

УДК389.14 (621.371)

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

**С. Матвиенко**

Государственное КБ “Южное”, г. Днепропетровск

**Г. Сидоренко, В. Романько, В. Копыл**

Национальный научный центр “Институт метрологии”, г. Харьков

**А. Прокопов**

Национальный институт гражданской обороны, г. Харьков

**О. Романько**

ООО “ПО Овен”

**И. Тревого**

Национальный университет “Львовская политехника”

**Ключевые слова:** гравитация, релятивистские эффекты, смещение частоты, ГНСС.

### Введение

Для исследований околоземного и космического пространства, как и для многих других сторон человеческой деятельности, сегодня характерны процессы глобализации. Например, в 2000 г. согласно проекту CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) запущен специальный ИСЗ, оснащенный, наряду с прочей научно-технической аппаратурой, акселерометрами и GPS-приемниками. Разработанные модели обеспечивают определение ускорения свободного падения с погрешностью не хуже 5 mGal при пространственном разрешении 400 км [1]. В рамках проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в 2002 г. запущены уже два идентичных ИСЗ, разнесенные на расстояние 220 км. По сравнению с CHAMP разрешающая способность аппаратуры повышена примерно в два раза [2]. Ожидается, что реализация проекта GOCE (Global Ocean Circulation Experiment) позволит достигнуть погрешности восстановления ускорения силы тяжести до уровня 1 mGal при пространственном разрешении 100 км [3].

К недостаткам перечисленных выше проектов можно отнести недостаточную представительность исходных данных, используемых для построения моделей гравитационного потенциала. Предполагается, что модель строится для всего околоземного пространства, а исходные экспериментальные данные при этом представляют собой набор дискретных значений результатов измерений характеристик гравитационного потенциала на орбите ИСЗ.

Таким образом, актуализируется разработка новых методов исследования (восстановления) гравитационного поля Земли, околоземного пространства и Луны, свободных от недостатков известных методов или же расширяющих их возможности. Представляет интерес анализ перспектив использования эффекта гравитационного смещения частоты (“red shift”) как основы предложенного в работах [4, 5] радиофизического метода определения характеристик гравитационного поля Земли.

Гравитационное красное смещение – один из трех классических эффектов, предусмотренных общей теорией относительности, созданной А. Эйнштейном [6]. Во второй половине XX века релятивистские эффекты превратились из экзотики в повседневную реальность не только для фундаментальных научных исследований, но и для целого ряда широко распространенных технических приложений. К таким приложениям относятся, в частности, созданные во второй половине XX века глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), а также находящиеся в стадии разработки аналогичные системы Galileo (Европейский Союз), Compass (Китай), QZSS (Япония). Указанные системы могут функционировать лишь при условии введения так называемой релятивистской поправки к частотам эталонных генераторов из состава бортовой аппаратуры ИСЗ, входящих в ГНСС [7, 8].

Цель этой работы – показать перспективы практической реализации радиофизического метода определения характеристик гравитационного поля гравитирующих тел на основе измерения релятивистского сдвига частоты электромагнитного излучения радиотехническими средствами измерительной техники.

### Уравнение измерений ускорения свободного падения

Рассмотрим особенности использования релятивистских эффектов для измерения ускорения свободного падения (УСП), определяемого как ускорение, сообщаемое телу под действием притяжения планеты или другого астрономического тела в безвоздушном пространстве. Известно, что изменение частоты сигнала, прошедшего из точки с гравитационным потенциалом  $u_1$  в точку с гравитационным потенциалом  $u_0$ , определяется соотношением (пренебрегая другими релятивистскими эффектами, а также эффектом Доплера для движущихся тел) [8, 9]:

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

Здесь частота  $f_0$  соответствует гравитационному потенциалу  $u_0$ , а частота  $f_1$  – потенциалу  $u_1$ ,  $c$  – скорость света.

Если считать частоты  $f_1$ ,  $f_0$  непосредственно (или косвенно) определяемыми исходными величинами, то в (1) в общем случае остаются неизвестными как  $u_0$ , так и  $u_1$ . Поэтому необходимо иметь дополнительные к (1) соотношения, связывающие  $u_0$  и  $u_1$ , например, можно воспользоваться одной из известных моделей гравитационного поля Земли [10] – представлением гравитационного потенциала в виде разложения по сферическим гармоникам. Такой подход изложен в [11].

Примем, что точки с потенциалами  $u_0$  и  $u_1$  расположены в медленно меняющемся гравитационном поле или же разнесены по направлению градиента гравитационного поля на достаточно малое расстояние  $\Delta H$ , на котором изменение  $u$  можно считать практически линейным. Тогда, раскладывая  $u_1$  в ряд вблизи  $u_0$  и ограничиваясь для упрощения анализа линейными по  $\Delta H$  членами разложения, получаем:

$$u_1 = u_0 + \frac{\partial u}{\partial H} \Delta H + \dots \quad (2)$$

Поскольку градиент потенциала есть не что иное, как УСП в любой точке пространства

$$g = \frac{\partial u}{\partial H},$$

то уравнение (1) с учетом (2) можно представить в виде

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = g \frac{\Delta H}{c^2},$$

откуда получаем уравнение измерений для определения величины УСП  $g$  по гравитационному сдвигу  $\Delta f$  сигнала со средней частотой  $f$ , если этот сигнал проходит некоторое расстояние  $\Delta H$  в неоднородном гравитационном поле

$$g = \frac{\Delta f}{f} \frac{c^2}{\Delta H}. \quad (3)$$

### Эксперименты по определению гравитационного смещения частоты на Земле

Едва ли не первые экспериментальные исследования возможности выявления эффекта красного смещения выполнили в 1959 г. профессор Гарвардского университета Роберт Паунд и аспирант Глен Ребка. В результате эксперимента на базе 22,5 м был получен сдвиг частоты  $2,57 \cdot 10^{-15}$  с погрешностью 10 % [12]. Другим классическим подтверждением теории гравитационного красного смещения является эксперимент по определению сдвига частоты атомного стандарта (водородного мазера), который с помощью суборбитальной зондирующей ракеты Scout был поднят на высоту 10273 км [13, 14]. После учета ряда побочных факторов теорию гравитационного смещения частоты было подтверждено с точностью порядка  $10^{-4}$ .

Из последних достижений по экспериментальному измерению эффекта гравитационного красного смещения следует отметить работу [15]. Авторы провели лабораторный опыт с атомами цезия, охлажденными

до чрезвычайно низкой температуры и захваченными в ловушку. Высокое качество интерферометра позволило достичь точности измерений в  $7 \cdot 10^{-9}$ . Успех эксперимента обеспечила огромная частота, на которой выполняли измерения, примерно равная  $3 \cdot 10^{25}$  Гц.

В Национальном научном центре “Институт метрологии”, который является головной организацией Украины в области измерения времени и частоты, осуществлен ряд экспериментов [16, 17] по измерению гравитационного смещения частоты сигналов ГНСС, которые излучаются в относительно низкочастотном радиодиапазоне (1,5 ГГц). Это обстоятельство позволяет применять при планировании и проведении экспериментов достаточно широко распространенное оборудование и прошедшие метрологическую аттестацию радиотехнические средства измерительной техники.

Для практической реализации эксперимента по определению УСП вблизи поверхности Земли реализован дифференциальный метод измерения разности частот сигналов, формируемых на выходе двух ГНСС-приемников. Измерения проводились с помощью фазового компаратора, которым стал работающий в режиме измерения интервалов времени частотомер CNT-91 (см. рис. 1).

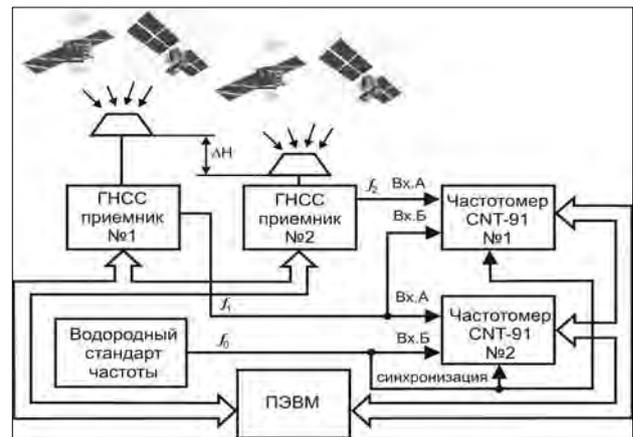


Рис. 1. Схема эксперимента по определению ускорения свободного падения двумя ГНСС-приемниками с разнесенными по высоте антеннами и перекрестным подключением

Для увеличения точности эксперимента разность высот размещения антенн ГНСС приемников доведена до  $\Delta H = 7,905$  м и их частотные выходы были подключены к двум частотомерам перекрестным образом в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Дифференциальный метод позволяет получать результаты измерений с высокой точностью. Следует отметить и возможности дифференциального метода по компенсации некоторых видов погрешностей, возникающих при ГНСС-измерениях.

Чтобы получить уравнения измерений метода с учетом релятивистского эффекта Доплера второго порядка, запишем такие уравнения:

для ГНСС-приемника № 1

$$\frac{f_0 - f_1}{f_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{c^2} (u_0 - u_1);$$

для ГНСС-приемника № 2

$$\frac{f_0 - f_2}{f_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{c^2} (u_0 - u_2);$$

разность этих уравнений

$$\frac{f_0}{f_1} - \frac{f_0}{f_2} = \frac{1}{c^2} (u_2 - u_1).$$

После преобразования

$$\frac{f_0}{f_1 f_2} (f_2 - f_1) = \frac{1}{c^2} (u_2 - u_1),$$

с учетом того, что:

$$g = \frac{du}{dH} = \frac{u_2 - u_1}{\Delta H} \quad \text{и} \quad u_2 - u_1 = \Delta H \cdot g,$$

получаем выражение

$$\frac{f_0}{f_1 f_2} (f_2 - f_1) = \frac{1}{c^2} g \Delta H.$$

Учитывая, что  $f_1 \approx f_2 \approx f_0$ , получим уравнение измерений в виде

$$g = \frac{c^2}{\Delta H} \cdot \frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{c^2}{\Delta H} \cdot \frac{\Delta f}{f}.$$

Т.е. получено уравнение измерений, аналогичное уравнению (3). Таким образом, дифференциальный метод измерений позволяет избавиться от необходимости учитывать при измерениях релятивистский эффект Доплера второго порядка.

Для оценки вклада инструментальной погрешности частотомера CNT-91 в суммарную погрешность был выполнен эксперимент. На оба входа частотомера подан сигнал с частотой 5 МГц от водородного стандарта частоты. Полученные результаты показывают, что, поддерживая нормальные внешние условия и установив специальные режимы работы частотомера CNT-91, можно получить разрешающую способность измерений

$5 \cdot 10^{-13}$  с при относительной систематической погрешности  $5,6 \cdot 10^{-17}$ . Это позволяет минимизировать вклад инструментальной погрешности частотомера CNT-91 в суммарную погрешность эксперимента.

Результаты одной из сессий экспериментальных наблюдений представлены на рис. 2.

Для определения систематических погрешностей измерительных приборов частотомеры были подключены перекрестным образом. Чтобы уменьшить влияние на результат погрешностей дальномерных измерений и инструментальных погрешностей, имеющих в основном случайный характер, выполнено обесшумливание данных с помощью прямого вейвлет-преобразования (вейвлет db4, 12 уровней декомпозиции), пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и дальнейшего восстановления сигнала [18]. После этого построена линия тренда. Значение коэффициента при линейном члене уравнения линии тренда и дает нам величину гравитационного смещения частоты, полученную в результате эксперимента. Принятые меры позволили получить такие суммарные погрешности эксперимента:

– для CNT-91 № 1 0,6 %;

– для CNT-91 № 2 2,9 %. Конечно же,

полученные результаты в пересчете в абсолютные значения дают погрешности в десятки Гал. Однако следует заметить, что первые эксперименты Паунда – Ребки давали погрешность 10 %, а авторам неизвестны другие изыскания, кроме приведенных в этой статье, по проведению измерений гравитационного смещения частоты в радиодиапазоне.

Таким образом, можно утверждать, что ускорение свободного падения на поверхности Земли с помощью двух ГНСС-приемников, имеющих специальный частотный выход, может измеряться на базе 10 м с точностью до 100 мГал.

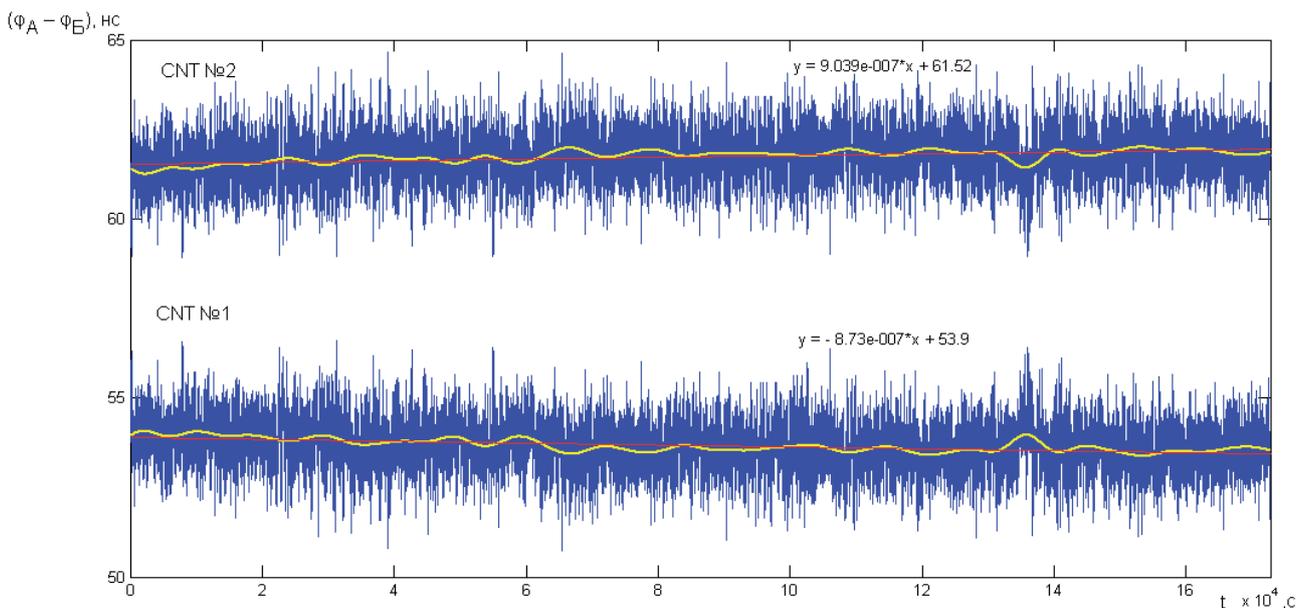


Рис. 2. Разность фаз сигналов с частотой 5МГц на выходе опорных генераторов приемников FlaxPak с перекрестным подключением двух частотомеров CNT-91 при разности высот размещения антенн  $\Delta H=7,905$  м на интервале времени измерения двое суток

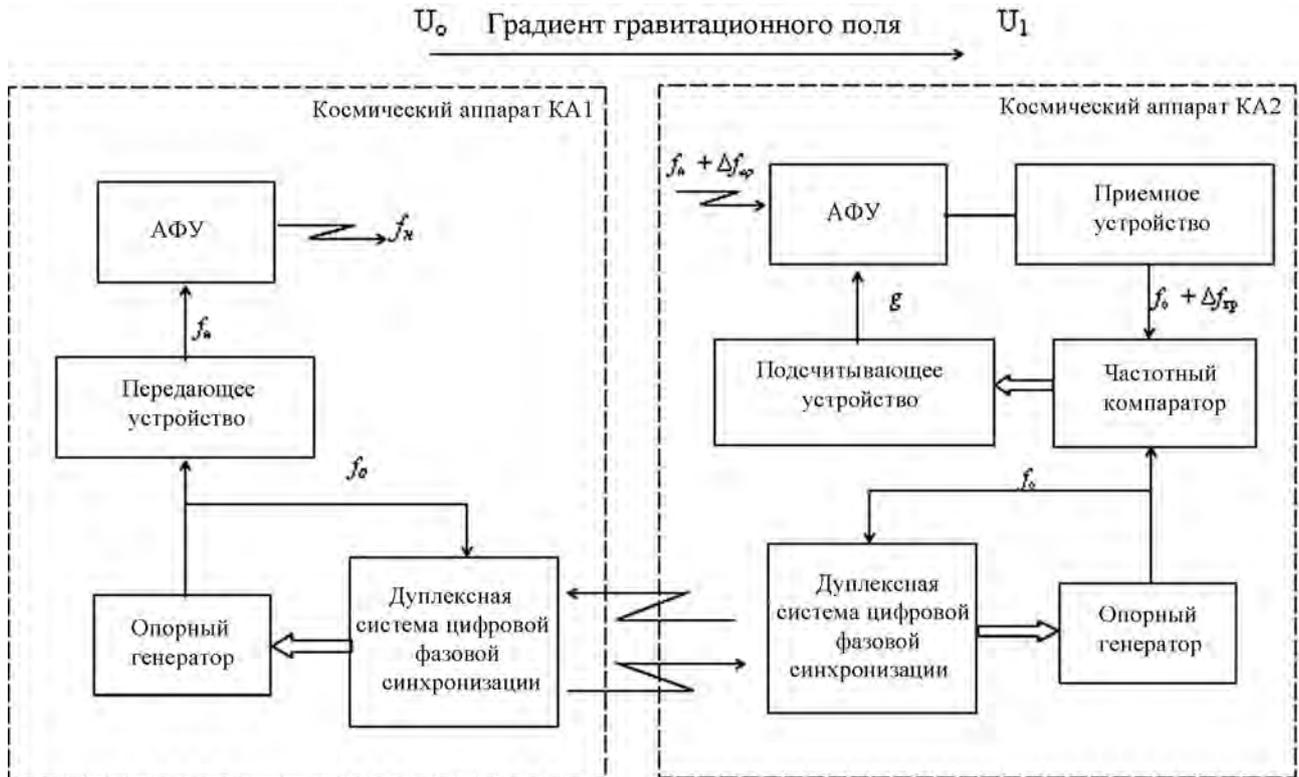


Рис. 3. Схема измерения ускорения свободного падения с помощью двух космических аппаратов

### Предложения по измерению гравитационного поля Луны

Эксперимент по определению величины гравитационного смещения в радиодиапазоне с применением ГНСС показал, что в наземных условиях сложно достигнуть необходимого уровня точности, прежде всего, из-за невозможности преодолеть ограничения, налагаемые окружающей средой, погрешностями приемной аппаратуры потребителя, прочими погрешностями частотно-временных измерений, имеющих в основном случайный характер. Поэтому проведение экспериментов в условиях космической “лаборатории” – необходимый и весьма обоснованный шаг. Тщательно разработанный эксперимент космического базирования по измерению гравитационного смещения частоты может быть значительно точнее наземного. Изменяемые гравитационные потенциалы, большие расстояния, термостабилизированное окружение, возможность компенсации негравитационных шумов, – это те благоприятные факторы, которые на основе существующих технологий позволяют с выгодой использовать уникальные космические условия для измерения ускорения свободного падения в окрестностях гравитирующего тела.

Рассмотрим два метода реализации уравнения (3) для измерения гравитационного поля Луны.

Принцип измерения ускорения свободного падения в околорунном пространстве достаточно просто реализовать с помощью двух космических аппаратов, движущихся по направлению к Луне друг за другом (см. рис. 3).

По уравнению (3) можно определить требования к точности измерений частоты сигнала с помощью предлагаемого метода в условиях, характерных для известных методов CHAMP, GRACE, GOCE. Уравнение погрешности для случая, когда измеряются отдельно частоты  $f_0$  и  $f_1$ , имеет вид [11]

$$\frac{m_g^2}{g^2} = 2 \cdot \left[ \frac{c^2}{g \cdot \Delta H} \right]^2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2} + \frac{m_{\Delta H}^2}{(\Delta H)^2}. \quad (4)$$

Если измерения разности расстояния между космическими аппаратами можно выполнить с требуемой точностью, например, с помощью лазерного дальномера, из (6) получаем

$$\frac{m_g}{g} = 1,41 \cdot \left[ \frac{c^2}{g \cdot \Delta H} \right] \cdot \frac{m_f}{f}. \quad (5)$$

Исходя из возможностей методов CHAMP, GRACE, GOCE, ограничимся требованиями к точности измерения УСП около 1 мГал. Точность синхронизации частот опорных генераторов космических аппаратов (КА), которую можно достичь при помощи дуплексных систем, составляет  $\sim 10^{-15} \dots 10^{-16}$ . Точность измерения относительной разности частот – на порядок выше. Таким образом, из уравнения (5) следует, что для измерения ускорения силы тяжести в 1 мГал необходимо расстояние между КА (опорными генераторами) по градиенту гравитационного поля не менее 100–150 км.

На современном уровне технического развития, для достижения лучших результатов, необходимо применять опорные генераторы с более высокой как кратковременной, так и долговременной стабильностью. Существенным ограничением реализации ме-

тогда измерения ускорения свободного падения является потенциальная точность дистанционной синхронизации по частоте двух стандартов, расположенных на достаточно большом удалении друг от друга. Известные методы синхронизации позволяют достичь точности синхронизации в пределах одной наносекунды на длительных интервалах усреднения.

В качестве второго метода измерения УСП гравитационного поля Луны можно рекомендовать реализацию, допустим, на спускаемом аппарате, эксперимента по установке на измеренном с высокой точностью расстоянии двух приемников электромагнитного излучения. Источником электромагнитного излучения может служить любой расположенный вдоль линии градиента гравитационного поля объект как искусственного, так и естественного происхождения. Сигналы с частотных выходов приемников подаются на компаратор, и измеряется разность фаз принятых сигналов, т. е. реализуется дифференциальный метод измерения.

Следует заметить, что представленные в этой статье экспериментальные результаты и предложения относительно дальнейших исследований имеют большое практическое значение. Так, в настоящее время имеется ряд предложений (в частности, проект SYPOR [19, 20]) по теоретическому обоснованию полностью релятивистской ГНСС, идеология которой должна быть построена на принципах теории относительности (необходимости в релятивистских поправках в этом случае нет [21]).

Практическая реализация релятивистского подхода требует повысить точность пространственно-временных измерений, поэтому совершенствованию эталонов времени-частоты, а также методов их сличений, в том числе с учетом релятивистских эффектов, в настоящее время уделяется очень большое внимание. Существует огромное число публикаций, посвященных этой проблеме. Достаточно полное представление о состоянии и перспективах развития время-частотных измерений можно получить, ознакомившись с трудами последних международных конференций. Например, с тезисами и презентациями симпозиума [22], где идет речь об атомных и лазерных (на эффекте лазерного охлаждения атомов) эталонах времени-частоты, системах синхронизации и сравнения высокостабильных частот с помощью микроволновых и оптических линий связи, а также о новых проектах, посвященных разработке как наземного, так и бортового время-частотного оборудования. Среди таких проектов следует отметить проект Европейского космического агентства ACES (Atomic Clock Ensemble in Space). Цель проекта – достичь нестабильности частоты на уровне  $10^{-16}$  в условиях международной космической станции. Проект SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors), представленный Европейским космическим агентством (ЕКА), нацелен на расширение фундаментальных исследований в солнечной системе после 2015 года. Проект подан на конкурс ЕКА, где уже рассматривается более 50 предложений [23], в том числе проект EGE (Einstein

Gravity Explorer), также посвященный фундаментальным исследованиям на основе высокоточных время-частотных измерений. В 2011 г. предполагается реализация проекта по исследованию гравитационного поля Луны “GRAIL”.

### Выводы

1. Практическая реализация радиофизического метода определения характеристик гравитационного поля гравитирующих тел, к которым относится Луна, на уровне точности, соответствующей проектам CHAMP, GRACE, GOCE, возможна на основе существующих технологий. Экспериментально проверить метод проще всего с использованием международной космической станции (МКС) – принимая во внимание предложения о размещении на ее борту высокоточных стандартов частоты.

2. Дифференциальные измерения при реализации радиофизического метода определения характеристик гравитационного поля позволяют существенно повысить потенциальную точность метода. Одной из важных задач по подготовке такого эксперимента следует считать предварительные экспериментальные исследования методов и средств высокоточных время-частотных измерений, а также анализ возможностей существующей и перспективной аппаратуры для ГНСС-измерений.

3. Использование релятивистских методов измерения делает реальной возможность реализации проектов по измерению гравитационного поля дальних космических объектов, в том числе и Луны.

### Дальнейшие перспективы

Следует отметить, что впечатляющие темпы прогресса в области высокостабильных атомных и оптических часов вызвали активную дискуссию относительно того, как этот прогресс скажется на геодезии и геофизике. В докладе [24], например, прямо говорится, что будущая геодезия должна быть релятивистской. Результаты этой дискуссии (в частности, представленные на европейских и международных конференциях [25, 26]) пока еще не вышли за рамки общих технических предложений, но предсказывают широкое использование релятивистского подхода для решения геодезических и геофизических задач.

### Литература

1. Reigber Ch., Luehr H. and Schwintzer P. CHAMP Mission Status // *Advances in Space Research*, 2002. Vol. 30, № 2. – P. 129–134.
2. Zhu S, Reigber C, Konig R. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data// *JOURNAL OF GEODESY*, Sept. 2004, Vol. 78, Issue 1–2. – P. 103–108.
3. Rebhan H., Aguirre M., Johannessen J., (2000). The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Mission – GOCE // *ESA Earth Observation Quarterly* 66: 6-11 (см. на сайте [http://www.esa.int/esaLP/GTCVCKSC\\_LPgoce\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/GTCVCKSC_LPgoce_0.html)).
4. Эйнштейн А. Собрание научных трудов / А. Эйнштейн. – М., Наука, 1965. – Т. 1. – 702 с.
5. Matvienko S.A. Global monitoring of Earth gravitational field utilizing space navigation systems //

- Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment – 2005.
6. Матвиенко С.А. Патент №84704 від 25.11.2008. Заявлено 19.12.2005. МПК 7: G01S 5/14. Супутникова радіонавігаційна система.
  7. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф; Пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. Ліхтенеггер Р., Коллінз Д. – К.: Наук. думка, 1995 – 380 с.
  8. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativity. – v. 6. – 2003. – P. 1 – 45. – <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume6/2003-1ashby/>.
  9. Schiller S. and etc. Einstein gravity explorer – a class-m fundamental physics mission proposal for cosmic vision 2015–2025, experimental astronomy, volume 23, number 2 / mars 2009. – 573 p.
  10. Бордовицина Т.В. Теория движения искусственных спутников Земли / Т.В. Бордовицина, В.А. Авдюшев. – Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 178 с.
  11. К теории радиофизического метода определения гравитационного потенциала Земли / С.А. Матвиенко, В.Н. Романько, А.В. Прокопов и др. // Украинский метрологический журнал. – 2009. – № 1. – С. 6–10.
  12. Pound R.V., G.A. Rebka Jr. (1 ноября 1959). Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance. Physical Review Letters 3 (9): 439–441.
  13. Vessot R., Levine M. A test of the equivalence principle using a space-borne clock. Gen. Rel. Grav. vol.10. – P.181–204 (1979).
  14. Турышев С.Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований / С.Г. Турышев. УФН 179 3 (2009). – С. 13–26.
  15. Holger Müller, Achim Peters, Steven Chu. A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves. Nature 463, 926–929 (18 February 2010).
  16. Експериментальні дослідження по застосуванню GNSS-приймача для реалізації радіофізичного методу визначення гравітаційного потенціалу Землі / С.А. Матвиенко, О.В. Прокопов, В.М. Романько, О.М. Романько та ін. // Частина I // Український метрологічний журнал. – 2010. – Вип. 1. – С. 7–13. Частина II // Український метрологічний журнал. – 2010. Вип. 2. – С. 5–12.
  17. Prokopov A., Matvienko S., Meleshko A. a.a. Relativistic effects in global satellite navigation systems // Acta Astronautica. – 2009. – V. 64. – № 1. – P. 67–74.
  18. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 2-е изд., доп. и перераб. – 400 с.
  19. Coll B. Elements for a theory of relativistic coordinate systems. Formal and physical aspects. – In: J.-F. Pascual-Sánchez, L. Flor'ya, A. San Miguel, and F. Vicente, editors, Reference Frames and Gravitomagnetism, p. 53. World Scientific, Singapore, 2001.
  20. Coll B. Physical Relativistic Frames. In: N. Capitaine, editor, Journées 2001 Systemesde. – Reference Spatio-Temporels. Observatoire Royal de Belgique, 2003.
  21. Pascual-Sanchez J.-F. Introducing relativity in global navigation satellite systems // Annalen der Physik. – V. 16.– Iss.4. – P. 258–273.
  22. Abstracts for 7th Symposium on Frequency Standards and Metrology. Asilomar Conference Center in Pacific Grove, California, USA < October 5–11, 2008 // <http://fsm.jpl.nasa.gov/abstracts.htm>.
  23. Электронный реферат. <http://sci.esa.int/science/www/object/index.cfm?fobjectid=41177>.
  24. Svehla D. ACES – The First Demonstration of Relativistic Geodesy // Presentation on Seminar Theoretical Aspects of ACES Mission. Galileo Galilei Institute of Theoretical Physics, 29–30 April 2008, Florence, Italy (see site <http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~drazen/>).
  25. Presentation on IUGG 2007, XXIV General Assembly, 2–13 July 2007. Perugia, Italy.
  26. Presentation on 22 European Time and Frequency Forum. 23–25 April 2009, Toulouse, France.

#### **Радіофізичний метод вимірювань параметрів гравітаційного поля космічних тіл**

С. Матвиенко, Г. Сидоренко, В. Романько, В. Копил, О. Прокопов, О. Романько, І. Тревого

Розглянуто перспективи практичної реалізації радіофізичного методу визначення прискорення вільного падіння для тіл, що гравітують, на основі вимірювання релятивістського зсуву частоти електромагнітного випромінювання радіотехнічними засобами вимірювальної техніки. Подано оцінку потенціальної точності різних методів.

#### **Радиофизический метод измерения параметров гравитационного поля космических тел**

С. Матвиенко, Г. Сидоренко, В. Романько, В. Копыл, А. Прокопов, О. Романько, И. Тревого

Рассмотрены перспективы практической реализации радиофизического метода определения ускорения свободного падения для гравитирующих тел на основе измерения релятивистского сдвига частоты электромагнитного излучения радиотехническими средствами измерительной техники. Дана оценка потенциальной точности различных методов.

#### **Radiophysical method of measuring the parameters of gravity field for space bodies**

S. Matvienko, G. Sidorenko, V. Romanko, V. Kopil, A. Prokopov, O. Romanko, I. Trevoho

The prospects for practical realization the radiophysical method of definition the gravitational acceleration for gravitational bodies based on measurement of the relativistic frequency shift of electromagnetic emission by radio-technical tools of the measuring equipment are considered. The estimation of the potential accuracy for different methods is given.