

УДК 681.783

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПУТНИКОВОЙ  
АКСЕЛЕРОМЕТРИИ И ГРАДИЕНТОМЕТРИИ****В.Б. Дубовской<sup>1</sup>, М.Ю. Беляев<sup>2</sup> В.И. Леонтьев<sup>1</sup>, А.Б. Манукин<sup>3</sup>,  
С.С. Обыденников<sup>4</sup>, В.Г. Пшеняник<sup>5</sup>**<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,* <sup>2</sup> *РКК "Энергия",*<sup>3</sup> *ИКИ РАН,* <sup>4</sup> *ФГУП ЦНИИМаш,* <sup>5</sup> *НИИ космических систем имени А.А.Максимова**филиал "ГКНПЦ им. М.В.Хруничева".**e-mail: Dubovskoi@yandex.ru*

*Рассмотрено современное состояние спутниковой акселерометрии и градиентометрии, широкий круг фундаментальных и прикладных задач, решаемых с помощью этих приборов, дальнейшее их совершенствование, аттестация их в наземных условиях и перспективы использования для дистанционного зондирования Земли.*

*Ключевые слова: спутниковая акселерометрия, градиентометрия, дистанционное зондирование Земли*

Важнейшие элементы дистанционного зондирования Земли могут быть получены с помощью акселерометров и организованных на их основе градиентометров. На базе спутниковой акселерометрии и градиентометрии может быть решен широкий круг прикладных и фундаментальных проблем. К прикладным относятся следующие задачи: 1) уточнение модели глобального гравитационного поля Земли, 2) изучение внутреннего строения Земли, 3) изучение океанических циркуляций, 4) уточнение модели атмосферы Земли и изменения климата Земли, 5) предсказание природных катастроф, 6) прогноз орбиты спутника и увеличение срока жизнедеятельности КА за счет оптимизации коррекции орбиты, 7) инерциальная навигация, 8) исследование эффективности тросовых систем и т.д. К фундаментальным научным задачам относятся следующие: 1) исследование релятивистских гравитационных эффектов при движении спутников вокруг Солнца, например, задержка электромагнитных импульсов в гравитационном поле Солнца; 2) измерение релятивистской прецессии гироскопа, требующее высокоточной компенсации негравитационных ускорений; 3) экспериментальная проверка оценок Дирака по изменению гравитационной постоянной с относительной скоростью  $3 \cdot 10^{-11}$ /год по дрейфу периода обращения спутника, движущегося по геоцентрической орбите с регистрацией негравитационных ускорений с точностью  $10^{-11}$ g; 4) обнаружение гравитационных волн с использованием спутников в качестве пробных масс в гравитационных антеннах; 5) проверка принципа эквивалентности и т. д.

Анализ отечественных и зарубежных работ, посвящённых проблеме измерения параметров движения подвижных объектов, показывает, что к настоящему времени разработана и широко применяется достаточно многочисленная номенклатура средств измерения постоянных и переменных скоростей и ускорений, основанная на различных принципах (локационном, *Альманах современной метрологии, 2015, №3*

химотронном, гироскопическом и др.). Среди них на первое место, и не без основания, выдвинулась группа низкочастотных инерциальных акселерометров, обладающих более высокой точностью, помехозащищённостью и сравнительно малой зависимостью от возмущающих факторов. При этом, несмотря на то, что сама идея построения инерциальных акселерометров (ньютометров) была сформулирована ещё в 20 - 30-х годах прошлого столетия, практическую реализацию она начала находить лишь в 50-е годы.

Именно с этих пор данный подход получил бурное развитие как в теоретическом, так и техническом аспектах, причём, как для обычного диапазона измерения ускорений, так и для диапазона измерения малых и сверхмалых величин. В итоге, для нужд обычного диапазона была создана широкая номенклатура самых разнообразных акселерометров, получивших широкое применение в инерциальных системах управления и навигации самыми различными объектами. В то же время применительно к диапазону измерения малых и сверхмалых величин всё обстоит гораздо хуже. Это легко объяснимо, так как существенное повышение чувствительности инерциальных приборов (речь идёт о повышении их чувствительности на пять, шесть и более порядков) требует чрезвычайных усилий и затрат. Сюда входит разработка специальных конструкторских и технологических решений по созданию и изготовлению высокочувствительных микроакселерометров (МкА) и полномасштабное развёртывание системы метрологического обеспечения измерения ускорений на диапазон измерения малых и сверхмалых величин.

Таблица 1  
Технические и метрологические характеристики МкА для КА

| № п/п | Микроакселерометр (МкА), объект установки (КА)   | Год начала применения, страна-производитель | Чувствительный элемент (ЧЭ) МкА, его основные параметры  | Система подвеса ЧЭ МкА (краткая характеристика) | Основные метрологические характеристики МкА   | Краткая характеристика целевой направленности результатов применения МкА  |
|-------|--|---|--|---|---|---|
|       | 1  | 2   | 3  | 4   | 5   | 6   |
| I.    | МкА в составе автономной системы компенсации для неорентированных КА «CANNON BALL» и КА «Атмосферик Эксплорер» | 1971, США                                   | КА фактически представлял собой МкА. Он имел форму шара диаметром 66 см и массой 363 кг. Внешняя оболочка КА имела массу 308 кг и была изготовлена из латуни | Электростатический подвес компенсационного типа | Трёхосный измеритель. Чувствительность (порог чувствительности) составляла $\sim 10^{-7}$ g | Измерение и компенсация негравитационных ускорений, в том числе для обеспечения функционирования КА на низких орбитах, вплоть до 115 км |

## Продолжение таблицы 1

|    |   |                               |  |   |   |  |
|----|---|-------------------------------|--|---|---|--|
| 2. | МКА «Кактус», «Супер-Кактус» для КА «Кастор»                        | 1975, Франция                 | ЧЭ имел форму шара диаметром 38 мм и массой 570 г  | Электростатический подвес компенсационного типа   | Трёхосный измеритель. Чувствительность (порог чувствительности) составляла $10^{-7}$ g. Нелинейная градуировочная характеристика. Имел систему точной центровки центра масс ЧЭ МКА    | Аэрономические исследования (аэродинамическое торможение, давление солнечных лучей, регистрация столкновений с метеорными частицами и др.)   |
| 3. | МКА в составе автономной системы компенсации «Дискос» для КА «NOVA» | 1981, США                     | ЧЭ имел форму шара диаметром 22 мм и массой 111 г., был изготовлен из материалов высокой плотности и почти нулевой магнитной восприимчивости | Электростатический подвес компенсационного типа   | Трёхосный измеритель. Чувствительность (порог чувствительности) достигала $10^{-9}$ g   | Обеспечение движения навигационного КА строго по орбитам, определяемым только гравитационными силами   |
| 4. | МКА «MESA» для экспериментов на МКК «Шаттл»                         | 1991, США                     | МКА является миниатюрным и его ЧЭ имеет форму цилиндра   | Электростатический подвес компенсационного типа   | Одноосный измеритель, входящий в состав акселерометрического блока высокого разрешения из трёх однотипных приборов. Чувствительность (порог чувствительности) составляет $10^{-8}$ g. | Исследование сил негравитационной природы, изменяющих траекторию движения МКК «Шаттл» на этапе спуска с орбиты в диапазоне высот 60 - 300 км. Обеспечение микрогравитационных исследований |
| 5. | СИ «ИМУ-128» для РС МКС   | 1997, Россия                  | Маятник прямоугольной формы  | Струнный подвес прямого преобразования            | Трёхосный измеритель, диапазон измерения 10-1 - 10-6 g, порог чувствительности 10-7 g   | Мониторинг динамической обстановки и контроля условий микрогравитации на МКС   |
| 6. | МКА «МАСЕК» для микроспутника «MIMOSA»                              | 2003, Чехия                   | МКА является миниатюрным и его ЧЭ имеет форму шара   | Электростатический подвес компенсационного типа   | Трёхосный измеритель. Чувствительность (порог чувствительности) составляет 10-11 g. Имеет два поддиапазона измерения  | Уточнение моделей верхней атмосферы, ГПЗ, солнечной радиации, теплового излучения Земли и др.  |
| 7. | МКА «ДИМАК» для КА «Фотон - М» № 3                                  | октябрь 2007, Евросоюз        | Сведения отсутствуют   | Сведения отсутствуют                              | Заявленная чувствительность (порог чувствительности) 10-5 - 10-6 g  | Измерение микроускорений в интересах проведения ряда экспериментов в области разработки новых технологий   |
| 8. | МКА для микроспутника «DEMETER»                                     | март 2008, Евросоюз           | Сведения отсутствуют   | Сведения отсутствуют                              | Заявленная чувствительность (порог чувствительности) 10-13 g  | Обеспечение эксперимента по проверке важнейшего положения теории гравитации - принципа эквивалентности гравитационной и инерционной масс   |
| 9. | МКА для спутника «GOCE»   | март 2009, Франция, ФРГ, Итал | Сведения отсутствуют   | Электростатические сервоуправляемые акселерометры | Заявленная чувствительность (порог чувствительности) 10-13 g  | Предназначен для измерения производных силы тяжести в трех взаимно ортогональных направлениях.   |

Основные данные по наиболее известным МкА для космических аппаратов (КА), с указанием их основных технических и метрологических характеристик, которые удалось собрать и систематизировать из самых различных, порой достаточно противоречивых источников, сведены в таблицу 1.

Параллельно с разработкой высокочувствительных акселерометров остро встает проблема создания новой системы метрологического обеспечения.

Одной из важных характеристик является определение смещения нуля акселерометра. Смещение нулевого отсчета зависит, в первую очередь, от технологии изготовления акселерометра и определяется расчетным и экспериментальным путем. Экспериментально смещение нуля может определяться с использованием стенда свободного падения (метод "тело в теле"). В ИФЗ РАН был создан макет стенда свободного падения. Акселерометр помещался в специальный контейнер с телеметрической системой приема и передачи информации. Аналоговый сигнал от прибора преобразуется в цифровой с помощью АЦП и поступает в передатчик. Сигнал от приемника поступает в ПК, где происходит обработка сигнала.

На рис. 1 приведен фрагмент свободного падения контейнера с акселерометром и телеметрической системой передачи информации в одной из серии экспериментов.

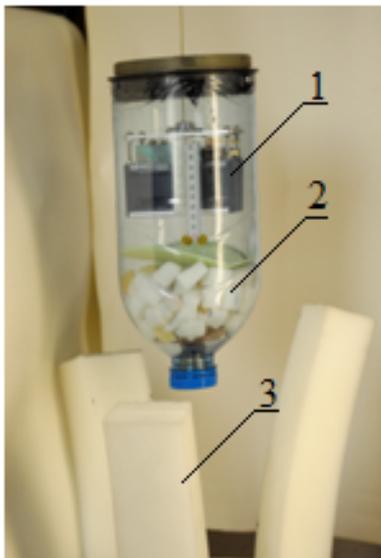


Рис. 1 Фрагмент свободного падения микроакселерометра:

1-датчик микроускорений с телеметрической системой передачи информации; 2-внешний контейнер; 3- приемное устройство (ловушка)

Расстояние от точки отрыва контейнера с испытываемым прибором до ловушки ( $h$ ) равно 208 см, время свободного падения ( $t_0$ ) равно 0,652с, время торможения составляет 0,3 с на пути 0,5 м, а ускорение торможения имеет величину 4g.

При свободном падении этой сборки акселерометр начинает опережать контейнерную конструкцию в силу того, что, в первом приближении, он не испытывает влияния набегающего потока воздуха.

Ускорение внешнего контейнера  $\ddot{x}$  с учетом действия силы трения воздуха во время полета можно рассчитать по формуле:

$$\ddot{x} = \frac{\rho S_k \dot{x}^2}{m_k} = g \frac{2h \rho S_k}{m_k} = 0.104g,$$

где  $\rho$  - плотность воздуха,  $\dot{X}$  - скорость контейнера,  $S_k$  - площадь лобового сечения контейнера,  $m_k$  - масса контейнера,  $h$  - высота свободного падения. При  $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ,  $S_k = 169 \text{ см}^2$ ,  $m_k = 1,1 \text{ кг}$  и, соответственно, при  $h = 208 \text{ см}$  и времени свободного падения  $t = 0,652 \text{ с}$  величина ускорения внешнего контейнера составляет  $\ddot{X} = 0,104g$ .

Несложные вычисления приводят к следующему выражению для расчета ускорения акселерометра внутри контейнера:

$$\ddot{X} = \frac{g^4 t^6 \rho^3 S_k^2 S_a}{9 m_k^2 m_a} = \frac{8 h^3 \rho^3 S_k^2 S_a}{9 m_k^2 m_a} g = 5,3 \cdot 10^{-8} g,$$

где  $S_a$  - лобовое сечение акселерометра,  $m_a$  - масса акселерометра соответственно и имеют величины  $S_a = 77 \text{ см}^2$  и  $m_a = 0,4 \text{ кг}$ .

Таким образом, смещение акселерометра  $d$  относительно контейнера за время полета составит:

$$d = \frac{g^4 t^4 S_k \rho}{m_k} = \frac{4 h^2 S_k \rho}{3 m_k} = 2,6 \text{ см}.$$

Поскольку стенки внешнего контейнера прозрачные, расчетное смещение может быть легко проконтролировано в эксперименте с помощью видеосъемки, что подтверждается измеренным смещением (рис. 1).

Кроме ускорения, обусловленного торможением акселерометра в контейнере, на него действует центробежное ускорение  $\ddot{X}_c$  из-за вращения акселерометра, равное:

$$\ddot{X}_c = \frac{\alpha^2}{t^2} r = 2 \cdot 10^{-7} g,$$

где  $\alpha$  - измеренный угол поворота акселерометра (рис. 1) относительно вертикали за время падения, равный  $0,01 \text{ рад}$ ,  $r$  - расстояние центра масс пробного тела относительно центра тяжести акселерометра, которое было равно  $1 \text{ см}$ .

Таким образом, минимально достижимое ускорение акселерометра при использовании конструкции "тело в теле" составляло величину  $2 \cdot 10^{-7} g$ .

Учет угла поворота акселерометра в процессе свободного падения даст возможность довести поправку за центробежное ускорение до величины  $5 \cdot 10^{-8} g$ .

На рис. 2 приведены результаты серии экспериментов по определению смещения нуля акселерометра в свободном падении методом "тело в теле".

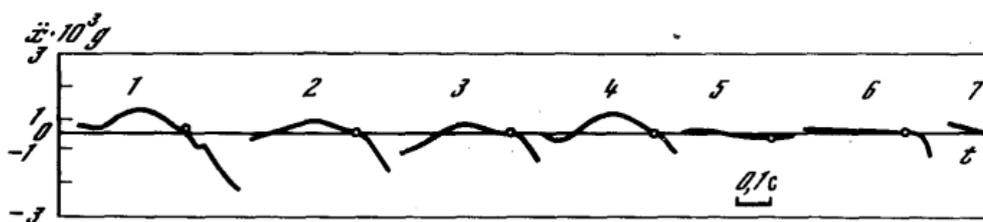


Рис. 2. Результаты серии определений смещения нуля микроакселерометра методом свободного падения

На приведенном графике показан реальный сигнал датчика микроускорений без учета поправки на угол поворота акселерометра в процессе свободного падения.

Не менее сложной проблемой при тестировании микроакселерометров является определение собственных шумов, которые обусловлены следующими факторами:

- шумами датчика перемещения;
- термодинамическим шумом;
- взаимодействием перекрестных ускорений;
- шумами электронных элементов в цепи обратной связи;
- воздействием на пробное тело переменных магнитных полей.

Определение суммарной шумовой характеристики датчика микроускорений в наземных условиях в значительной степени затруднено из-за наличия высокого фона природных микросейсм и техногенных помех. В ряде случаев уровень возмущающих ускорений может превышать измерительный диапазон акселерометра.

Средством значительного снижения уровня возмущающих ускорений является пассивная антисейсмическая платформа, которая позволяет уменьшить уровень возмущающих ускорений на высоких частотах в сотни раз. В табл. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики возмущающих ускорений для разных условий наблюдений, а также возможности их уменьшения с помощью антисейсмической платформы.

Таблица 2

Частотная зависимость амплитуды возмущающих ускорений для разных условий наблюдений

| Частота, Гц                | 100         | 50                  | 10                  | 0.15                   |
|----------------------------|-------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Промышленные районы        | $10^{-4} g$ | $7 \cdot 10^{-5} g$ | $2 \cdot 10^{-5} g$ | $2-30 \cdot 10^{-8} g$ |
| Тихие районы               | $10^{-5} g$ | $7 \cdot 10^{-5} g$ | $3 \cdot 10^{-6} g$ | $2-30 \cdot 10^{-8} g$ |
| Антисейсмическая платформа | $10^{-6} g$ | $2 \cdot 10^{-6} g$ | $10^{-6} g$         | $2-30 \cdot 10^{-8} g$ |

Одна из реализаций такой платформы в ИФЗ РАН представлена на рис. 3.

Антисейсмическая платформа является физическим маятником и состоит из жесткой платформы, подвешенной на четырех струнах, выполненных из инвара, с длиной 2,2 метра и демпфера, обеспечивающего затухание маятника с добротностью 0,7. Собственный период - 3 секунды. Антисейсмическая платформа (рис. 3) помещена в герметичный контейнер, защищающий устройство от конвективных потоков воздуха и обеспечивающий подавление высокочастотных шумов на уровне 6 децибел на октаву.



Рис.3. Внешний вид антисейсмической платформы с акселерометрами

Для акселерометров маятникового типа на торсионных подвесах объективным показателем уровня собственных шумов является разность показаний двух идентичных акселерометров, оси которых ориентированы в одном направлении. Принципиальным является идентичность амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик приборов и ориентирование их осей чувствительности параллельно друг другу. Так как при испытаниях оба прибора находятся под воздействием одних и тех же остаточных ускорений, разностный сигнал характеризует верхний предел собственных шумов акселерометров данного типа.

Два образца акселерометра устанавливались на регулируемых площадках антисейсмической платформы в противофазе, при этом их оси чувствительности были параллельны с погрешностью не хуже 10 угл. мин. (для оценки шумовых характеристик на уровне  $10^{-9}g$ ).

Шумовые характеристики прибора определялись с использованием двух АЦП (для каждого прибора - отдельный) и ПК со специальным программным обеспечением.

Суммарный сигнал двух акселерометров (ДМУ) (рис.4) является объективной характеристикой верхнего предела шумов [1].

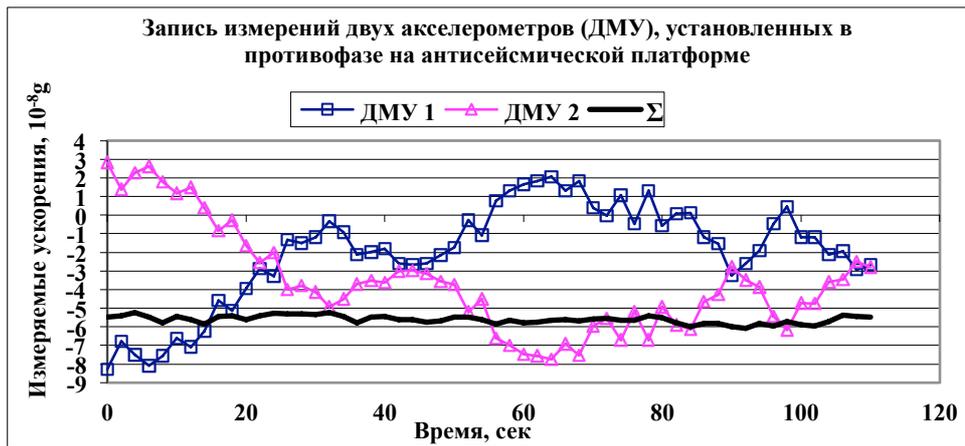


Рис.4. Измерения ускорений двумя акселерометрами, установленными в противофазе на антисейсмической платформе

При измеряемых ускорениях с величиной в диапазоне  $\pm 5 \cdot 10^{-8}g$  амплитуда разностного сигнала двух акселерометров составила величину  $\pm(1-2) \cdot 10^{-9}g$ , что и является верхним пределом шумовых характеристик испытываемых приборов.

Эффективность разработок в области микроакселерометрии подтверждают примеры применения их в области спутниковой градиентометрии.

Высокочувствительные бортовые акселерометры используются для выделения негравитационной составляющей ускорений, обусловленной возмущающими воздействиями на спутник во время полета (атмосфера, солнечный ветер, микрометеориты и т.д.). Параметры гравитационного поля Земли (высота геоида, уклонение отвесной линии, аномалии силы тяжести) находятся путем решения обратной задачи.

Технология «спутник-спутник» состоит в измерении взаимной скорости между двумя спутниками, расположенными в следующей конфигурации: один низкий спутник и другой - высокий спутник (НВ) или два спутника, расположенных на низких орбитах (НН) на расстоянии несколько сотен км.

Технология НВ была опробована на спутниках GEOS и ATSG, что позволило лишь в принципе проверить возможность такого метода, т.к. GEOS располагался на достаточно высокой орбите – 800 км.

Более перспективным представляется метод НН, для которого были сделаны несколько проектов: SLALOM, DIABOLO, SFB78 и MBV в рамках ASE, основанных на лазерной технике измерения расстояния, GRAVSAT-A с радиометрической техникой (на частоте  $\sim 110$  ГГц).

Наиболее успешными в этом направлении являются проекты CHAMP и GRACE. Используя данные трехмесячной франко-немецкой миссии 2002 г.

спутника CHAMP с использованием современных достижений GPS-технологий и прецизионного трехосного акселерометра [2] (разрешение  $3 \cdot 10^{-10} g$  в области частот  $(0,01-10^{-4})$  Гц, была построена наиболее успешная модель орбитального гравитационного поля EIGEN-IS [3] без привлечения данных наземной гравиметрии и спутниковой альтиметрии (рис.5).

По сравнению с предыдущими моделями преимуществом этого проекта является практически полное покрытие земной поверхности благодаря полярной орбите (наклонение  $87,3^\circ$ ), одновременное отслеживание 12-ти GPS-спутников, учет негравитационных ускорений спутника за счет использования прецизионного акселерометра и небольшой высоты круговой орбиты (начальная высота 454 км с убыванием её на 1,5 км/месяц).

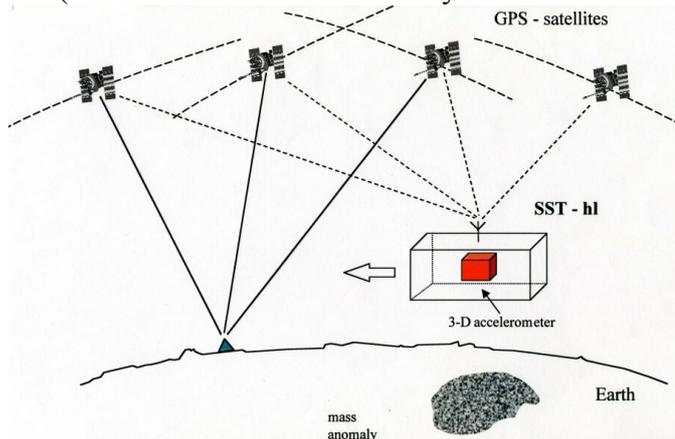


Рис.5. Проект CHAMP – комплексирование GPS измерений и акселерометрических измерений негравитационных ускорений

Проект GRACE (Германия, США) – фактически повторение проекта CHAMP с дополнением информации о взаимной скорости двух спутников, разнесенных на 200 – 300 км (рис. 6).

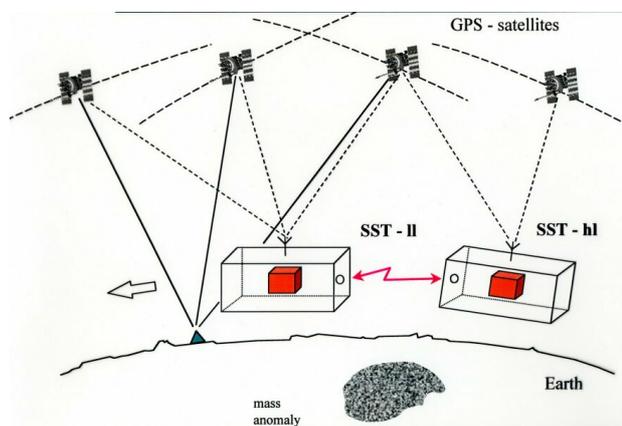


Рис.6. Проект GRACE - комплексирование GPS измерений, измерений негравитационных ускорений с помощью акселерометров и измерений скорости взаимных перемещений двух низколетящих спутников

Спутники GRACE были предназначены для прецизионного измерения гравитационного поля Земли в течение 5 лет [4]. Исходной полезной информацией в спутниках GRACE являлись показания микроволнового дальномера, высокочувствительного акселерометра и синхронные измерения координат с использованием приемника GPS. Эта информация передавалась по 50 Мбит в сутки на наземные приемные станции и далее в научные центры в Германии и США для углубленной обработки. По имеющейся информации результаты точных измерений флуктуаций гравитационного поля Земли позволяют оценить количественные характеристики переноса масс в интересах геотектоники, гидрологии (в т.ч. гляциологии и океанографии). Пространственное разрешение гравитационных карт, созданных с помощью проекта GRACE, составило около 300 км при точности примерно в 100 раз выше существующей ранее.

Для более точной интерпретации данных, получаемых с помощью спутников GRACE, выявления причин гравитационных возмущений потребовалось использовать другие источники информации о состоянии атмосферы, поверхности и недр Земли и Мирового океана. Совместная обработка результатов измерений GRACE и TOPEX/POSEIDON (спутниковая альтиметрия) позволили уточнить изменения уровня поверхности Мирового океана, вызванные устойчивыми крупномасштабными явлениями (океанические течения, градиент температур и т.д.).

Измерения с использованием спутниковой градиентометрии относятся к прямым методам определения параметров геопотенциала Земли (ГПЗ).

Метод градиентометрических измерений состоит в измерении одной или нескольких компонент тензора вторых производных потенциала гравитационного поля в координатных осях, связанных со спутником. Для измерения всех составляющих тензора вторых производных потенциала земного притяжения необходима комбинация трехосных акселерометров, расположенных по углам куба. Для низколетящих спутников влияние сопротивления атмосферы может в десять и более раз превосходить измеряемый параметр-сигнал. Поэтому нужно использовать четыре акселерометра, расположенных на углах пластины, перпендикулярно вектору скорости спутника для определения градиентов ускорения силы тяжести в радиальном направлении (от центра масс Земли) и перпендикулярно траектории движения спутника. Составляющие ускорений вдоль вектора движения спутника можно измерять с более низкой точностью.

Современным примером реализации метода спутниковой градиентометрии является проект GOCE (2009 г.). Суть проекта GOCE (рис.7) заключался в комплектации одного спутника композицией трехосных высокочувствительных акселерометров, обеспечивающих возможность разделения компонент тензора инерциальных и

гравитационных составляющих измеряемых ускорений. Цель проекта - изучение гравитационного поля Земли и фигуры Земли (геоида).

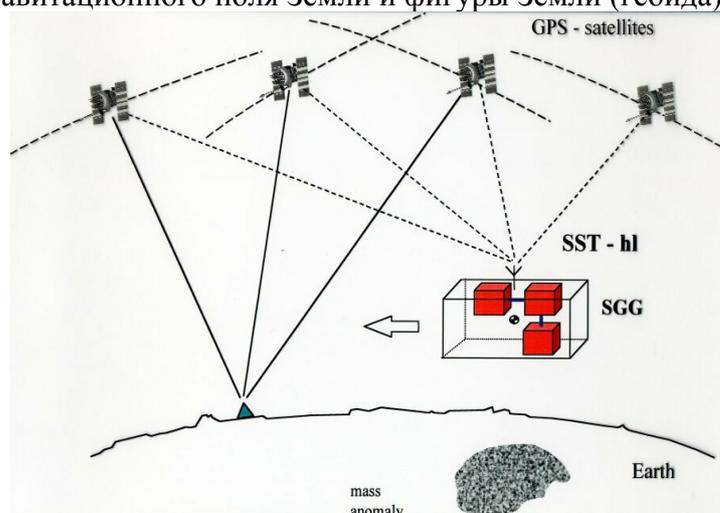


Рис.7. Проект GOCE - комплексирование GPS измерений и градиентометрических измерений, осуществляемых с помощью разнесенных 3-компонентных акселерометров

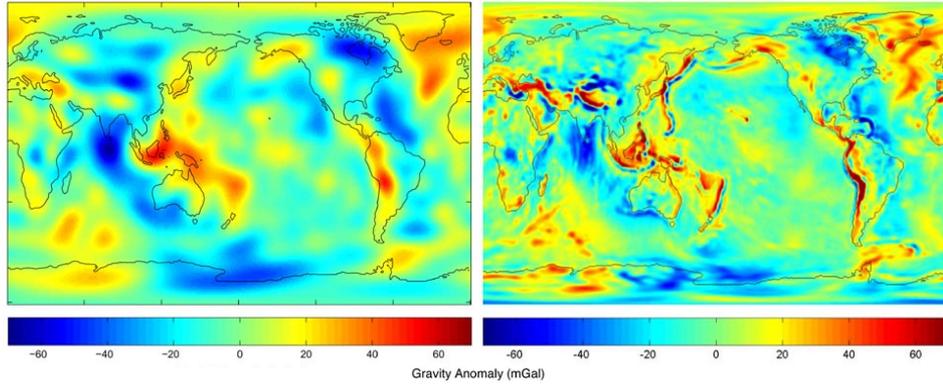
Низкая орбита спутника (высота – 260 км), высокая точность акселерометров ( $10^{-12}$  м/с<sup>2</sup>) и продолжительное время существования спутника позволили к окончанию наблюдений повысить точность определения высот геоида до 1-2 см на сетке порядка 100 км [5]. Для компенсации влияния атмосферного торможения и других негравитационных воздействий на спутнике устанавливался ионный двигатель, использующий для создания импульса коррекции траектории движения спутника ионизированные атомы ксенона.

Спутник GOCE проработал на орбите более 20 месяцев. За это время он составил достаточно точную карту гравитационного поля Земли.

Определение необходимого качества измеряемого градиентометром компонент требует решения многочисленных научно-технических проблем и, в первую очередь, достаточно полного представления об инерциальных помехах на борту космических объектов. Это обеспечивается проведением большого комплекса исследований, как в наземных лабораториях, так и на орбитальных станциях, летающих лабораториях и зондах.

В результате реализации данного проекта детальность модели гравитационного поля Земли повысилась на два порядка, что позволило лучше понять структуру гравитационного поля Земли. Это, в свою очередь, вносит существенный вклад при решении задач ряда фундаментальных геофизических наук, таких как океанография, физика Земли, геодезия, гляциология, при исследовании изменений климата на Земле, а также позволяет продвинуться вперед в решении прикладных проблем.

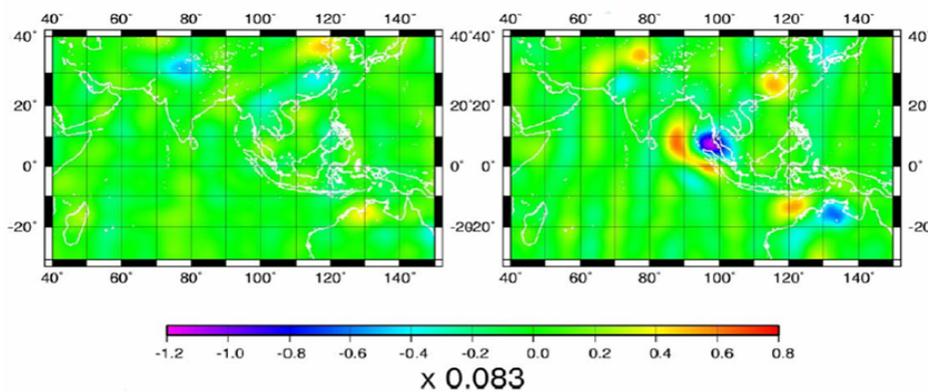
Достаточно ясные примеры результатов реализации проекта представлены на рис. 8 и 9.



Аномальное гравитационное поле Земли

Модель GGMO2S, основанная на измерениях, впервые полученных за 10 лет слежения за орбитами GRACE-спутников

Рис. 8 Пример повышения детальности гравитационного поля Земли



Гравитационное поле в 2003-2004гг. (до землетрясения)

Изменение гравитационного поля в 2004-2005 гг. (после землетрясения)

Рис. 9 Изменение гравитационного поля Земли в результате Суматринского землетрясения в декабре 2004 г. по данным спутников GRACE

Дальнейшее продвижение в области высокоточной акселерометрии может идти по пути увеличения пробной массы датчиков, перехода на криогенный вариант их исполнения, увеличения механической добротности

чувствительной системы.

Альтернативой является разработка спутниковых систем измерения с возможностью увеличения базы измерений.

Поэтапно этот вариант может быть опробован на КА «Прогресс», где расстояние между датчиками может быть увеличено на порядок по сравнению с проектом GOCE (с 0.5м до 5м). И в дальнейшем переход на тросовые системы, где база может быть многократно увеличена и, соответственно, физические ограничения по точности могут быть отодвинуты на несколько порядков.

Естественно, при реализации данного проекта возникает много проблем, связанных с инерциальными возмущениями движения спутника в условиях остаточной атмосферы, учет которых наряду с усовершенствованием акселерометрической аппаратуры являются содержанием дальнейших работ в этом направлении.

### Литература

1. Дубовской В.Б., Леонтьев В.И., Пшеняник В.Г., Сбитнев А.В. Наземные испытания высокочувствительных акселерометров для бортовых систем навигации и управления космических аппаратов ДЗЗ нового поколения. Материалы VIII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2011, с.324-332.
2. Touboul, P., Willemenot E., Foulon B., and Josselin V., Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: Synergy and evolution // *Boll. Geof. Tear. App.*, 40, 321-327, 2009.
3. Reigber Christoph, Balrnino Georges. A high-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S) // *Geophysical research letter*, 2002, v. 29, №. 14, 10.1029/2002GLO 15064.
4. Потапов В.С. Неафишируемые возможности проекта GRACE// *Новости космонавтики*, 2002, № 3.
5. Rummel Reiner, Yi Weiyong, Stummer Claudia. GOCE gravitational gradiometry // *J. Geod*, 2011.