

Параметры критической технологии — любой гравиметр, разработанный или модифицированный для мобильного использования, должен иметь одно из следующих свойств:

- статическую точность выше 10 мГал;
- иметь в своем составе акселерометр или гироскоп, что имеет решающее значение для военного применения.

Основные коммерческие приложения гравиметров — геодезическое картирование, разведка месторождений и определение масс (аномалий).

Для измерения величины ускорения силы тяжести гравиметр может быть использован на статическом или динамическом основании. В статической среде гравиметр способен измерять гравитацию Земли (в настоящее время достижима точность порядка от единиц до десяти миллигал). Для измерений с подвижной платформы должны быть использованы методы компенсации для удаления шума, вызываемого движением (ускорением) платформы, и шума, вызываемого массой прибора. Фильтрация или сглаживание при измерении по ходу движения удаляет часть шума, но вместе с тем не позволяет учитывать коротковолновые составляющие гравитационного поля.

Гравитационные градиентометры

Градиенты — вторые частные производные от гравитационного потенциала (W) образуют элементы Этвеш-тензора (или тензора градиента гравитации). Производная от ускорения свободного падения (g) есть градиент гравитации. В своей простейшей форме градиентометр представляет собой набор гравиметров, разделенных фиксированным расстоянием, где градиент — разница в значениях полей, измеренных гравиметрами. В 1886 г. барон фон Этвеш предложил инструмент, в котором две гири были подвешены на крутящихся нитях, на разных высотах. Поскольку веса были разнесены по вертикали и по горизонтали, на них действовали различные силы.

По назначению гравитационные гравиметры делятся на следующие типы:

1. Гравитационные гравиметры для измерения величины ускорения силы тяжести на неподвижной платформе.

Параметры критической технологии — любой гравитационный градиентометр для наземного использования, должен отвечать одному из следующих условий:

- возможность работы на статичной площадке с уровнем шума менее чем 1,0 Этвеш;
- иметь в своем составе акселерометры или гироскопы, что критично для военного использования.

«Этвеш» — внесистемная единица градиента ускорения свободного падения. Равна такому градиенту, какой имеет место при изменении ускорения свободного падения на величину 10^{-6} м/с², происходящего при изменении высоты на 1 км.

Основные коммерческие приложения: геодезическое картирование, разведка месторождений; обнаружение грузов и весов в движении; повышение добычи нефти; обнаружение туннелей.

2. Гравитационные гравиметры для измерения величины ускорения силы тяжести на мобильной платформе.

Параметры критической технологии — любой гравитационный градиентометр для наземного использования, должен отвечать одному из следующих условий:

- возможность работы на статичной площадке с уровнем шума менее чем 300 Этвеш;
- иметь в своем составе акселерометры или гироскопы, что критично для военного использования.

Основные коммерческие приложения: геодезическое картирование, разведка месторождений, определение масс, обнаружение грузов, туннелей и перемещения масс.

Первые мобильные измерения с использованием гравитационного градиентометра были сделаны ВВС США (система GGSS) в 1980 гг. [4].

Зарубежные программы в области измерения гравипотенциала Земли

Малый космический аппарат CHAMP

CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload) — это немецкий малый аппарат, предназначенный для изучения геоатмосферной физики (рис. 5). Масса — 522 кг, длина — 8,33 м, проработал на орбите десять лет два месяца и четыре дня (2000—2010 гг.).

Основной задачей аппарата являлась съемка параметров магнитного и гравитационного полей Земли.

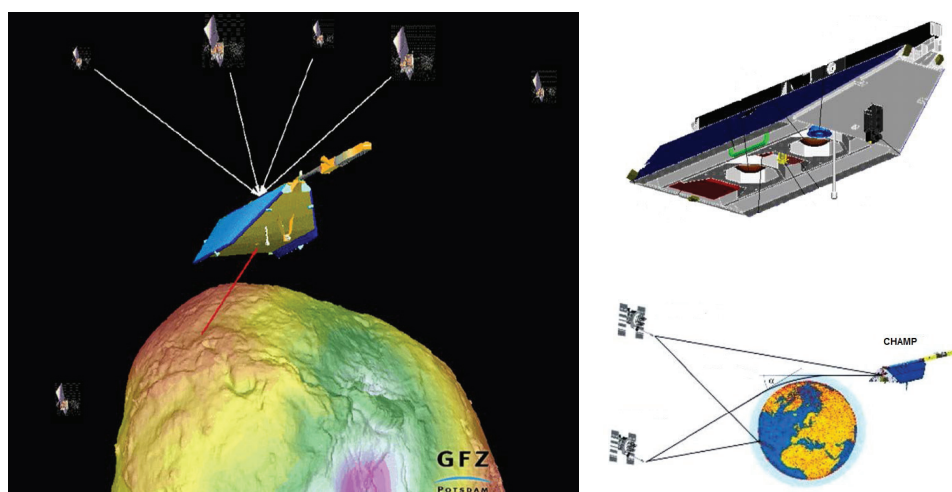


Рис. 5. Малый космический аппарат CHAMP

Космический аппарат GRACE

GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) — спутниковая миссия, направленная на изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций, связанных, в частности, с процессами изменения климата (рис. 6). Программа NASA картографирует гравитационное поле, измеряя положение двух идентичных спутников, находящихся на полярной орбите на высоте 500 км. Спутники были запущены с космодрома Плесецк 17 марта 2002 г.

Спутники пролетают над каждым участком Земли приблизительно раз в месяц, что позволяет проследивать естественные перемещения масс (преимущественно связанные с круговоротом воды в природе). По данным GRACE была построена наиболее точная на данный момент карта глобального гравитационного поля Земли. В 2006 г. по данным GRACE было обнаружено в Антарктиде геологическое образование диаметром около 480 км (Кратер Земли Уилкса).

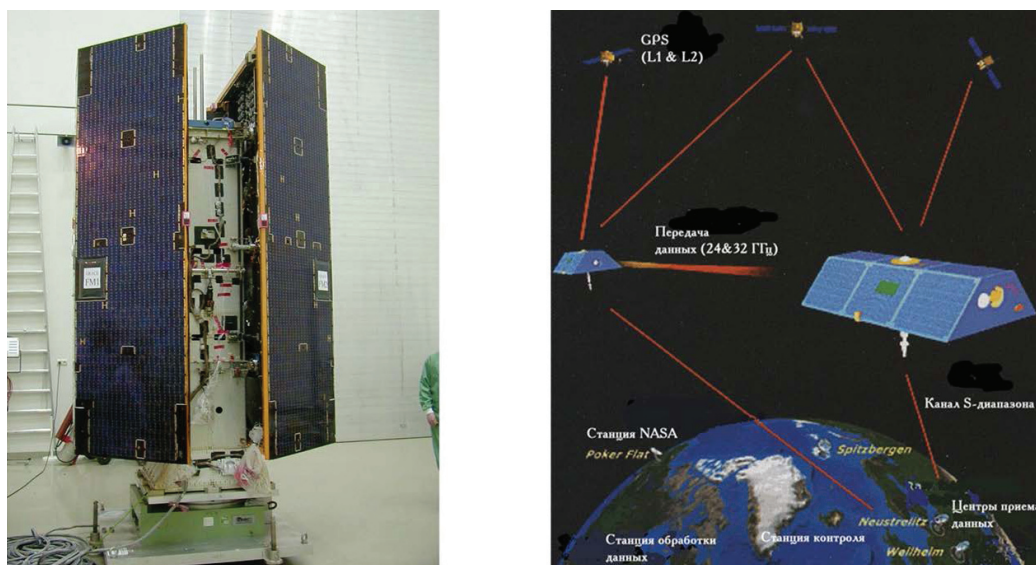


Рис. 6. Космический аппарат GRACE

Космический аппарат GOCE

Спутник GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) – исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений (рис. 7).

Запущен 17.03.2009 г. с космодрома Плесецк. Миссия закончена 11.11.2013 г. Главной полезной нагрузкой спутника был электростатический гравитационный градиометр, в котором тензорный гравитационный вариометр выполнен в виде шести попарно и ортогонально расположенных трехосных акселерометров ONERA.

Низкая орбита спутника (около 260 км) и высокая точность акселерометров в 10^{-12} м/с² позволили к окончанию наблюдений улучшить точность определения геоида до 1–2 см на масштабах порядка 100 км. Для компенсации атмосферного торможения и других негравитационных воздействий на спутнике был установлен непрерывно работавший ионный двигатель, использовавший для создания импульса ионизированные атомы ксенона.

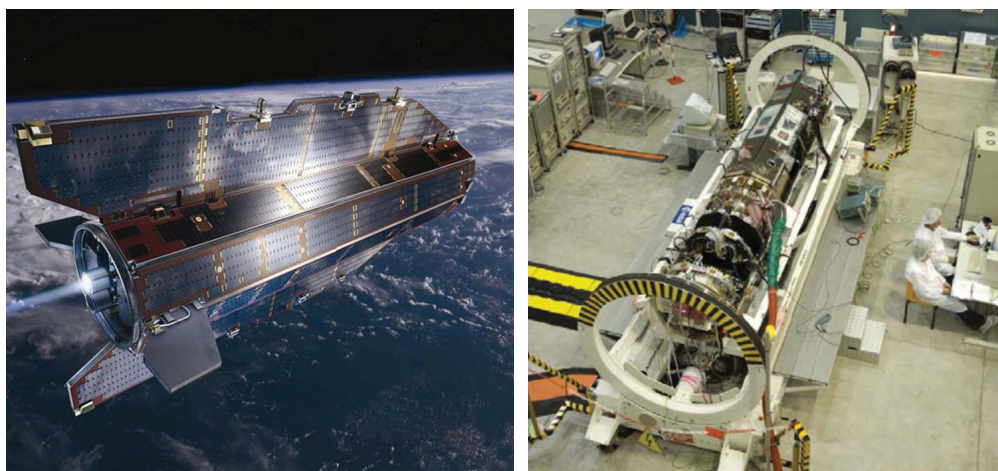


Рис. 7. Космический аппарат GOCE

Проект GRAIL

Реализованный проект GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) – программа изучения гравитационного поля и внутреннего строения Луны, реконструкции ее тепловой истории. GRAIL позволит получить более полную информацию о формировании Луны и других твердых планет Солнечной системы. Эта миссия подобна ранее начатому проекту GRACE, изучавшему гравитационное поле Земли (рис. 8).

Программа реализовывалась парой космических аппаратов («Эбб» и «Флоу» («прилив» и «отлив»)), которые были запущены 10 сентября 2011 г. с помощью ракеты Delta II.

Аппараты работали на орбите высотой 55 км, затем были снижены до орбиты высотой около 23 км. Это позволило получить более точные карты гравитационного поля Луны. Зонды врезались в лунную поверхность 18 декабря 2012 г. и тем самым закончили свое функционирование.

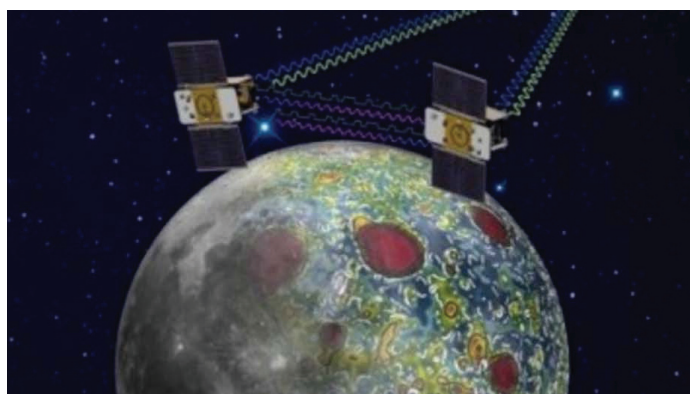


Рис. 8. Реализованный проект GRAIL

Проект Японии Kaguya

Реализованный проект Японии Kaguya (SELENE – SELEnological and ENgineering Explorer – селенологический и инженерный зонд) (рис. 9) с двумя отделяемыми космическими аппаратами «Окина» (первоначально назывался «Rstar» и «Оюна» (первоначально называвшийся «Vstar»)) массой по 53 кг каждый на высоте ~100 км. Запуск осуществлен 14.09.2007 г.

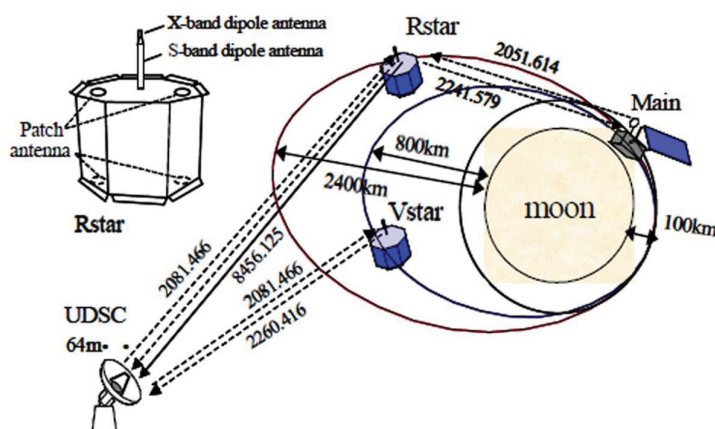


Рис. 9. Реализованный проект Японии Kaguya

Научная программа зонда «Kaguya» дала возможность составить топографическую карту Луны с разрешением около 15 км. При помощи вспомогательного спутника «Окина» удалось составить карту гравитационного поля на обратной стороне Луны. Также полученные данные позволили сделать выводы о затухании вулканической активности Луны 2,84 млрд лет назад.

Примеры зарубежных гравиградиентометров

Примеры конструктивных исполнений зарубежных гравиградиентометров представлены на рис. 10–12.



Рис. 10. Гравиградиентометры Lockheed Martin, стабилизированная платформа и система электроники



Рис. 11. Сверхпроводящий гравиградиентометр Британской компании ARKeX (разрешение: 1 Этвеш/ $\sqrt{\text{Гц}}$)

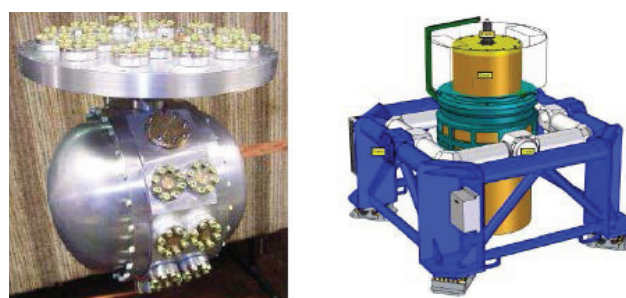


Рис. 12. Гравитационный градиентометр Университета Западной Австралии (UWA) (разрешение 1 Этвеш/ $\sqrt{\text{Гц}}$)

Заключение

В России отсутствует производство ключевых высокоточных измерительных элементов систем навигации по гравитационному полю: бортовых средств, наземных гравиметрических средств, а также космических гравиметрических средств, необходимых для подготовки навигационных карт ГПЗ вдоль маршрутов навигации (в особенности за пределами территории Российской Федерации).

По данным зарубежной печати бортовые гравитационные измерители вторых производных потенциала силы тяжести уже используются для автономной навигации подводных лодок США. Известны проекты использования авиационных гравитационных градиентометров различных модификаций в геофизической разведке с перспективой снижения погрешности измерений от современных 15 до 0,5 Этвеш к 2025–2050 гг.

В связи с этим необходимо развертывание научных исследований по следующим направлениям:

- разработка высокоточного бортового гравитационного градиентометра;
- разработка высокоточного мобильного относительного гравиметра;

- разработка высокоточных космических гравиметрических средств: альтиметров, гравитационных градиентометров, а также измерителей по линии «спутник-спутник»;
- разработка средств подготовки навигационных карт параметров ГПЗ, имеющих несколько информационных слоев (например, аномалии силы тяжести, гравитационными градиентами и пр.).

Необходимым представляется создание национальной системы мониторинга геофизических полей в реальном режиме времени и функционирование ее не только в интересах Минобороны России, но и на коммерческой основе.

Проведение работ по съемке геофизических полей территории Российской Федерации и прилегающих территорий позволит обеспечить потребности военного назначения в режиме реального времени, среди них наиболее важные:

- картирование районов (зон) применения КЭНС по магнитному и гравитационному полям Земли для всего спектра летательных аппаратов;
- применение геоинформационных технологий позволит создать цифровые карты, содержащие информацию об аномалиях геомагнитного поля с рельефом местности и расположением объектов, интересующих потребителя. Это может кардинально улучшить надежность технологий позиционирования военного и двойного назначения;
- обеспечение ИНС летательных аппаратов, морских судов необходимыми данными для автономного функционирования в условиях применения противником методов радиоэлектронной борьбы.

Статья подготовлена по материалам научно-исследовательской работы, выполненной ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по заданию № 2.46.2016/НМ Минобрнауки России на выполнение работ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Militarily Critical Technologies List – MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA, 2014.
2. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometers>.
3. Available at: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>.
4. Jekeli C. Система гравитационных градиометрических обследований (GGSS), EOS, 69, 105, pp. 116–117, 1988.
5. Defense Technical Information Center. Available at: <http://www.dtic.mil>.
6. Корчак В.Ю., Тушиков У.З., Бочаров Л.Ю. Американская программа «Критические военные технологии. Электроника: наука, технология, бизнес» № 5 (00127) 2013. Available at: http://www.labrate.ru/20141021/article_3785_122.pdf.

References

1. (2014) Militarily Critical Technologies List MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA.
2. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometers>.
3. Available at: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>.
4. Jekeli C. (1988) System of radiometric gravity surveys (GGSS), EOS, 69, 105, pp. 116–117.
5. Defense Technical Information Center. Available at: <http://www.dtic.mil>.
6. Korchak V.Yu., Turikov W.Z., Bocharov L.Y. (2013) *Amerikanskaya programma «Kriticheskie voennye tekhnologii: Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes»* [American program «Critical military technologies electronics: science, technology, business»], No. 5 (00127). Available at: http://www.labrate.ru/20141021/article_3785_122.pdf.