

**КОСМИЧЕСКАЯ МНОГОСПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА
ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА.
СОСТАВ И ПРИМЕНЕНИЕ**

В.Ф. Фатеев, И.С. Сильвестров, Р.А. Давлатов, В.П. Лопатин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
fateev@vniiftri.ru,
igsilv@vniiftri.ru,
davlatov_r_a@mail.ru,
lopatin@vniiftri.ru*

Аннотация. В настоящее время для осуществления мониторинга параметров магнитного и гравитационного полей Земли используются одиночные космические аппараты (КА) с дорогостоящим бортовым измерительным оборудованием. Такие средства глобального мониторинга не обладают оперативностью и не имеют горячего резерва.

Предлагаемый альтернативный вариант системы мониторинга основан на использовании новых космических технологий: многоспутниковых кластеров малоразмерных космических аппаратов (МКА), метрологических и эксплуатационных возможностей системы ГЛОНАСС и её приёмной аппаратуры, современных достижений в области высокоточных оптических измерений на интерферометрах Фабри — Перо, а также достижений в области создания малогабаритных высокостабильных квантовых стандартов частоты. Один из путей миниатюризации МКА основан на использовании технологии CubeSat. В статье рассматриваются состав бортовой и наземной аппаратур перспективной многоспутниковой системы мониторинга на основе МКА, области их применения, а также наземные средства верификации бортовых измерений.

Ключевые слова: геофизические поля Земли, многоспутниковая система, малые космические аппараты, глобальный мониторинг.

**SPACE MULTI-SATELLITE SYSTEM OF GEOPHYSICAL
MONITORING. COMPOSITION AND APPLICATION**

V.F. Fateev, I.S. Silvestrov, R.A. Davlatov, V.P. Lopatin

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
fateev@vniiftri.ru,
igsilv@vniiftri.ru,
davlatov_r_a@mail.ru,
lopatin@vniiftri.ru*

Annotation. Currently, to monitor the parameters of the Earth's magnetic and gravitational fields, single spacecraft (SC) with expensive on-board measuring equipment are used. These global monitoring tools are not responsive.

The proposed alternative monitoring system is based on the use of new space technologies: multi-satellite clusters of small spacecraft (MCS), metrological and operational capabilities of the GLONASS system and its receiving equipment, modern achievements in the field of high-precision

optical measurements on Fabry — Perot interferometers, as well as advances in creation of small-sized highly stable quantum frequency standards. One of the ways to miniaturize small spacecraft is based on the use of CubeSat technology. The article discusses the composition of the onboard and ground equipment of a promising multi-satellite monitoring system based on small spacecraft, the scope of their application, as well as ground means of verification of onboard measurements.

Key words: geophysical fields of the Earth, multi-satellite system, small spacecraft, global monitoring.

Введение

Обеспечение глобальности и абсолютной помехозащищённости автономных систем навигации возможно за счёт использования текущей информации о параметрах аномальных геофизических полей (ГФП): ГПЗ (гравитационного) и МПЗ (магнитного). Способы постановки помех бортовым гравиметрическим и магнитометрическим средствам неизвестны. Однако для создания помехозащищённых автономных систем навигации на основе использования ГФП необходима разработка системы подготовки навигационных гравиметрических и магнитометрических карт. Для недоступных территорий и акваторий такие карты могут быть созданы только на основе измерительных средств космического базирования.

В качестве такого средства предлагается использовать сетевую космическую систему геофизического мониторинга (СКС ГФМ, далее — Система). Помимо обеспечения подготовки гравимагнитных навигационных карт, система предназначена для:

- уточнения государственной геоцентрической системы координат;
- уточнения глобальной и региональных моделей гравитационного и магнитного полей Земли (ГПЗ и МПЗ);
- глобального мониторинга ионосферы в интересах повышения точности и устойчивости космических систем радионавигации, радиолокации и связи.

Система основана на использовании последних достижений в области создания многоспутниковых орбитальных группировок на основе современных и перспективных технологий миниатюризации космических аппаратов, широкого использования метрологических возможностей системы ГЛОНАСС, достижений в области создания малогабаритных бортовых стандартов частоты и времени, а также высокоточных лазерных измерений.

Современное состояние космических систем глобального геофизического мониторинга

Зарубежные геодезические миссии, предназначенные для уточнения геоцентрической системы координат, модели потенциала ГПЗ, модели квазигеоида, включают системы на основе КА GRACE (США, Германия); КА CHAMP (Германия); КА GOCE, ERS-1, ERS-2 (ЕКА); КА TOPEX-POSEIDON и JASON-1, 2, 3 (США, Франция); КА GEOSAT (США) и др. Часть из этих программ завершена, часть находится в эксплуатации.

По результатам измерений этих миссий, а также на основе данных высокоточного наземного геодезического комплекса (IGS, ILRS, VLBI, DORIS) создана и рекомендована к использованию ООН система координат ITRF. Разработана модель потенциала ГПЗ EGM2008 со степенью и порядком 2159×2159 . Погрешность системы ITRF — единицы сантиметров. В настоящее время в Международной геодезической программе GGOS ставится задача определения координат на поверхности Земли с погрешностью 1 мм.

В РФ с 1981 по 1999 г. эксплуатировался космический комплекс «ГЕО-ИК». Результатами почти 20-летней работы КА серии «ГЕО-ИК» (всего было запущено 14 КА) стали геодезические модели Земли ПЗ-86, ПЗ-90 (включая модель ГПЗ ПЗ-90.02), а также модель ГПЗ ПЗ-90.11 со степенью и порядком 360×360 . Сейчас эксплуатируется комплекс «ГЕО-ИК-2».

В настоящее время в РФ идёт проектирование перспективной космической геодезической системы «ГЕО-ИК-3». Планируемая орбитальная конфигурация системы «ГЕО-ИК-3» включает [1]:

- один–два средневысотных КА, оснащённых бортовым радиовысотометром;
- один низкоорбитальный КА с бортовым гравитационным градиентометром;
- два низкоорбитальных КА с бортовой аппаратурой межспутниковых измерений;
- один пассивный КА типа «Блиц-М» на круговой орбите с высотой около 3000 км.

Следует отметить, что в случае нештатной ситуации выполнение целевой задачи может быть под угрозой, так как в силу высокой стоимости КА и бортовой измерительной аппаратуры дублирующий комплекс не предусматривается.

Для изучения параметров МПЗ был реализован зарубежный космический проект с использованием КА NASA MagSat (запуск 30 октября 1979 г.), который работал на орбите семь с половиной месяцев. Через 20 лет датский микроспутник Ørsted (1999 г.), немецкий CHAMP (2000 г.) и аргентинский SAC-C (2000 г.) были разработаны специально для картирования магнитного поля Земли. На основе положительного опыта миссий Ørsted и CHAMP в 2013 г. NASA запустило миссию SWARM, космический сегмент которой состоит из трёх миниспутников. Назначение то же — глобальное картирование МПЗ. При этом в РФ не создана система глобального оперативного мониторинга МПЗ.

Одним из важных элементов геофизического мониторинга является глобальный контроль состояния быстроменяющихся параметров ионосферы. Оперативная оценка текущих параметров ионосферы необходима для повышения точности глобальной системы ГЛОНАСС, снижения ошибок измерений РЛС системы СПРН, а также для повышения эффективности обнаружения целей в системах загоризонтной радиолокации (ЗГРЛС). Кроме того, важным элементом мониторинга ионосферы является обнаружение её «модифицированных» областей, создаваемых зарубежными нагревными

ионосферными стендами (стенд в Трамсё в Норвегии, стенд HAARP на Аляске и др.). Эти области создают значительные помехи наземным и орбитальным радиоэлектронным средствам.

В настоящее время система глобального мониторинга ионосферы космического базирования в РФ не создана.

Таким образом, возникает задача разработки глобальной системы мониторинга ГПЗ, МПЗ и ионосферы на основе альтернативных принципов построения и измерений.

Цель и задачи Системы

Целью создания Системы является глобальный мониторинг (глобальная разведка) параметров ГПЗ, МПЗ и ионосферы и создание фундаментальной информационной базы данных для повышения точности и устойчивости систем автономной радионавигации, радиолокации и связи.

Задачи, решаемые системой для достижения цели:

- непрерывный глобальный космический мониторинг параметров ГПЗ с помощью измерительной аппаратуры, установленной на борту МКА и на Земле (гравитационного и негравитационного ускорения, составляющих гравитационного градиента, текущей высоты геоида на акваториях и др.);
- непрерывный глобальный космический мониторинг параметров МПЗ с помощью измерительной аппаратуры, установленной на борту МКА;
- мониторинг параметров глобальной модели ионосферы и обнаружение искусственно «модифицированных» областей;
- создание и ведение интегрированной базы данных мониторинга ГПЗ, МПЗ и ионосферы.

Для решения указанных задач, помимо разработки бортового измерительного оборудования, необходимо решить задачу создания следующего специального программного обеспечения (СПО):

- СПО для расчёта уточнённой версии ГГСК, глобальной модели высот квазигеоида, моделей ГПЗ, МПЗ и ионосферы, а также СПО оперативного обнаружения «модифицированных» областей ионосферы;
- СПО формирования навигационных магнитометрических и гравиметрических карт на недоступные территории и акватории, необходимых для обеспечения корреляционно-экстремальных помехозащищённых систем навигации по геофизическим полям.

Новые технологии, лежащие в основе системы

Для решения проблемы глобального мониторинга параметров ГПЗ, МПЗ и ионосферы из космоса, в особенности на недоступных территориях и акваториях, предлагается использование следующих новых направлений развития технологий средств и методов измерений:

1. Метрологических и эксплуатационных возможностей системы ГЛОНАСС для высокоточного измерения параметров ГПЗ (ускорения свободного падения, гравитационных градиентов, профиля высоты геоида, отклонения отвесной линии и др.), а также параметров ионосферы по сигналам ГНСС, принимаемым через ионосферу напросвет. Вес современных бортовых НАП и их антенн не превышает сотен граммов.
2. Современных достижений в области высокоточных оптических измерений на интерферометрах Фабри — Перо, полученных при создании гравитационно-волновых антенн (ГВА). Это важно в интересах создания бортовых лазерных высокоточных микроакселерометров и гравитационных градиентометров повышенной точности. Запас по достижимой точности бортовых интерферометров Фабри — Перо по отношению к уже созданным интерферометрам ГВА составляет 5–6 порядков.
3. Современных достижений в области создания малогабаритных высокостабильных квантовых стандартов частоты, пригодных для установки на борту МКА Системы;
4. Новых технологий миниатюризации элементов космической техники и создания на этой основе малоразмерных или малых космических аппаратов (МКА) [2–4]. В настоящее время эти технологии развиваются взрывоподобно: в мире планируется создать целый ряд таких группировок МКА. Кроме планируемого запуска группировки из нескольких сотен КА Российской космической системы «Сфера», компания OneWeb (Великобритания) планирует запуск около 2000 КА Интернет-связи. Компания SpaceX (США) объявила о создании подобной системы с количеством КА более 12000; Китай объявил о запуске орбитальной группировки (ОГ), состоящей из 840 МКА. Назначение этих систем разное, однако у многоспутниковой системы, каждый спутник которой оснащён однотипной измерительной аппаратурой, появляется очень важное свойство: при большом потоке информации появляется возможность повышения точности измерений за счёт статистической обработки этого потока. Именно такой результат получен в известном градиентометрическом проекте GOCE: точность измерения гравитационных градиентов ГПЗ в результате статистической обработки накопленных за 3 года измерений удалось повысить на 2–3 порядка.
5. Достижений в области создания мощных вычислительных средств на основе суперкомпьютеров и создания специального программного обеспечения (СПО) для обработки больших потоков разнородной измерительной информации. Сложность создания такого СПО заключается в обеспечении оперативности обработки, вплоть до реального масштаба времени (например, при решении задач мониторинга и уточнения быстроменяющихся параметров ионосферы).

Состав Системы

Система состоит из:

1. орбитального сегмента, построенного на основе технологий МКА;
2. сегмента наземных измерительных средств;
3. наземного комплекса калибровки и верификации орбитальных измерений;
4. информационно-аналитического Центра Системы, включающего интегрированную базу данных, комплекс СПО и комплекс математического моделирования.

Кроме того, в состав Системы также входят:

- наземный сегмент управления системой и обмена информацией с МКА, который базируется на существующем отечественном наземном комплексе управления КА;
- система запуска и восполнения орбитальной сети МКА, которая основана на использовании существующих и перспективных возможностей отечественных космодромов и ракет-носителей, выполняющих групповые запуски МКА.

Орбитальный сегмент сети

Орбитальная структура сети МКА

Орбитальный сегмент Системы построен на основе технологий создания МКА класса «микро-КА» весом до 100 кг и класса «мини-КА» весом до 500 кг.

Тип орбитальной сети МКА — низкоорбитальная сеть, состоящая как минимум из одной полярной орбиты и одной наклонной орбиты с наклоном около 63 градусов — всего 2 орбиты. Орбиты МКА — околосферические с малым эксцентриситетом, высотой 250–400 км.

Предлагается на каждой орбите разместить по два кластера из 6 МКА, общее количество кластеров в сети — 4, общее количество МКА при этих условиях — 24 (рис. 1а). Полярная и наклонная орбиты разнесены по долготе восходящего узла на 90°. Возможны более простые варианты построения сети, например одна полярная орбита с одним кластером на ней.

Орбитальные параметры МКА, входящих в состав одного кластера, отличаются настолько, что расстояние между ними в течение витка изменяется по высоте, вдоль и поперёк орбиты в пределах ± 100 –200 км. При таких минимальных условиях в каждом кластере образуются 15 измерительных базисов МКА – МКА (рис. 1б). При четырёх кластерах всего в сети будет 60 межспутниковых базисов измерений относительной скорости и разностей трёх координат на основе использования бортовых НАП ГНСС (НАП – НАП). Наличие большого количества базисов НАП – НАП позволяет существенно повысить точность определения коэффициентов модели ГПЗ за счёт использования методов статистической обработки большого объёма межспутниковых измерений.

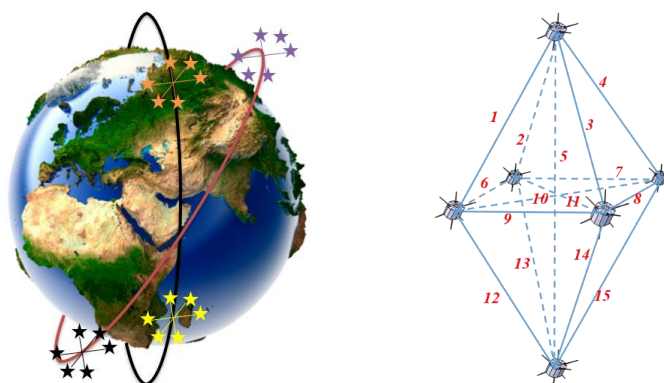


Рис. 1. Состав предлагаемой орбитальной конфигурации Системы:
а — общий вид; б — количество измерительных баз в кластере из 6 МКА

Состав космической платформы МКА

В состав космической платформы типового МКА сети класса «микро-КА» или «мини-МКА» входят [4]:

1. конструкция космической платформы (силовой элемент);
2. бортовой комплекс управления;
3. запоминающее устройство;
4. бортовой радиокomплекс с антенно-фидерными устройствами;
5. система коррекции орбиты;
6. система ориентации МКА;
7. система обеспечения температурного режима;
8. система бортового электропитания на основе солнечных батарей;
9. аппаратура измерений параметров ГПЗ и МПЗ.

Космическая платформа малого КА имеет системную шину для коммуникации с полезной нагрузкой по питанию, интерфейсам управления и обмена информацией.

Один из путей миниатюризации МКА заключается в использовании технологии Cubesat размерностью $10 \times 10 \times 10$ см (так называемый элементарный блок U1). С помощью этой технологии уже создаются КА научно-образовательного и коммерческого назначения размерностью от U2 до U12 с весом до 20–30 килограммов.

Состав аппаратуры измерений параметров ГПЗ и МПЗ

Для решения измерительных задач в сети предлагается широкое использование метрологических возможностей комплектов бортовых НАП ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BaiDou), размещаемых на борту каждого МКА сети. Вес современных бортовых НАП не превышает 200 граммов, вес их типовых антенн — до 150–200 граммов.

В этой связи наиболее широкий состав комплектации типовой измерительной аппаратуры МКА сети включает [5, 6]:

1. НАП ГНСС с антенной правой поляризации, направленной в зенит, для решения основной задачи определения текущей орбиты МКА по текущим координатам и скорости МКА.
2. Высокочувствительный микроакселерометр для измерения негравитационных составляющих ускорения МКА (сопротивление остаточной атмосферы, давление Солнца и др.) с двумя–тремя измерительными осями с чувствительностью не хуже 10^{-8} м/с². Задел по созданию механического варианта микроакселерометра с такой чувствительностью имеется во ФГУП «ВНИИФТРИ» и ИФЗ РАН. Другой вариант создания космического высокочувствительного микроакселерометра состоит в измерении движения свободно движущейся чувствительной массы внутри МКА относительно его корпуса с помощью лазерного интерферометра. Экспериментальный стенд по исследованию такого микроакселерометра создаётся во ФГУП «ВНИИФТРИ».
3. Малогабаритный высокостабильный квантовый стандарт частоты на эффекте так называемого когерентного пленения населённости — КСЧ КПН. Во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан и готовится к производству КСЧ КПН с относительной нестабильностью частоты не хуже 10^{-11} – 10^{-12} при объёме 60 см^3 ($5\times 4\times 3$ см) и с потребляемой мощностью 300 мВт. По некоторым показателям созданный КСЧ превосходит зарубежные аналоги [6]. Кроме того, в состав бортовой аппаратуры спутника типа «мини-МКА» (до 500 кг) возможно размещение созданных ФГУП «ВНИИФТРИ» бортовых водородных квантовых часов (КЧВ), задающий генератор которых имеет суточную нестабильность лучше 10^{-15} .
4. Один комплект НАП с 2–3 антеннами, направленными в горизонт для контроля параметров ионосферы по двухчастотным сигналам ГНСС, принимаемым через ионосферу напросвет.
5. НАП с антенной *правой* поляризации, ориентированной в надир, для приёма сигналов от наземных псевдоспутников ГЛОНАСС.
6. НАП со специальной антенной *левой* поляризации, направленной в надир. Эта антенна имеет несколько бóльший размер, чем обычная антенна НАП, и предназначена для приёма сигналов ГНСС, отражённых от поверхности океана (в режиме так называемой ГНСС-рефлектометрии). На основе измерения запаздывания отражённого сигнала относительно прямого сигнала, принимаемого антенной в зенит, решаются: геодезическая задача определения текущей высоты относительно геоида, задача определения параметров взволнованности океана, построения радиоизображений надводных объектов и др. [4, 5].
7. Лазерный спутниковый измеритель текущего гравитационного градиента на основе двух чувствительных масс, свободно движущихся внутри МКА.

8. Бортовой радиоизлучатель высокостабильного по частоте сигнала, создаваемого на основе КСЧ КПН или КЧВ, с антенной, ориентированной в надир. Предназначен для обеспечения высокоточных измерений радиальной скорости МКА на наземной РТС по доплеровскому смещению излучаемого сигнала.
9. Лазерный уголкового отражатель и для высокоточного измерения текущей дальности до МКА с помощью наземных квантово-оптических систем (КОС). В качестве ретрорефлектора может использоваться стеклянная призма Люнеберга.
10. Бортовой трёхосный магнитометрический комплекс, включающий магнитометр и магнитные градиентометры.

Сегмент наземных измерительных средств

Сегмент наземных измерительных средств включает в себя:

- 1) беззапросные доплеровские радиотехнические системы (РТС) для измерения текущей радиальной скорости по линии РТС – МКА. При относительной нестабильности бортового КСЧ около 10^{-12} достижимая погрешность измерения радиальной скорости МКА достигает 0,3 мм/с, что открывает возможность определения радиального ускорения вблизи траверза МКА до 5 мГал. При нестабильности бортового КЧВ порядка 10^{-14} – 10^{-15} достижимая погрешность измерения радиальной скорости снижается до 10^{-6} м/с и менее, а погрешность измерения УСП снижается до десятков–сотен мкГал;
- 2) лазерные импульсные квантово-оптические системы (КОС) для измерения текущей дальности по линии КОС – МКА. Современные отечественные КОС способны измерить текущую дальность до низкоорбитальных МКА при использовании трёхгранных уголкового отражателей (УО) с погрешностью в несколько миллиметров. Использование на борту МКА в качестве отражателей сферических стеклянных линз Люнеберга снижает ошибку измерений в несколько раз.

Задачи, решаемые бортовыми и наземными измерительными средствами

1. На основе НАП с антенной, направленной в зенит, и бортовых акселерометров определяются параметры модели потенциала гравитационного поля Земли по данным измерений текущей разности координат и относительной скорости соседних спутников по линии НАП – НАП («спутник – спутник») [4, 5]. Обработка измерений по каждой паре ведётся на Земле. При частоте съёма информации с каждой НАП 100 Гц количество суточных измерений, вовлекаемых в статистическую обработку при использовании двух орбит МКА в Системе, достигает 500 млн. На основе разностных измерений

на Земле уточняются текущие составляющие гравитационного градиента вдоль орбиты, а затем и параметры модели потенциала гравитационного поля Земли.

Ожидаемая погрешность определения составляющих гравитационных градиентов (ГГ), согласно модельным оценкам, проведённым по суточным измерениям на одном базисе НАП – НАП, составляет 10^{-2} Этвеш. При множестве измерительных базисов погрешность снижается за счёт статистического усреднения.

2. На основе НАП с антенной в зенит совместно с КСЧ КПМ или КЧВ решается задача уточнения текущего ускорения свободного падения (УСП) МКА. Это основано на измерении радиального ускорения по текущим измерениям псевдоскорости и псевдодальности МКА относительно спутников ГНСС, находящихся вблизи зенита. При кратковременной относительной нестабильности бортового КСЧ порядка 10^{-12} погрешность измерения УСП составит единицы мГал. Этого уже достаточно для решения задачи уточнения региональных моделей ГПЗ на недоступных территориях. При продолжительности измерений этих параметров около 10 мин (600 с), при одновременных измерениях как минимум по двум находящимся вблизи зенита КА ГНСС (из состава ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BaiDou), при частоте съёма информации 100 Гц количество измерений только на одном витке составит 1,08 млн. За сутки объём фазовых измерений текущей псевдодальности по КА ГНСС, выполненный на борту 6 МКА только одного кластера, достигнет $1,04 \cdot 10^8$. Это даёт возможность повышения точности измерений текущего значения УСП МКА за счёт статистической обработки большого объёма измерений. Вместе с тем это предъявляет особые требования к характеристикам специального программного обеспечения.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводится наземный эксперимент по измерению радиального ускорения КА ГЛОНАСС с использованием специальных антенн и специальных методов обработки. Оценка ожидаемой погрешности определения ускорения свободного падения МКА по измерениям НАП составляет менее 1 мГал.

3. На основе бортовых НАП и двух–трёх антенн, ориентированных в горизонт, решается задача уточнения глобальной модели ионосферы, а также задача обнаружения «модифицированных» областей ионосферы, создаваемых специальными зарубежными наземными нагревными стендами (в Трамсё, Норвегия, HAARP на Аляске, США и др.). Для этого необходимо специальное программное обеспечение задач радиотомографии, которым РФ располагает.

Ожидаемая относительная погрешность определения полной электронной концентрации вдоль радиолуча КА ГНСС – МКА составляет 6–10 %.

4. НАП со специальной антенной с *левой* поляризацией, ориентированной в надир, может быть применена для решения следующих задач [6]:
- уточнения глобальных геодезических характеристик геоида (профиля превышения над геоидом, уклонения отвесной линии и др.);
 - уточнения параметров волнения и направления приводного ветра в любой точке Мирового океана;
 - обнаружения цунами (при большом числе спутников задача решается оперативно);
 - построения многокурсовых радиоизображений островов и больших техногенных наземных объектов и др.

Погрешность измерений текущей высоты по одному спутнику составляет около 10–15 см, однако оценки показывают, что при одновременно принимаемых сигналах от 20–30 видимых спутников возможно значительное повышение точности за счёт статистической обработки до 1–5 см.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» имеется большой экспериментальный материал по приёму и обработке сигналов ГНСС, отражённых от подстилающей поверхности: с моста, с самолёта, готовится эксперимент на воздушном шаре. Подготовлены и со специалистами РКК «Энергия» обсуждаются предложения по эксперименту на МКС. В эксперименте, проведённом в безэховой камере ФГУП «ВНИИФТРИ», для полунатурного моделирования системы определения профиля высоты геоида использовался имитатор сигналов ГНСС.

Приёмная аппаратура может быть реализована на базе программного приёмника — SDR (software defined radio). Антенны могут быть реализованы на МКА типа Cubesat в виде патч-антенн с небольшими размерами: 10×30 мм или 20×30 мм (рис. 2) [8, 9].

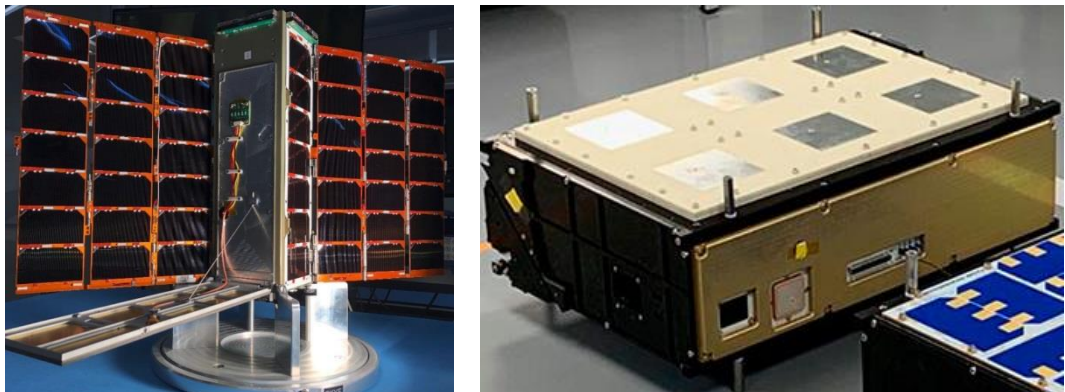


Рис. 2. Приёмные патч-антенны, используемые на борту МКА Cubesat:
а — антенна в надир в рабочем состоянии, спутник Lemure (Cubesat U3);
б — антенна спутника ³Cat-5/A (Cubesat-U6)

5. НАП с антенной с *правой* поляризацией, направленной в надир, решает задачу обнаружения и определения координат наземных псевдоспутников, излучающих слабый сигнал ГНСС (единицы ватт). Она решается при приёме сигнала, поступающего снизу, одновременно двумя–тремя соседними спутниками. Поскольку координаты самих спутников определяются их бортовыми НАП, а разность хода сигналов Земля – МКА измеряется на борту одного из МКА, то задача определения местоположения наземного источника решается однозначно. Этот способ может использоваться в интересах решения следующих практических задач:

- обнаружение надводных объектов, терпящих бедствие в океане;
- контроль перемещения транспортных средств, изменения ледовой обстановки в Арктике и на реках и др.;
- обнаружение вредоносных источников помех системе ГЛОНАСС в интересах решения задачи антитеррора.

Следует отметить, что эту же задачу может решать и направленная в надир антенна с *левой* поляризацией (см. предыдущий п. 4).

6. Измерение текущего гравитационного градиента на борту МКА с помощью одноосного лазерного градиентометра, основанного на измерении параметров относительного движения двух чувствительных масс, свободно движущихся внутри МКА вдоль одной координатной оси. При таких измерениях необходимость в измерении негравитационных ускорений МКА, вызванных сопротивлением остаточной атмосферы, давлением Солнца и др., отпадает. Ожидаемая погрешность измерения при существующих возможностях лазерных интерферометров Фабри — Перо составляет 10^{-3} – 10^{-4} Этвеша.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» ставится эксперимент по проверке возможностей лазерного градиентометра на свободных массах. При этом используется задел, полученный при создании высокоточного эталонного перебазируемого лазерного интерферометра.

7. Измерение текущей радиальной скорости всех МКА видимых кластеров с помощью наземной радиотехнической станции (РТС) по доплеровскому смещению сигналов, излучаемых с МКА. Это необходимо для уточнения текущей орбиты МКА. Ожидаемая достижимая погрешность измерения, как показано выше, в зависимости от используемого бортового стандарта частоты составляет 10^{-4} – 10^{-6} м/с. Это обеспечивает точность измерения ускорения свободного падения вблизи траверза в десятки–сотни мкГал.

8. Измерение текущей дальности МКА относительно наземной КОС по бортовым уголковым отражателям. Это необходимо для уточнения текущей орбиты МКА. Достижимая погрешность измерения дальности до МКА оценивается в доли сантиметра, что обеспечивает погрешность определения низких орбит в единицы сантиметров.

9. Уточнение глобальной модели МПЗ по результатам измерений, выполняемых с помощью бортовых магнитометров и магнитных градиентометров. Требования к погрешности измерений составляют единицы — доли нТл, точность отечественных феррозондовых магнитометров удовлетворяет этим требованиям.

Наземный комплекс калибровки и верификации орбитальных измерений

Параметры полигонов

Для калибровки и верификации орбитальных гравиметрических и магнитометрических измерений необходим наземный комплекс полигонов, который характеризуется следующими параметрами:

- размеры полигонов — не менее 200×200 км;
- количество полигонов — не менее трёх, поскольку они должны располагаться на участках местности с разными вариациями рельефа и характеристик ГПЗ: равнинная, холмистая и горная;
- расстояние между эталонными пунктами: 1–3 км для горной местности; 3–7 км для холмистой; 7–10 км для равнинной.

Состав полигонной измерительной базы

1. По ГПЗ:
 - квантовый нивелир для измерения разности потенциалов и ортометрических высот;
 - относительные и абсолютные гравиметры для определения ускорения силы тяжести;
 - вертикальный и горизонтальный градиентометры для определения градиента ускорения силы тяжести;
 - измерители уклонов отвесной линии (астрономические, квантовые и др.).
2. По МПЗ:
 - магнитометры феррозондовые, квантовые, протонные и др.;
 - градиентометры магнитные тех же типов.

Места размещения существующих полигонов

Специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» было создано три высокоточных полигона на территории РФ путём выполнения гравигеодезических измерений на пунктах с дискретностью 5–7 км:

- Центральный высокоточный полигон (Московская область) — 148 пунктов;
 - Северо-Западный высокоточный полигон (Ленинградская область) — 40 пунктов;
 - Восточный высокоточный полигон (Иркутская область) — 88 пунктов.
- Возможно создание других полигонов.

Информационно-аналитический Центр Системы

Информационно-аналитический Центр Системы включает в себя:

1. *Аппаратно-программный комплекс (АПК)* — предназначен для решения следующих задач:
 - сбор, хранение и обработка поступающей информации от измерительных средств Системы;
 - создание и ведение интегрированной базы измерительных данных о параметрах ГПЗ, МПЗ и ионосферы;
 - уточнение параметров ГГСК и установление её соответствия параметрам Международной земной системы координат ITRF;
 - расчёт параметров уточнённой высокоточной планетарной модели ГПЗ;
 - расчёт параметров уточнённой высокоточной планетарной модели МПЗ;
 - расчёт параметров уточнённой высокоточной планетарной модели ионосферы;
 - оперативное обнаружение «модифицированных» областей ионосферы;
 - подготовка навигационно-гравиметрических и навигационно-магнитометрических карт на удалённые территории и акватории.
2. *Интегрированную базу данных* в составе:
 - база данных глобальных измерений параметров ГПЗ;
 - база данных глобальных измерений параметров МПЗ;
 - база данных глобальных измерений параметров ионосферы;
 - дополнительная база данных параметров ГПЗ, МПЗ и ионосферы по открытым источникам на недоступные зарубежные территории и удалённые акватории Мирового океана для уточнения и дополнения создаваемых баз данных.
3. *Комплекс специального программного обеспечения (СПО)*.
Комплекс СПО располагается в наземном Центре обработки информации и включает в себя СПО расчёта параметров ГПЗ (градиент, УСП, превышения геоида), МПЗ (магнитная индукция, градиент), ионосферы и подготовки навигационных магнитометрических и гравиметрических карт путём обработки информации с измерительных средств.
4. *Комплекс математических моделей*.
Комплекс математических моделей элементов Системы предназначен для обеспечения проектирования Системы и её элементов, планирования измерений в ходе эксплуатации и оценки эффективности применения Системы и её элементов. Комплекс включает как минимум математические модели следующих новых элементов Системы:
 - баллистическую модель кластеров МКА и орбитальной структуры;
 - наземной системы испытательных полигонов;
 - бортового микроакселерометра;

- бортового лазерного градиентометра;
- космического гравиметра на основе сигналов ГНСС;
- космического градиентометра на основе межспутниковых измерений НАП – НАП;
- бистатического радиовысотометра на основе сигналов ГНСС;
- КСЧ КППМ и ВКЧ.

Варианты реализации Системы

1. В виде отдельной самостоятельной орбитальной группировки.
2. В виде дополнительной бортовой аппаратуры КА проектируемой системы «Сфера».
3. В виде дополнения к проектируемой системе ГЕОИК-3, что достигается введением дополнительных 1–2 кластеров МКА, а также дополнительным оснащением КА этой системы аппаратурой, рассмотренной выше.

Выводы

1. Предлагаемая сетевая космическая система геофизического мониторинга Земли позволяет обеспечить высокоточный непрерывный глобальный мониторинг параметров ГПЗ, МПЗ и ионосферы.
2. Система обладает высокой точностью измерения параметров геофизических полей, поскольку использует эксплуатационные возможности самых точных на сегодняшний день космических систем (ГНСС), сверхстабильных бортовых стандартов частоты и времени, а также самые современные лазерные измерительные технологии.
Ожидаемая точность определения измерения параметров ГПЗ соизмерима, а при некоторых условиях выше точности, обеспечиваемой проектируемыми космическими системами.
3. Система обеспечивает высокоточное решение следующих практических задач:
 - мониторинг параметров ГПЗ для уточнения ГГСК и установления её соответствия международной системе ITRS, а также уточнение параметров глобальных и региональных моделей ГПЗ;
 - мониторинг параметров МПЗ для уточнения глобальных и региональных моделей;
 - мониторинг параметров глобальной модели ионосферы и обнаружение искусственно «модифицированных» областей;
 - обнаружение и локализацию наземных и воздушных радиисточников, создающих помехи для приёмников ГЛОНАСС.
4. Система обеспечивает создание навигационных гравиметрических и магнитометрических карт для недоступных территорий и акваторий в интересах создания помехозащищённых систем автономной навигации по геофизическим полям.

5. Система обладает горячим резервом и структурной устойчивостью, поскольку при выходе из строя части аппаратуры она способна выполнять основные задачи.

Список литературы

1. Косенко В.Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга // Альманах современной метрологии. — № 3. — 2015. — С. 9–20.
2. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. В.Ф. Фатеева. — М.: Радиотехника, 2010. — 320 с.
3. Инфраструктура малых космических аппаратов / Под ред. В.Ф. Фатеева. — М.: Радиотехника, 2011. — 430 с.
4. Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Лопатин В.П. Применение навигационной аппаратуры ГНСС на борту наноспутника // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2018. — Т. 61. — № 5. — С. 437–445.
5. Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Лопатин В.П. Возможности использования системы ГЛОНАСС для формирования гравиметрической многоспутниковой системы // Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии: сб. докладов II научно-технической конференции. — 2019. — С. 28–29.
6. Зотов Е.А., Парёхин Д.А. Исследование метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 3. — С. 128–137.
7. Lemur-2 Nanosatellite Constellation of Spire Global // ESA Earth Observation Portal: [website]. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/lemur> (date of the application: 10.09.2020)
8. FSSCat // Universitat Politècnica de Catalunya: [website]. — URL: <https://nanosatlab.upc.edu/en/missions-and-projects/fsscat> (date of the application: 10.09.2020).

Статья поступила в редакцию: 09.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 30.03.2021 г.

Статья принята в работу: 01.04.2021 г.