

**С.А. Матвиенко**

Государственное предприятие «Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля», Днепропетровск

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МИКРОСПУТНИКА



Статья посвящена проблеме измерения параметров гравитационного поля Земли из космоса. Автором разработан оригинальный радиофизический метод и его две разновидности измерения параметров гравитационного поля Земли, который основан на измерении гравитационного сдвига частоты электромагнитного излучения с использованием существующих глобальных навигационных спутниковых систем. Предложена конструктивно-компоновочная схема геофизического микроспутника, которая реализует радиофизический метод измерений гравитационного поля Земли и обеспечивает мониторинг плазмосферы и магнитосферы Земли.

*Ключевые слова:* гравитационное поле Земли, радиофизический метод, глобальные навигационные спутниковые системы.

### ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

В настоящее время космические исследования Земли по геофизическим параметрам являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений дистанционного зондирования Земли. Учитывая исключительную важность оперативной информации о характеристиках гравитационного поля для решения многих научно-технических и прикладных задач в таких отраслях, как геодезия, геофизика, охрана окружающей среды, безопасность жизнедеятельности и др., можно констатировать, что разработка и исследование новых методов и средств измерения параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) и других планет солнечной системы являются весьма актуальными.

Одним из первых проектов, задачей которых являлось измерение параметров ГПЗ, стал LAGEOS (Laser Geodynamics Satellites). LAGEOS – группа научно-исследовательских

спутников, разработанных для калибровки орбитальных лазерных дальномеров с целью изучения геодинамики и уточнения параметров гравитационного поля Земли [1].

Космические аппараты (КА) LAGEOS были запущены в 1976 и 1992 гг. и решали следующие задачи:

- ✦ определение формы Земли (геоид);
- ✦ определение подвижек тектонической платформы, связанных с движением материков.

LAGEOS – это пассивные спутники, которые расположены на очень стабильной средней околоземной орбите (МEO) и отражают лазерный луч, посылаемый с Земли. Благодаря этому положение спутников и точек поверхности Земли вычисляется с очень высокой точностью. Каждый спутник представляет собой шар диаметром ~60 см и массой 410 кг. В его тонкой алюминиевой оболочке равномерно расположены 426 уголкового отражателя. Четыре из них выполнены из германия с целью получения измерений в инфракрасном диапазоне для экспериментальных исследований отражательной способности и ориентации

спутника. У спутников отсутствуют бортовые сенсоры и система управления. Измерения проводятся путем передачи импульсных лазерных лучей с наземных станций к спутникам. Время прохождения вычисляется с высокой точностью, что позволяет наземным станциям измерить их рассеяние с точностью лучше 1 дюйма на тысячу миль.

В результате анализа данных за 11 лет было вычислено, что орбита спутников смещалась на 2 метра в год в направлении вращения Земли. Это смещение на 99 % совпадает с предсказанным общей теорией относительности эффектом увлечения инерциальных систем отсчета вращающимся телом.

В проектах CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) и GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) [13] задачи измерений ГПЗ решают по данным точного позиционирования КА с помощью GPS и лазерной локации КА. Для этого используется специально разработанный для этих целей приемник Black Jack, который обеспечивает погрешность определения координат 2–3 мм.

Параметры ГПЗ определяются по эволюции орбит КА, которую контролирует сеть наземных станций. В итоге построена модель, описывающая земной геоид (поверхность ровного гравитационного потенциала) с точностью до 1 м. Задачи КА CHAMP (запуск 2000 г.), GRACE (запуск 2003 г.) состояли в доведении точности определения радиуса геоида до 1 см при пространственном разрешении 550–650 км, т. е. в улучшении существующей модели на два порядка за счет 16-канального бортового GPS-приемника, который может самостоятельно определять свое теперешнее положение. Приемник TRSR-2 (лаборатория реактивного движения, США) принимает сигналы от 12 КА GPS, после чего с интервалом 10 с решается бортовая навигационная задача – определяются компоненты вектора положения и скорости и временная отметка. Данные накапливаются и передаются на Землю для точного восстановления орбиты с погрешностью в еди-

ницы метров при отсутствии искажения сигналов GPS. Еще четыре канала прибора используются для экспериментов по GPS-альтиметрии. Проект CHAMP также предусматривает тщательный учет всех негравитационных возмущений орбиты КА: аэродинамическое сопротивление, давление солнечного излучения, отраженный от Земли свет и др. Для этого КА оснащен акселерометром STAR Национального центра космических исследований Франции (изготовленный Национальным управлением аэрокосмических исследований ONERA), который установлен вблизи центра масс КА.

Полеты КА требуют точного определения их положения наземными средствами. Для этого на нижней плоскости КА (на 250 мм ниже центра масс) установлен лазерный отражатель из четырех призм Laser Retro Reflector с апертурой 38 мм. Благодаря малому размеру отражателя расстояние к КА измеряется с точностью 1–2 мм. Кроме точного определения орбиты и калибровки бортового GPS-приемника отражатель будет использоваться для эксперимента из «двухцветной» лазерной локации. Цель построения новых лазерных станций с лазерами на двух частотах состоит в устранении погрешностей, связанных с неоднородностью атмосферы.

Модель CHAMP обнаруживает только среднemasштабные детали гравитационного поля. Однако с ней можно связать результаты наземных измерений и данные альтиметрии над океанами, добавив необходимые детали. Появится возможность пересчитать высоты, измеряемые космическими навигационными системами относительно земного эллипсоида с погрешностью в несколько сантиметров, в «обычные» высоты относительно уровня моря. Тем самым отпадет необходимость в дорогих геодезических измерениях.

В рамках проекта GRACE для сбора максимально точных данных о ГПЗ два абсолютно идентичных КА «Том» и «Джерри» были выведены на орбиты 500 км над Землей. Расстояние между самими аппаратами составляет

220 км. Изменения между аппаратами фиксируют микроволновым дальномером с точностью до тысячных частиц миллиметра. Положение КА над Землей определяют с помощью системы GPS. По сравнению с CHAMP разрешающая способность аппаратуры повышена приблизительно в два раза [16].

Результатом работы КА «Том» и «Джерри» стала новая гравитационная карта нашей планеты. Разработанные модели обеспечивают определение ускорения свободного падения с погрешностью не хуже 5 мГал при пространственной разрешающей способности 400 км [14].

19 июля 2007 г. Европейское космическое агентство представило в Турине (Италия) КА GOCE (Global Ocean Circulation Experiment) для наблюдений за гравитационным полем и режимом циркуляции океана – первая миссия в рамках программы Европейского космического агентства «Живая планета». КА предназначен для измерений распределения ГПЗ с помощью сверхточного гравитационного градиентометра. Основным подрядчиком этого проекта является итальянская компания Alenia Spazio. Различную аппаратуру для КА предоставили также компании Astrium Gmb (платформу), Alcatel Space Industries (градиентометр) и ONERA (градиентметрический акселерометр).

КА GOCE [13] имеет длину 5 м и диаметр 1 м, оснащен тремя парами трехосных градиентометров, расположенными на расстоянии 0,5 м, 12-канальным GPS-приемником и лазерным отражателем. КА обеспечивает определение аномалий ГПЗ с точностью 1 мГал при пространственной разрешающей способности 100 км, точность определения формы геоида – 1–2 см. Запуск GOCE осуществлен в 2009 г. с космодрома Плесецк с помощью ракеты-носителя «Рокит». Аппарат размещается на высоте около 250 км. В отличие от ранее созданных КА, в которых все научные приборы размещаются внутри корпуса, в GOCE часть аппаратуры размещается в структурных конструкциях.

Предусматривается, что с помощью КА GOCE будет получена уникальная информация,

которую можно использовать в самых разнообразных отраслях: в физике Земли, океанографии, в исследованиях динамики перемещения льдов и изменениях уровня моря.

Все перечисленные выше проекты имеют один общий недостаток – они используют измерения баллистических параметров пробных тел в космосе, которые нуждаются в создании дополнительных специализированных космических средств и специальной аппаратуры. В связи с этой проблемой в последнее время начали осуществляться проекты, которые базируются на радиотехнических измерениях релятивистского гравитационного сдвига частоты электромагнитных волн высокостабильных источников электромагнитного излучения естественного и искусственного происхождения, на существующей космической и наземной инфраструктуре, в частности на использовании уже созданных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Примерами таких проектов могут служить ACES и SAGAS.

ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) – проект Европейского космического агентства, в рамках которого на Международной космической станции в 2015 г. будут размещены высокостабильные атомные часы. Функционирование в микрогравитационной окружающей среде Международной космической станции обеспечит устойчивые и точные координаты времени для различных областей исследований, включая общую теорию относительности, временную и частотную метрологию и др.

В оборудование современных КА включены цезиевые часы для длительной стабильности и водородный мазер для краткосрочной стабильности (или PHARAO и SHM), которые будут генерировать опорную частоту с нестабильностью и погрешностью на уровне  $1 \cdot 10^{-16}$ .

Связь в сверхвысокочастотной области (MWL) и оптическая связь (ELT) позволят сигналам часов ACES стать доступными для наземных лабораторий, оборудованных атомными часами. Сравнения атомных стандартов частоты по типу «космос–Земля» и «Земля–

Земля» будут использованы для исследования общей теории относительности Эйнштейна, включая точное измерение гравитационного смещения частоты «red-shift» излучения от Международной космической станции (МКС) до поверхности Земли под действием ускорения силы тяжести (ожидается измерение красного смещения с погрешностью  $4 \cdot 10^{-11}$ ), поиск временных вариаций фундаментальных постоянных, а также анализ лоренцевской инвариантности. Результаты измерений также могут быть применены в области геодезии, оптической передачи времени и измерения расстояний. Согласно имеющимся данным, часы ACES будут работать в 100 раз точнее моделей, устанавливаемых на современных GPS-спутниках.

Эти эксперименты на МКС по измерению изменения частоты излучения под действием силы тяжести полностью попадает под определение радиофизического гравиметра [5, 9].

Проект SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors) был подан в Европейское космическое агентство в июне 2007 г. в ответ на запрос предложений по программе Cosmic Vision 2015–2025. Предложенная миссия нацелена на исследования в Солнечной системе в 2020–2030 гг. (общая теория относительности, изучение распределения масс в поясе Койпера и системе Юпитера, а также крупномасштабных гравитационных явлений) на дальних расстояниях (вплоть до 53 а.е.д.) при помощи чрезвычайно чувствительных атомных датчиков (оптические часы, абсолютный акселерометр холодного атома, оптическая связь), которые позволят выполнять измерения на несколько порядков лучше, чем современные аналоги.

Высокоточные наблюдаемые переменные (относительная частота, доплеровский сдвиг частоты, негравитационное ускорение) будут вычислены благодаря сочетанию фундаментальных и полученных измерений. Также в ходе миссии локальный гравитационный потенциал может быть измерен с погрешностью ниже

$10^{-17}$  по относительной частоте ( $<10$  см на геоцентрическом расстоянии), которая может быть получена для изменяющихся во времени частей потенциала.

Миссия также позволит улучшить технологии холодного атома PHARAO и лазерной связи LISA (Lasers Ineterferometric Space Antenna), а также развить наземный сегмент (сетевые телескопы для измерений в дальнем космосе и оптические часы) для широкополосной передачи данных в Солнечной системе.

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Автором статьи был разработан радиофизический метод измерений параметров ГПЗ, который основан на измерении величины изменения частоты электромагнитного излучения под действием силы тяжести с последующим определением градиента или ускорения свободного падения. Этот метод имеет две разновидности:

- + дифференциальный радиофизический;
- + интегральный радиофизический.

Техническая разница между этими двумя разновидностями метода заключается в том, что в дифференциальном методе гравитационное смещение частоты измеряется между двумя приемниками электромагнитного излучения, а в интегральном – между источником излучения и приемником.

### Дифференциальный метод измерений

Уравнение дифференциальных измерений получено следующим образом: будем считать, что точки с гравитационными потенциалами  $u_0$  и  $u_1$  разнесены по высоте над Землей на достаточно малое расстояние  $\Delta H$ , на котором переменную  $u$  можно считать практически линейной. Тогда, раскладывая  $u_1$  в ряд поблизости  $u_0$  и ограничиваясь для упрощения анализа линейными по  $\Delta H$  членами разложения, получаем

$$u_1 = u_0 + \frac{\partial u}{\partial H} \Delta H + \dots \quad (1)$$

Поскольку вертикальный градиент потенциала является не чем иным, как ускорением

силы тяжести  $g = \frac{\partial u}{\partial H}$ , то с учетом (1) имеем уравнение  $\frac{f_0 - f_1}{f_0} = g \frac{\Delta H}{c^2}$ , откуда получаем уравнение для определения величины  $g$  по гравитационному сдвигу  $\Delta f$  сигнала с частотой  $f$  во время прохождения этим сигналом некоторого достаточно малого расстояния  $\Delta H$  в неоднородном гравитационном поле:

$$g = \frac{\Delta f}{f} \frac{c^2}{\Delta H}. \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение погрешности для случая, когда измеряются отдельно  $f_0$  и  $f_1$ , имеет вид

$$\frac{\sigma_g^2}{g^2} = 2 \cdot \left[ \frac{c^2}{g \cdot \Delta H} \right]^2 \cdot \frac{\sigma_f^2}{f^2} + \frac{\sigma_{\Delta H}^2}{(\Delta H)^2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что даже имея величину относительной погрешности синхронизации частот опорных генераторов ГНСС, расположенных на разных высотах на уровне  $1 \cdot 10^{-17}$  получаем погрешность определения ускорения свободного падения в виде величины 10 мГал на базе 10 км.

Кроме того, при этом измеряются не отдельные частоты, а непосредственно разница этих частот, поэтому получаем уравнение погрешности для дифференциального метода в виде  $\frac{\sigma_g^2}{g^2} = \frac{\sigma_{\Delta H}^2}{(\Delta H)^2} + \frac{\sigma_{\Delta f}^2}{(\Delta f)^2}$ .

Предположим, что  $\sigma_g = 100$  мГал, т.е.  $\frac{\sigma_g}{g} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{10^3} = 10^{-4}$ .

Если  $\Delta H = 10$  м, то  $\sigma_{\Delta H} = 10^{-4} \cdot 10 \text{ м} = 10^{-4} \times 10^4 \text{ м} = 1$  м можно обеспечить с применением тех же ГНСС-приемников и референцной базовой станции.

При условии разницы высот 10 м  $\Delta f = 10^{-6} \times 10 \cdot 1,5 \cdot 10^9 = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Гц.

Из-за того, что  $\frac{\sigma_{\Delta f}}{\Delta f} = 10^{-4}$ ,  $\sigma_{\Delta f} = \Delta f \cdot 10^{-4} = 1,5 \times 10^{-6} \cdot 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-10}$  Гц, что является требованием, которое достаточно реализуемо.

В рамках проекта УНТЦ № 3856 были проведены экспериментальные исследования радиофизического метода.

Для практического осуществления эксперимента по определению ускорения свободного падения около поверхности Земли был применен дифференциальный метод измерения разницы двух частот с помощью фазового компаратора, в качестве которого используется частотомер CNT-91, который работает в режиме измерения интервалов времени (рис. 1). На оба входа частотомера поступал сигнал с частотой 5 МГц.

Этот метод позволяет получить результаты измерений с высокой точностью даже в случае применения относительно неточных измерительных приборов, если с большей точностью воспроизводится известная величина. Точность метода растет с уменьшением разницы между значениями сравниваемых величин. При этом экспериментально реализуется уравнение (2) по определению ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли.

Для уменьшения влияния на результат погрешностей дальномерных измерений и инструментальных погрешностей, которые имеют в основном случайный характер, было проведено очищение от шумов данных с помощью прямого вейвлет-преобразования (вейвлет db4, 12 уровней декомпозиции), пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и последующего восстановления сигнала [2]. После этого была построена линия тренда. Значение коэффициента при линейном члене уравнения линии тренда дает нам величину гравитационного сдвига частоты, полученную в результате проведения эксперимента. Полученный таким способом временной ряд представляет собой значение абсолютной погрешности измерений относительной нестабильности частоты частотомера CNT-91 с временем усреднения 1 с.

Для частотомера CNT-91 № 1 получено значение коэффициента линейной аппроксимации, которое соответствует разнице частот  $8,73 \cdot 10^{-16}$  и при  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  дает погрешность эксперимента 1,2 %. Для частотомера CNT-91 № 2 получено значение коэффициента линейной аппроксимации с обратным знаком, кото-

рое соответствует разнице частот  $9,04 \cdot 10^{-16}$  и при  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  дает погрешность эксперимента 4,7 %.

При проведении очищения от шума данных относительно линии тренда была выделена систематическая погрешность, учет которой позволяет получить такие суммарные погрешности эксперимента:

- + для CNT-91 № 1 – 0,6 %;
- + для CNT-91 № 2 – 2,9 %.

Таким образом, можно утверждать, что ускорение свободного падения на поверхности Земли с помощью двух ГНСС-приемников, которые серийно производятся на данный момент и имеют специальный частотный выход, может измеряться на базе 10 м с погрешностью до 100 МкГал, что отвечает проведенным теоретическим расчетам.

### Интегральный метод измерений

Проанализируем требования к алгоритму расчета сдвига частоты, когда электромагнитные волны поступают из зон с более слабым гравитационным полем и испытывают гравитационное фиолетовое смещение. При этом [15]

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{1}{c^2}(u_1 - u_0), \quad (4)$$

где  $u_0, f_0$  – гравитационный потенциал, который соответствует положению источника излучения (напр., передатчик геостационарного спутника), и частота несущего сигнала передатчика в этой же точке;  $u_1, f_1$  – гравитационный потенциал и частота несущего сигнала в точке наблюдения;  $c$  – скорость света.

Уравнение (4), которое связывает потенциал  $u_0$  в точке, где сигнал имеет частоту  $f_0$ , с по-

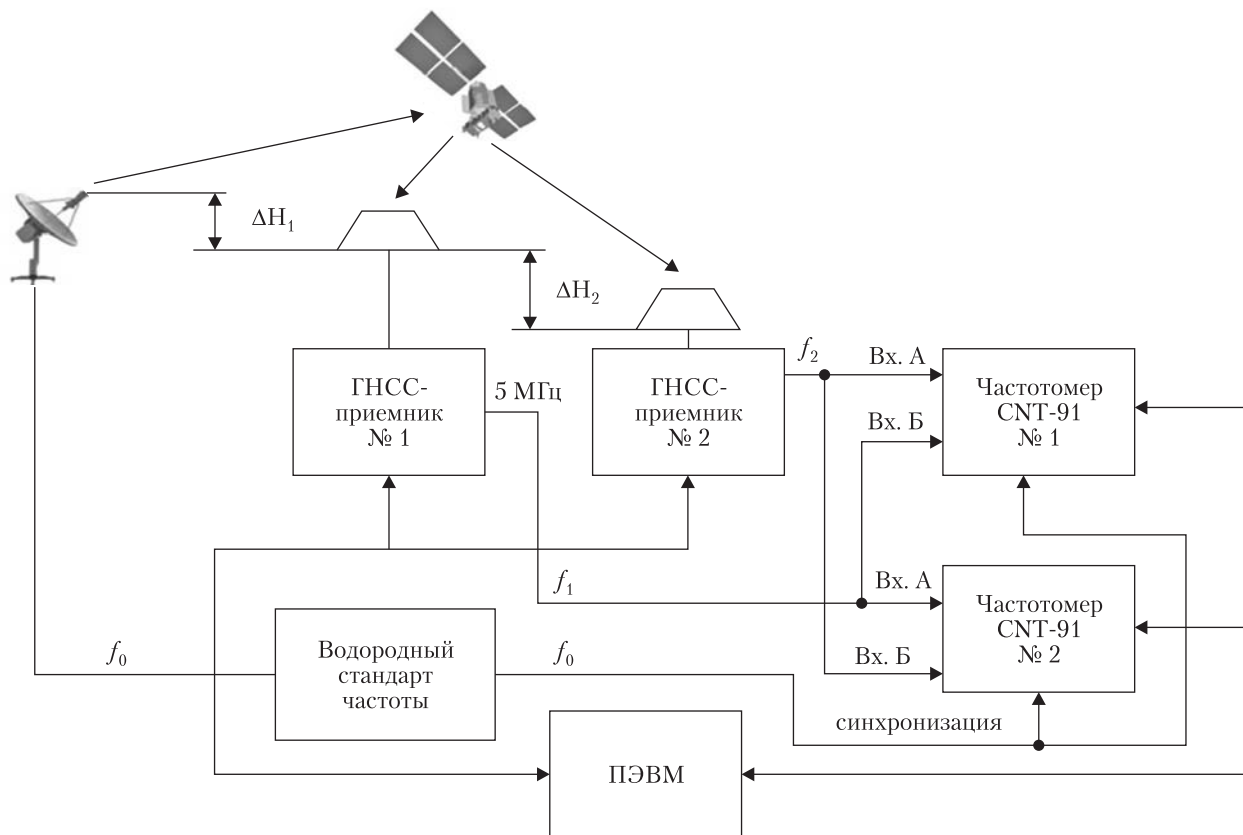


Рис. 1. Схема эксперимента по определению ускорения свободного падения двумя ГНСС-приемниками с перекрестным подключением двух частотомеров

тенциалом  $u_1$  в точке, где частота сигнала равна  $f_1$ , не учитывает возможного относительно движения излучателя и приемника сигнала и может быть представлено в виде

$$u_1 = u_0 + c^2 \left(1 - \frac{f_0}{f_1}\right), \quad (5)$$

где  $u_1, u_0$  – неизвестные (искомые) величины;  $f_1, f_0$  – непосредственно (или косвенно) определяемые частоты сигнала, которые являются исходными величинами для определения  $u_1$  по формуле (5).

Поскольку в общем случае неизвестны как  $u_0$ , так и  $u_1$ , необходимо иметь дополнительные к (5) соотношения, которые связывают  $u_1$  и  $u_0$ . В качестве подобного соотношения можно использовать одну из известных моделей гравитационного поля Земли. Например, представляем гравитационный потенциал в виде разложения по сферическим гармоникам [12]:

$$u(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \cdot P_m(\sin \theta) [C_m \cdot \cos(m\lambda) + S_m \cdot \sin(m\lambda)], \quad (6)$$

где  $r, \theta, \lambda$  – сферические координаты в системе координат с началом в точке центра масс Земли;  $P_m$  – присоединенные полиномы Лежандра;  $C_m, S_m$  – коэффициенты разложения, которые определяются по каким-либо экспериментальным данным на этапе построения модели;  $G, M$  – гравитационная постоянная и масса Земли соответственно;  $R$  – средний радиус Земли.

Формула (6) дает нам необходимое соотношение, которое связывает  $u_0$  и  $u_1$ , поскольку она описывает гравитационный потенциал в произвольном множестве точек околоземного пространства, а следовательно, и в точках с потенциалами  $u_0$  и  $u_1$ .

Коэффициенты разложения  $C_m, S_m$  определяются из системы уравнений

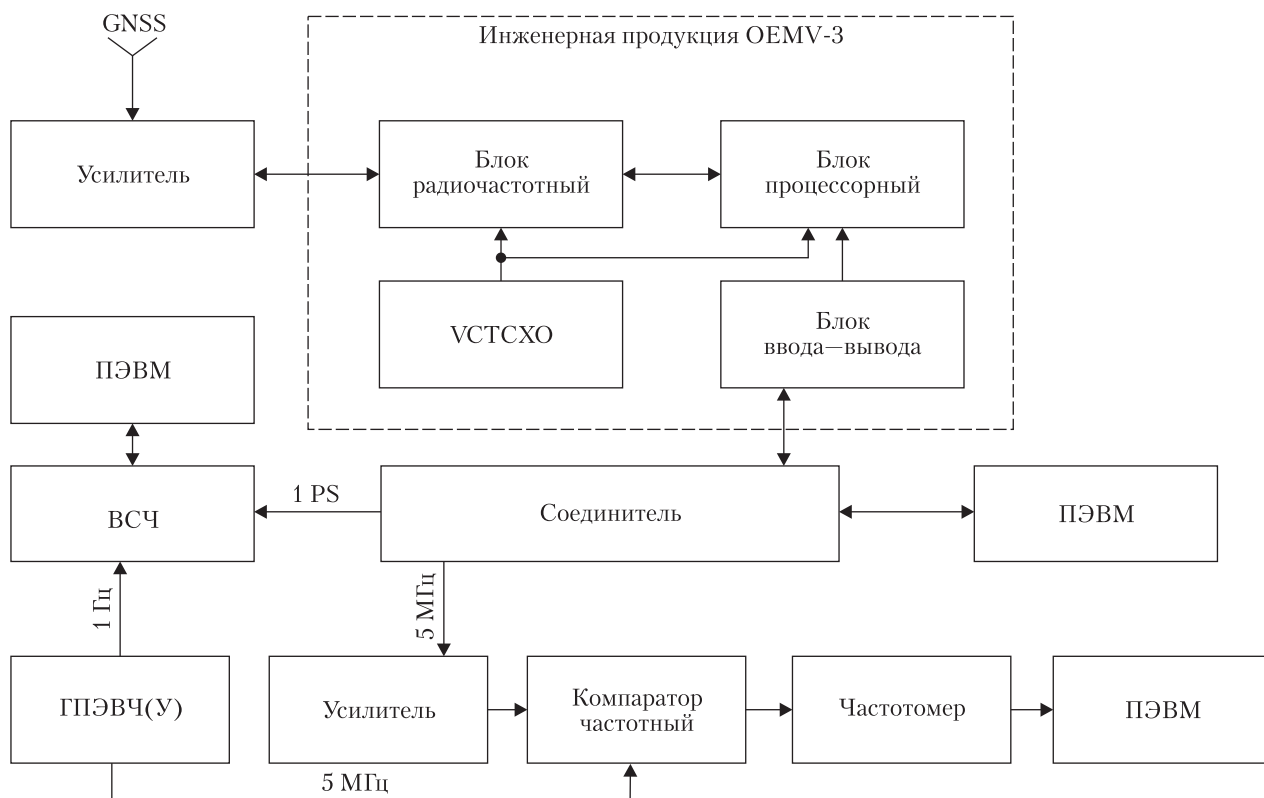


Рис. 2. Структурная схема испытаний программного-технического комплекса «Гравика» с GNSS-приемником DL-V3 GNSS

$$\frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \left( \frac{R}{r_{x_i}} \right)^{l+1} \cdot P_m(\sin \theta_{x_i}) \left[ C_m \cdot \cos(m \lambda_{x_i}) + S_m \cdot \sin(m \lambda_{x_i}) \right] = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \left( \frac{R}{r_{y_j}} \right)^{l+1} \times$$

$$\times P_m(\sin \theta_{y_j}) \left[ C_m \cdot \cos(m \lambda_{y_j}) + S_m \cdot \sin(m \lambda_{y_j}) \right] + c^2 \left( 1 - \frac{f_{y_i}}{f_{x_i}} \right),$$

где  $r_{x_i}, \theta_{x_i}, \lambda_{x_i}$  – сферические координаты некоторого множества точек, помеченных индексом  $i = 1, 2, \dots, I$  ( $I$  – количество этих точек), которые соответствуют  $I$  местоположениям приемника сигналов ( $f_{x_i}$  – значение частоты сигнала, который принимается в этих точках);  $r_{y_j}, \theta_{y_j}, \lambda_{y_j}$  – сферические координаты некоторого множества точек, помеченных индексом  $j = 1, 2, \dots, J$  ( $J$  – количество этих точек), которые соответствуют  $J$  местоположениям излучателя сигналов (положением КА) ( $f_{y_j}$  – значение частоты излучаемого в этих точках сигнала).

Координаты точек  $r_{x_i}, \theta_{x_i}, \lambda_{x_i}$  определяются по данным ГНСС-измерений. Координаты то-

сом  $i = 1, 2, \dots, I$  ( $I$  – количество этих точек), которые соответствуют  $I$  местоположениям приемника сигналов ( $f_{x_i}$  – значение частоты сигнала, который принимается в этих точках);  $r_{y_j}, \theta_{y_j}, \lambda_{y_j}$  – сферические координаты некоторого множества точек, помеченных индексом  $j = 1, 2, \dots, J$  ( $J$  – количество этих точек), которые соответствуют  $J$  местоположениям излучателя сигналов (положением КА) ( $f_{y_j}$  – значение частоты излучаемого в этих точках сигнала).

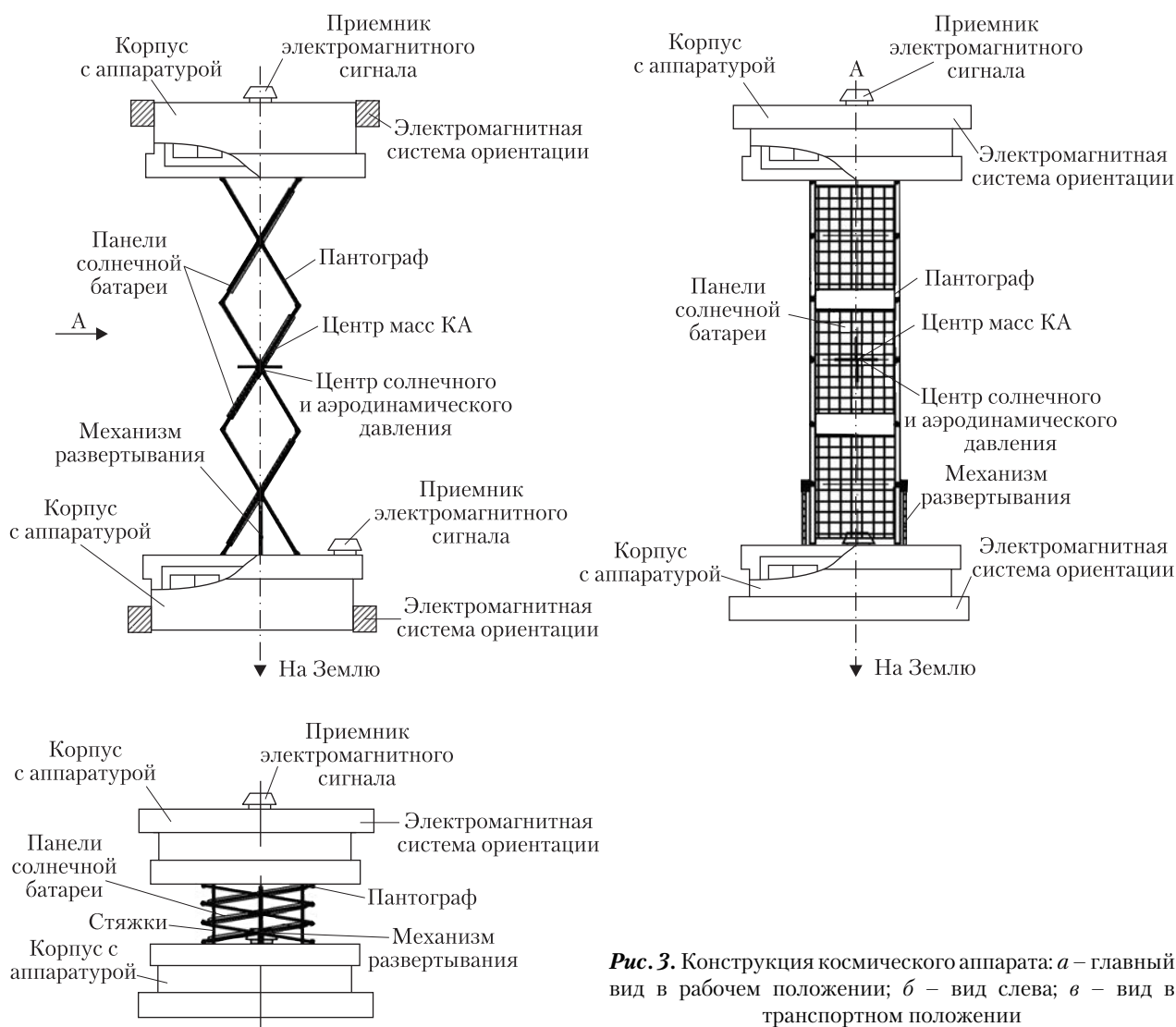


Рис. 3. Конструкция космического аппарата: а – главный вид в рабочем положении; б – вид слева; в – вид в транспортном положении



чек  $r_{yj}, \theta_{yj}, \lambda_{yj}$  определяются по эфемеридам КА, также получаемым во время ГНСС-измерений в навигационном сообщении.

Частоты  $f_{xi}$  измеряются непосредственно из выхода приемника, частоты  $f_{yj}$  определяются с использованием ГНСС-сообщения.

Точность модели определяется количеством членов разложения  $l_{\max}$ , а также точностью определения величин  $r_{xi}, \theta_{xi}, \lambda_{xi}; r_{yj}, \theta_{yj}, \lambda_{yj}; f_{xi}, f_{yj}$  для  $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$  [11].

Структурная схема испытаний интегрального метода программно-технического комплекса «Гравика» с GNSS-приемником DL-V3 изображена на рис. 2.

Проект по экспериментальному исследованию интегрального радиофизического метода планируется реализовать в рамках совместных работ с Национальным техническим университетом Украины «Киевский политехнический институт» согласно Генеральному соглашению между ГП «КБ «Южное» и высшими учебными учреждениями МОН Украины.

### МОНИТОРИНГ ПЛАЗМОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В предлагаемом методе для описания магнитного поля Земли используется математическое представление World Magnetic Model (WMM). Однако для определения параметров WMM используются интегральные данные (отражающие вклад всего пространственного профиля магнитного поля на пути электромагнитной волны), полученные в результате многочастотных ГНСС-измерений [4].

Для восстановления геомагнитного поля с помощью ГНСС-измерений используется упрощенная модель, которая не учитывает рефракционных эффектов высших порядков для ГНСС-сигналов в неоднородной ионосфере и предполагает выполнение измерений на двух частотах двумя приемниками на базе известной длины:

$$N_e = \frac{2}{C_x \cdot L} \cdot \frac{L \cdot (f_1^3 - f_2^3) - [f_1^3 \cdot \Delta S(f_1) - f_2^3 \cdot \Delta S(f_2)]}{(f_1 - f_2)},$$

$$H_0 = -\frac{f_1 f_2}{C_y \cdot \cos \theta} \cdot \frac{L \cdot (f_1^2 - f_2^2) - [f_1^2 \cdot \Delta S(f_1) - f_2^2 \cdot \Delta S(f_2)]}{L \cdot (f_1^3 - f_2^3) - [f_1^3 \cdot \Delta S(f_1) - f_2^3 \cdot \Delta S(f_2)]}.$$

Здесь  $N_e$  – электронная концентрация;  $H_0$  – величина геомагнитного поля (напряженность);  $\theta$  – угол между  $H_0$  и направлением распространения сигнала;  $\Delta S = S_A - S_B$ ;  $S_A, S_B$  – результаты измерений ГНСС-приемниками псевдодальностей в точках  $A$  и  $B$  на частоте  $f_i$ ;  $C_x, C_y$  – известные константы;  $f_i$  – частота ГНСС-сигналов;  $L$  – предварительно измеренное расстояние между двумя приемниками.

### КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МИКРОСПУТНИКА

С учетом специфических требований по реализации дифференциального радиофизического метода был разработан проект гравитационно-ориентируемого геофизического микроспутника. Структурная схема КА представлена на рис. 3.

Микроспутник состоит из корпуса с аппаратурой, который выполнен в виде двух отдельных частей, соединенных между собой траверсой, которая представляет собой два параллельно расположенных шарнирно-параллелограмных пантографа со звеньями и прикрепленными прямоугольными панелями солнечных батарей. Такая конструкция космического аппарата позволяет совместить центр масс с центром солнечного и аэродинамического давления на солнечную батарею, что исключает воздействие внешнего возмущающего момента на ориентацию КА.

Установка на частях корпуса приемников электромагнитного сигнала позволит измерять параметры гравитационного поля с использованием дифференциального способа радиофизического метода, что не исключает также реализацию интегрального радиофизического метода и обеспечит мониторинг плазмосферы и магнитосферы Земли.

### ВЫВОДЫ

Проект геофизического микроспутника является инновационным в смысле как метода

измерений, так и конструктивно-компоновочной схемы КА, поскольку:

- ✦ радиофизический метод позволяет измерять гравитационный потенциал и ускорение свободного падения [5–10];
- ✦ конструктивно-компоновочная схема геофизического микроспутника [3] исключает необходимость использования активной системы стабилизации, обеспечивает постоянную освещенность солнечных батарей, исключает возмущающий момент, обусловленный воздействием внешних факторов, и позволяет решать задачи измерения параметров ГПЗ и обеспечить мониторинг плазмосферы и магнитосферы Земли;
- ✦ радиофизический метод основан на измерении релятивистского эффекта гравитационного смещения частоты электромагнитного сигнала, который существенно меньше доплеровского изменения частоты и влияния среды распространения сигнала.

Эти вопросы в статье не рассмотрены, но должны стать предметом изучения в последующих работах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *БИНТИ* (Бюро иностранной научно-технической информации) // Наука и жизнь. – 1977. – № 1. – С. 81.
2. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
3. *Патент* України а2013 09575. МПК В64G 1/34, 1/44. Космический аппарат / Матвиенко С.А., Андросов М.А. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 31.07.2013.
4. *Матвиенко С.А., Прокопов А.В., Романько В.Н., Копыл В.К.* О возможности определения локальных значений электронной концентрации ионосферы и магнитного поля Земли с помощью ГНСС измерений на малой базе // Сб. науч. тр. VII Международной научно-технической конференции «Метрология и измерительная техника» (Метрология-2010) – 2010. – Т 1. – Харьков: ННЦ «Институт метрологии». – С. 189–191.
5. *Матвиенко С.А.* Свидетельство об авторском праве № 42468 «Твір науково-технічного характеру «Радіофізичний метод вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі».
6. *Патент* Украины 83239. МПК G 01 V 7/00. Спосіб визначення параметрів гравітаційного поля / Макаров А.Л., Матвиенко С.А., Мелешко А.В., Андросов М.А. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 20.02.06; Опубл. 25.06.08; Бюл. № 12.
7. *Патент* Украины 84704. МПК G 01 S 5/14. Супутникова радіонавігаційна система / Матвиенко С.А. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 19.12.05; Опубл. 25.11.08; Бюл. № 22.
8. *Патент* Украины 90960. МПК G 01 S 5/14. Супутникова радіонавігаційна система / Матвиенко С.А. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 24.12.08; Опубл. 10.06.10; Бюл. № 11.
9. *Патент* Украины 90961. МПК G 01 V 7/00. Радіофізичний гравіметр / Матвиенко А.П., Матвиенко С.А., Мелешко А.В. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 24.12.08; Опубл. 10.06.10; Бюл. № 11.
10. *Патент* Украины 98358. МПК G 01 V 7/14. Спосіб визначення геодезичних параметрів та пристрій для його здійснення / Матвиенко С.А., Романько В.М., Романько О.В. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Заявл. 03.06.10; Опубл. 10.05.12; Бюл. № 9.
11. *Перерва В.М.* Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов / В.М. Перерва и др. // Космическая наука и технология. – К.: ЦАКИЗ ИГН ИАН Украины, 2002. – Т. 8. – № 2/3. – С. 187.
12. *Gravitational redshift at INRIM / D. Calonico, A. Cina, I.H. Bendea, F. Levi, others // Metrologia. – 2007. – № 44. – P. 44–48.*
13. *Koop R.* The Future of Satellite Gravimetry: Report from the Workshop on The Future of Satellite Gravimetry / R. Koop, R. Rummel // 12–13 April 2007. – ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. – 22 p.
14. *Reigber Ch.* CHAMP Mission Status / Ch. Reigber, H. Luehr, P. Schwintzer // Advances in Space Research. – 2002. – V. 30. – N 2. – P. 129–134.
15. *Schiller S.* Einstein gravity explorer – a class-m fundamental physics mission proposal for cosmic vision 2015-2025 / S. Schiller // Experimental astronomy. – 2009. – V. 23. – 573 p.
16. *Zhu S.* Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data / S. Zhu, C. Reigber, R. Konig // J. of Geodesy. 2004 – V. 78. – Is. 1–2. – P. 103–108.

*С.А. Матвієнко*

Державне підприємство «Конструкторське бюро  
"Південне" ім. М.К. Янгеля», Дніпропетровськ

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПРОЕКТ ГЕОФІЗИЧНОГО  
МІКРОСУПУТНИКА

Стаття присвячена проблемі вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі з космосу. Автором розроблено оригінальний радіофізичний метод і два його різновиди виміру параметрів гравітаційного поля Землі, що заснований на вимірюванні гравітаційного зрушення частоти електромагнітного випромінювання з використанням існуючих глобальних навігаційних супутникових систем. Запропоновано конструктивно-компонувальну схему геофізичного мікросупутника, що реалізує радіофізичний метод вимірювань гравітаційного поля Землі і забезпечує моніторинг плазмосфери і магнітосфери Землі.

*Ключові слова:* гравітаційне поле Землі, радіофізичний метод, глобальні навігаційні супутникові системи.

*S.A. Matviyenko*

M.K. Yangel State Design Office «Pivdenne»,  
Dnipropetrovsk

CONCEPTUAL DESIGN OF GEOPHYSICAL  
MICROSATELLITE

The article covers the issue of Earth gravitational field (EGF) parameters measurement from space. The radiophysical method of measurement of gravitational frequency shift of electromagnetic radiation using existent GNSS and its two variants are developed by the author. The design-layout drawing of geophysical microsatellite, which implements the radiophysical method of EGF measurement and provides Earth plasmasphere and magnetosphere monitoring, is offered.

*Key words:* earth gravitational field, radiophysical method, GNSS.

Стаття надійшла до редакції 26.05.14