

Средства контроля характеристик ГПЗ

УДК 528.15

**КОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ****В.Ф. Фатеев**

ФГУП ВНИИФТРИ, Московская обл., Менделеево, e-mail: fateev@vniiftri.ru

Рассмотрены требования к точности измерений параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) на борту космического аппарата (КА), кратко представлены принципы построения и метрологические характеристики существующих и перспективных бортовых космических измерителей параметров ГПЗ: градиентометров на микроакселерометрах, вращающихся механических резонансных градиентометров, лазерного космического градиентометра, измерителей по линии спутник-спутник, бортовых радиовысотомеров для определения реальной топографии морской поверхности в составе космических геодезических комплексов. Рассмотрены два направления релятивистской геодезии: релятивистское описание распространения радиоволн в системе ITRS и новые релятивистские гравитационные измерители: лазерные и атомные гравиметры и градиентометры, а также измерители гравитационного потенциала.

Ключевые слова: метрологические характеристики, гравитационное поле Земли, измерители параметров ГПЗ

Введение

Измерения различных характеристик гравитационного поля Земли являются одним из наиболее важных и перспективных видов измерений, как в сфере фундаментальных научных исследований (построение моделей гравитационного поля Земли, уточнение общеземных систем координат), так и в различных областях повседневной инженерной практики (разведка полезных ископаемых, подготовка площадок гражданского и промышленного строительства, обнаружение карстовых образований и пустот и т.д.). Особую значимость измерения этих параметров приобретают на борту космических аппаратов (КА), поскольку при этом обеспечивается глобальный контроль характеристик ГПЗ и высокая скорость его сканирования.

1. Основные параметры гравитационного поля Земли (ГПЗ) и требования к точности их измерений

Потенциал ГПЗ. Основной характеристикой гравитационного поля Земли является его потенциал:

$$\varphi = \frac{\mu}{\rho} + T, \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right], \quad (1)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ - геоцентрическая гравитационная постоянная; ρ - геоцентрическая высота рассматриваемой точки, отсчитываемая от центра Земли (для КА – текущая геоцентрическая высота точки орбиты). Первое слагаемое в рассматриваемой формуле представляет собой потенциал Земли как идеального шара, второе слагаемое получило название

возмущающего потенциала, и его обычно выражают в виде разложения по сферическим функциям в виде [1]:

$$T(\rho, \psi, \lambda) = \mu \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{R_0^n}{R^{n+1}} (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\psi), \quad (2)$$

где ψ, λ - текущая геоцентрическая широта и долгота рассматриваемой точки; R_0 - средний экваториальный радиус Земли; C_{nm}, S_{nm} - стоксовы постоянные; P_{nm} - полиномы Лежандра; n, m - индексы, характеризующие степень и порядок членов ряда разложения.

Величина первого слагаемого в выражении для потенциала (1) для экваториальной точки поверхности Земли ($R_0 = 6,4 \cdot 10^6$ м) достигает $6,23 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$. С ростом геоцентрической высоты потенциал уменьшается и для КА, находящегося на орбите высотой 300 км, он составляет $5,95 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Величина наиболее значимой второй зональной гармоники возмущающего потенциала (2) на 3 порядка меньше, величина других гармоник ещё на 2-3 порядка меньше. Исходя из перспективных требований к погрешности определения положения центра масс Земли менее 1 см [2], полагаем, что ошибка измерения радиус-вектора в формуле (1) должна составить $\delta\rho \leq 1$ см. Ограничиваясь далее только первым членом в формуле (1), установим приближенную связь между относительной погрешностью измерения линейных расстояний и требуемой относительной погрешностью определения величины текущего гравитационного потенциала на борту КА ($\rho = 6,7 \cdot 10^6$ м):

$$\frac{\delta\varphi}{\varphi} = \frac{\delta\rho}{\rho} \approx 1,5 \cdot 10^{-9}. \quad (3)$$

Отсюда следует требование к величине абсолютной погрешности измерения текущего гравитационного потенциала на борту КА: $\delta\varphi \approx 0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Вместе с тем, в настоящее время принципы непосредственных измерений гравитационного потенциала на Земле и на борту КА неизвестны. Определенные перспективы открываются на основе использования эффекта гравитационного замедления времени (см. далее).

Ускорение свободного падения. Второй важнейшей характеристикой ГПЗ является ускорение свободного падения (УСП), или ускорение силы тяжести, которое определяется как градиент потенциала:

$$\nabla\varphi = \vec{g}_{\text{ш}} + \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где $\vec{g}_{\text{ш}} = -\frac{\mu}{\rho^2} \vec{\rho}_0 = \vec{i}g_x + \vec{j}g_y + \vec{k}g_z$ - УСП Земли как шара; $\vec{\rho}_0$ - единичный вектор геоцентрической высоты; знак минус указывает на направление УСП

к центру Земли; $g_f = -\frac{\mu}{\rho^3} f$ (здесь $f = x; y; z$) – составляющие УСП по осям координат $x; y; z$; оператор ∇ обозначает взятие производной по пространственным координатам. Второе слагаемое формулы (4) определяет аномалии силы тяжести ГПЗ. На поверхности Земного шара $g_3 = -\frac{\mu}{R_0^2} \approx -9,8 \frac{M}{c^2} = -980$ Гал, для КА, находящегося на орбите высотой 300 км, $g_A \approx -8,9 \frac{M}{c^2} = -890$ Гал. Соответственно, величина аномалий на 3 и более порядков меньше.

Приборы, измеряющие ускорение свободного падения (УСП) и его аномалии, называются гравиметрами. В настоящее время принцип действия всех гравиметров основан на использовании калиброванных механических чувствительных масс (грузов) и измерении либо их параметров движения в свободном состоянии, либо механических усилий, создаваемых этими массами. Наземные гравиметры подразделяются на абсолютные и относительные. Достигнутый уровень относительной погрешности измерений в широко применяемых в геодезии лазерных абсолютных баллистических гравиметрах (АБГ), использующих свободно падающую чувствительную массу, составляет $10^{-8} - 10^{-9}$, что соответствует абсолютной ошибке измерений на поверхности Земли 1 мкГал [3] (рис.1). Характеристики других типов наземных механических гравиметров существенно ниже.



Рис. 1. Лазерный абсолютный баллистический гравиметр

Важнейшей особенностью ГПЗ непосредственно на борту КА является состояние невесомости, или микрогравитации. При этом бортовые приборы способны измерить лишь остаточное гравитационное ускорение, равное разности между ускорением центра масс КА и гравитационным ускорением в точке размещения бортового гравиметра. При габаритных размерах КА порядка 1 м величина остаточного микроускорения примерно на 6 порядков меньше гравитационного ускорения на экваторе. Поэтому классические гравиметры на основе механических чувствительных масс для измерений ускорения свободного падения на борту КА непригодны.

Вместе с тем, высокоточное измерение УСП на борту КА принципиально возможно с использованием методов измерений текущего радиального ускорения по кинематическим параметрам движения КА (дальности, радиальной скорости) относительно неподвижных наземных или удаленных космических ориентиров.

Возможны два варианта измерений.

1. Автономное измерение радиального ускорения КА относительно неподвижной наземной станции (ретранслятора) с помощью радиотехнического измерителя дальности или радиальной скорости. В этом случае текущий вектор геоцентрической высоты КА определяется в виде: $\vec{\rho} = \vec{R}_0 + \vec{R}$, где $\vec{R}_0, \vec{R}$ - соответственно, радиус-вектор наземной станции и измеряемое расстояние КА - наземная станция. Умножая формулу для гравитационного ускорения Земли (4) на $\vec{r}_0$, можем записать:

$$\vec{g}_A \vec{r}_0 = - \frac{\mu}{(\vec{R}_0 + \vec{R})^2} \vec{\rho}_0 \vec{r}_0, \quad (5)$$

где $\vec{r}_0$ - единичный вектор измерительной радиолинии КА – наземная станция. Раскрывая скалярные произведения, это соотношение запишем в виде:

$$\ddot{R} = g_R, \quad (6)$$

где $g_R = g_A \cos \alpha$ - проекция УСП на линию КА – наземная станция; α - угол надир – наземная станция; $\ddot{R} = \frac{\partial \dot{R}}{\partial t} = \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}$ - радиальное ускорение КА; $\dot{R}$ - радиальная скорость КА.

На основе измерений или вычислений $\ddot{R}$ по текущим бортовым измерениям дальности R или $\dot{R}$, а также текущему углу α , из последней формулы определяется искомая текущая проекция УСП. В случае, когда наземная станция находится в подспутниковой точке, а КА в точке траверса, имеем $\alpha = 0, \ddot{R} = g_A$. Дифференцирование дает связь между погрешностями измерения радиального ускорения $\delta \ddot{R}$ и определения УСП δg_A :

$$\delta g_A = \delta \ddot{R}, \quad (7)$$

Отсюда, определяя радиальное ускорение как отношение приращения радиальной скорости $\Delta \dot{R}$ на интервале времени Δt в виде $\ddot{R} = \Delta \dot{R} / \Delta t$, при $\Delta \dot{R} \approx 0,3$ мм/с (соответствует погрешности системы DORIS) и $\Delta t = 3$ с получаем $\delta g \approx 1$ мГал. При других углах наблюдения наземной станции с борта КА погрешности определения текущего УСП увеличиваются.

2. Автономное измерение на борту КА радиального ускорения радиотехническим методом относительно удаленных от Земли опорных космических точек. В качестве таковых могут использоваться навигационные спутники систем ГЛОНАСС-GPS-GALILEO, геостационарные спутники, точки на поверхности Луны и др. Главное условие выбора этих точек – постоянство или очень малая величина собственного гравитационного ускорения.

Нетрудно показать, что при слабой зависимости точности измерений от дальности (что характерно для современных космических навигационных систем) связь между погрешностями определения УСП и измерения радиального ускорения определяется формулой (7). При той же точности измерения радиального ускорения определяемая требуемая ошибка измерений УСП для данного варианта геометрии измерительной радиолинии в первом приближении такая же, как и в предыдущем варианте.

Градиент гравитационного ускорения поля Земли. Повторное применение оператора ∇ к выражению для ускорения свободного падения (4) дает выражение для составляющих градиента гравитационного ускорения:

$$\text{grad } \vec{g} = \nabla(\nabla\varphi) = -\frac{\mu}{\rho^5} \begin{pmatrix} \rho^2 - 3x^2 & \rho^2 - 3xy & \rho^2 - 3xz \\ \rho^2 - 3yx & \rho^2 - 3y^2 & \rho^2 - 3yz \\ \rho^2 - 3zx & \rho^2 - 3zy & \rho^2 - 3z^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \end{pmatrix}, 1/c^2 \quad (8)$$

Гравитационный градиент измеряется в этвешах (Е); $1\text{Е} = 10^{-9} \text{ с}^{-2}$.

Приборы, измеряющие градиент гравитационного поля, называют гравитационными градиентометрами, гравиградиентометрами, или кратко градиентометрами; в зарубежной печати их иногда называют градиометрами.

Современные измерители градиента гравитационного поля основаны на использовании механических пробных масс и подразделяются на три большие группы:

- вариометры и градиентометры на основе крутильных весов;
- градиентометры на основе ортогональных пар разнесенных;
- градиентометры на основе ортогональных пар разнесенных

механических высокоточных акселерометров;

- резонансные градиентометры на основе вращающихся гантелей.

Кроме того, с развитием межспутниковых измерений стало возможным определение градиента поля по высокоточным измерениям параметров относительного движения двух или нескольких спутников, находящихся на одной или близких орбитах.

Приближенную оценку необходимой точности измерений градиента проведем для простейшего случая измерения вертикального градиента Земного шара W_{zz} , который определяется из выражения (8) при $x = y = 0; z = \rho$ в следующем виде:

$$W_{zz} = \frac{2\mu}{\rho^3}. \quad (9)$$

На поверхности Земли величина вертикального градиента составляет 3040Е, на орбите высотой 300 км она равна 2657Е. Из последней формулы следует связь относительных погрешностей градиента и геоцентрической высоты:

$$\frac{\delta W_{zz}}{W_{zz}} = \frac{3\delta\rho}{\rho}. \quad (10)$$

Отсюда при заданной выше точности знания геоцентрической высоты $\delta\rho/\rho = 1,5 \cdot 10^{-9}$ находим соответствующую требуемую характеристику точности измерения вертикального градиента: $\delta W_{zz}/W_{zz} \approx 4,5 \cdot 10^{-9}$. Соответствующее требуемое значение абсолютной погрешности измерений градиента на борту КА составляет $\approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-2} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Е}$.

Уклонение отвесной линии (УОЛ) ГПЗ от её положения относительно референц-эллипсоида. Уклонения отвесной линии (УОЛ) являются одной из важнейших характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ). Без информации об УОЛ невозможно функционирование высокоточных инерциальных навигационных систем (ИНС) любых подвижных объектов. УОЛ могут быть вычислены на основании гравиметрических съемок (по алгоритму Венинг-Мейнеса [1]), однако реализация этого метода требует много времени, поскольку для вычислений необходимы гравиметрические данные по всему земному шару. Этот параметр измеряется в угловых секундах. На равнинных районах он достигает 5'', в горных районах – 10''-15'', в отдельных случаях в горах достигает 40''. Точность современных методов оценивается погрешностью 0,5-1,0 угл. с. Требуемый уровень погрешности определения УОЛ для ряда потребителей оценивается величиной 0,1 угл. с. и менее.

Высота геоида и квазигеоида над поверхностью уровенного эллипсоида. Геоид определяется как эквипотенциальная поверхность ГПЗ (уровенная поверхность), приблизительно совпадающая со средним уровнем вод

Мирового океана в невозмущенном состоянии и условно продолженная под материками. отвесная линия везде перпендикулярна поверхности геоида. Расстояние от точки физической поверхности Земли до поверхности геоида, отсчитываемое по отвесной линии, называется ортометрической высотой. Технические средства непосредственного измерения ортометрических высот неизвестны.

Поскольку поверхность геоида определяется очень трудно, в геодезических измерениях в России и некоторых других странах вместо геоида используется его приближение – квазигеоид. Высота физической точки поверхности Земли над квазигеоидом, отсчитываемая по нормали к эллипсоиду, называется нормальной высотой, которая измеряется нивелирными методами. Ортометрическая и нормальная высота на поверхности океана совпадают, на равнинной местности суши отличаются на несколько сантиметров, в высокогорной местности их разность достигает единиц метров. Согласно [2], погрешность определения высоты квазигеоида не должна превышать 1 см.

2. Градиентометры на микроакселерометрах

На основе формулы (8) разность гравитационных ускорений между двумя точками бортовой невращающейся системы координат КА выражается в виде:

$$\Delta \vec{g}_A = \Delta \vec{R} \cdot \text{grad} \vec{g}_A, \quad (11)$$

где ΔR - расстояние между рассматриваемыми точками.

Отсюда следует, что при установке двух акселерометров на оси OZ бортовой системы координат на расстоянии ΔZ друг от друга и с параллельными осями чувствительности они зафиксируют разность гравитационных ускорений, действующих вдоль оси OZ:

$$\Delta g_z = W_{zz} \cdot \Delta Z, \quad (12)$$

где W_{zz} - вертикальный градиент ГПЗ, определяемый формулой (9). Отсюда следует, что при расстоянии между бортовыми акселерометрами 1 м измеряемое гравитационное микроускорение не превысит $3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2 = 0,3 \text{ мГал}$. Поэтому для того, чтобы на основе этих измерений обеспечить относительную погрешность определения градиента порядка 10^{-9} , абсолютное значение погрешности измерений гравитационного микроускорения не должно превышать $3 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}^2$. Измеряемое микроускорение, согласно (12), можно увеличить за счет увеличения пространственного разнеса акселерометров: при увеличении расстояния между ними до 10 м величина измеряемого ускорения возрастает на порядок.

Самый высокий уровень точности измерения градиента в условиях космоса на сегодняшний день достигнут на градиентометре, выполненном

в виде 3-х ортогональных пар трехосных сферических микроакселерометров и размещенном на геодезическом спутнике Европейского космического агентства GOCE [4]. В этом проекте 6 высокочувствительных микроакселерометров типа «шар в сфере» размещены вокруг центра масс спутника и благодаря своей конструкции позволяют выполнять измерения по $6 \times 3 = 18$ осям. Расстояние между акселерометрами по каждой оси составляет 0,5 м. Погрешность каждого акселерометра по всем трем измерительным осям составляет около $2 \cdot 10^{-12}$ м/с², что близко к термодинамическому пределу механических акселерометров [5]. Ошибка измерений в таком градиентометре составляет примерно $(2-3) \cdot 10^{-3} \text{Е}$, или около 10^{-6} относительно величины градиента Земли.

В связи с недостаточной инструментальной точностью градиентометра необходимая точность определения коэффициентов разложения потенциала гравитационного поля достигается за счет статистической обработки всего объема измерений, полученного за несколько лет с частотой съема 1 Гц.

Среди других альтернативных проектов гравиградиентометров на разнесенных микроакселерометрах следует отметить известные французские проекты КАКТУС, СУПЕРКАКТУС, ГРАДИО и др., которые выполнены на высокочувствительных электростатических акселерометрах. Представляют интерес разработки космических гравиградиентных систем, выполненные сотрудниками ИФЗ РАН (В.Б.Дубовсим, В.И.Леонтьевым и др. [6,7]). В них используются акселерометры с чувствительностью 10^{-10}g , установленные в корпусе КА на жесткой базе длиной 3-5 м. Известны проекты по увеличению чувствительности градиентометра за счет разнесения космических акселерометров по высоте с использованием сверхпрочных тросов на 10 м и 120 м (итальянские проекты TSS-1, TSS-2), на 1-2 км (НПОМаш), на 100-200 км (патент США №4099010). Имеются разработки ротационных акселерометрических гравиградиентных систем, в которых система высокочувствительных акселерометров разнесена на 20 см и вращается с частотой 10-20 Гц, однако они пока не получили практического применения.

3. Ротационные гантельные резонансные градиентометры

Этот тип градиентометров основан на использовании системы из двух механических гантелей, размещенных на одной оси, выполненной в виде упругого торсиона (рис. 2).



Рис. 2. Вращающиеся градиентометры гантельного типа

Механические гантели представляют собой симметричные относительно оси жесткие металлические штоки, на концах которых размещены чувствительные массы. Гантели с чувствительными массами на концах жестко размещены на торсионе под углом 90° друг к другу. Известно, что в неоднородном гравитационном поле ГПЗ, имеющем центральную симметрию, механические усилия, вызванные гравитационным градиентом, в каждом квадранте бортовой системы координат КА имеют встречные направления. Поэтому в спокойном состоянии на чувствительные массы обеих гантелей действуют встречные механические усилия, создаваемые гравитационным градиентом. При этом за счет упругости торсиона расстояние между массами на концах разных гантелей изменяется на некоторую достаточно малую величину Δl_0 . Это приращение расстояния пропорционально суммарному градиенту гравитационного поля W_Σ в данной точке пространства: $\Delta l_0 = k W_\Sigma$, где $k[\text{мс}^2]$ - коэффициент пропорциональности, учитывающий упругие свойства торсиона.

При вращении системы гантелей с угловой скоростью Ω вокруг оси, совмещенной с торсионом, концы ортогональных гантелей за счет воздействия градиента и упругости торсиона начинают испытывать встречное колебательное движение с частотой 2Ω . Если собственная частота колебаний упругого торсиона равна 2Ω , то колебательная система двух ортогональных гантелей входит в состояние механического резонанса. При этом расстояние между концами ортогональных гантелей определяется соотношением:

$$\Delta l = k W_\Sigma D \cos(2\Omega t + \phi), \quad (13)$$

где D - добротность колебательной системы; ϕ - начальная фаза колебания относительно осей бортовой системы координат.

На основе измерения амплитуды и текущей фазы колебания Δl из приведенной формулы определяется текущий гравитационный градиент, а также начальная фаза колебания, в которой заключена информация об отклонении отвесной линии к текущей поверхности геоида.

Впервые в мире проект спутникового гантельного гравиградиентного измерителя ротационного типа предложил в 1962 г. и защитил авторским свидетельством на изобретение СССР в 1964 г. профессор ВВИА им. Н.Е. Жуковского начальник кафедры А.А. Красовский [8], который установил мировой приоритет по сравнению с аналогичными работами Р. Форварда (США) фирмы Hughes Aircraft [9]. В дальнейшем шли параллельные разработки в СССР и США, приведшие к опережению отечественных работ по сравнению с американскими.

Последующие из известных конструктивных решений бортовых датчиков вторых производных гравитационного потенциала (например, авт. свид. № 43076 от 8.07. 1967г. и патент США № 3564921 от 2.02.1968 г.) были направлены на устранение методических и конструктивных погрешностей, связанных с влиянием пульсаций скорости вращения и всевозможных линейных и угловых ускорений основания крутильной системы прибора (см. также [10,11]).

В настоящее время продолжателем дела, начатого А.А. Красовским, в РФ является его сподвижник А.И. Сорока [12]. Реальные градиентометры, реализованные группой А.И. Сороки, имеют следующие характеристики: частота вращения – 2.5 Гц, резонансная частота – 5 Гц, добротность колебательной системы $D = 30$, величина регистрируемого взаимного механического колебания гантелей при $W_{\Sigma} \approx 1E$ составляет примерно $\Delta l \approx 10^{-10}$ м. Достигнутая при этих характеристиках чувствительность экспериментального образца составляет $\delta W \approx (0,1 - 0,3)E$, что в относительном измерении составляет $\approx 10^{-4}$. По мнению авторов разработки, предельная достижимая относительная погрешность прибора составляет $\approx 10^{-6}$.

4. Измерения градиента по линии «спутник-спутник»

Измерения по линии «спутник-спутник» (рис. 3) в интересах уточнения параметров гравитационного поля впервые реализованы NASA в низкоорбитальной системе GRACE [13].



Рис. 3. Измерители по линии «спутник- спутник»

Эта система состоит из двух спутников, движущихся тандемом по одной и той же орбите высотой 500 км на расстоянии 220 км друг от друга. Текущее взаимное расстояние контролировалось с помощью специально созданного высокоточного радиотехнического дальномера с погрешностью измерения около 1 мкм, что обеспечивало достаточно высокую точность определения аномалий гравитационного поля.

Для оценки потенциальных возможностей способа рассмотрим орбитальную систему из двух спутников, движущихся по одной орбите высотой ρ тандемом на расстоянии $R \ll \rho$ друг от друга. Линию спутник-спутник совместим с осью ОХ орбитальной системы координат. При этих условиях текущее расстояние между спутниками определяется по формуле:

$$R = R_0 + V_0 t + \Delta R_W, \quad (14)$$

где R_0 - начальное расстояние на момент времени $t = 0$; V_0 - начальная относительная скорость движения спутников; ΔR_W - приращение расстояния между спутниками за счет разности их взаимного гравитационного ускорения Δg_x , направленного вдоль оси ОХ:

$$\Delta R_W = 0,5 \Delta g_x t^2 = 0,5 W_{xx} R_0 t^2 \quad (15)$$

Здесь

$$W_{xx} = -\frac{\mu}{\rho^3} + \Delta T_{xx} \quad (16)$$

- горизонтальный градиент поля, в котором первая составляющая определяет градиент Земли как шара, а вторая – горизонтальный градиент гравитационной аномалии, которая меньше первой составляющей на 3 и более порядков.

По текущим измерениям ΔR_w из формулы (15) находится текущий горизонтальный градиент ГПЗ, причем, относительные погрешности измерения расстояния и определения градиента связаны соотношением:

$$\frac{\delta R}{\Delta R_w} = \frac{\delta W_{xx}}{W_{xx}}. \quad (17)$$

Оценим ожидаемую величину относительной погрешности определения градиента при $R_0 = 200$ км и времени накопления гравитационного эффекта $t = 12$ с (за это время спутник покрывает расстояние около 100 км). Нетрудно подсчитать, что для высоты орбиты 500 км ($W_{xx} = 1210E$) гравитационное изменение расстояния между спутниками составит $\Delta R_w \approx 20$ м. При условии, что измерение расстояния в эксперименте GRACE выполнялось с помощью микроволнового фазового дальномера с погрешностью $\delta R \approx 10^{-6}$ м, находим, что $\delta W_{xx}/W_{xx} \approx 0,5 \cdot 10^{-7}$, а абсолютная ошибка измерения градиента при этом $\delta W_{xx} \approx 0,6 \cdot 10^{-4} E$.

Если в качестве измерителя приращения межспутникового расстояния использовать лазерный интерферометр с погрешностью измерения 10^{-7} - 10^{-8} м, то достижимая относительная ошибка измерения градиента составит $0,5 \cdot (10^{-8}-10^{-9})$. Соответствующая абсолютная ошибка измерения горизонтального градиента составляет $\delta W_{xx} \approx (10^{-5} - 10^{-6})E$. Нетрудно показать, что при заданной точности измерения расстояния «спутник-спутник» погрешности определения градиента с ростом высоты орбиты возрастают.

5. Космический бортовой лазерный градиентометр

Лазерный бортовой градиентометр (рис. 4) использует принцип баллистического гравиметра и основан на измерении параметров относительного движения двух свободных чувствительных масс внутри космического аппарата в состоянии невесомости.

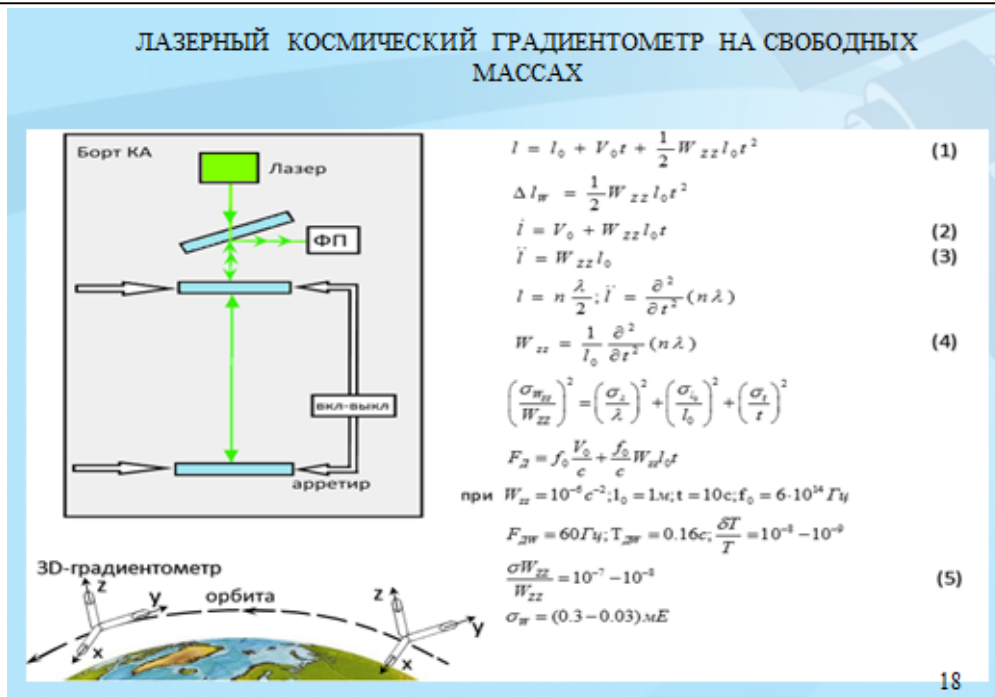


Рис. 4. Лазерный градиентометр

Измерение приращения относительного расстояния и радиальной скорости чувствительных масс производится с помощью лазерного интерферометра на интервале времени свободного движения масс. Прибор имеет более высокую потенциальную точность, нежели градиентометр на свободных массах типа GOCE («шар в сфере»), поскольку использует высокостабильные и точные цифровые измерители длины, частоты и времени. По сравнению с наземными лазерными градиентометрами он также выигрывает, поскольку время свободного движения масс, в силу движения в невесомости, может быть увеличено по меньшей мере на порядок, а измеряемое приращение расстояния – соответственно, в квадрат раз, т.е. на два порядка. Прибор может иметь три ортогональные измерительные базы.

Для измерительной базы, размещенной вдоль вертикали к Земле (вдоль оси OZ), текущее расстояние между свободными чувствительными массами в первом приближении описывается формулой:

$$l(t) = l_0 + V_0 t + 0,5 W_{zz} l_0 t^2 = 0,5 \lambda n(t), \quad (18)$$

где l_0, V_0, t - начальное расстояние между чувствительными массами, их начальная скорость и текущее время; λ - длина волны лазерного излучения; $n(t)$ - текущее число зафиксированных фотоприемником интерференцион-

ных полос шириной $0,5 \lambda$; $W_{zz} = 2\mu/\rho^3 + \Delta W_{zz}$ - искомый вертикальный гравитационный градиент на высоте ρ орбиты КА; μ - геоцентрическая гравитационная постоянная; ΔW_{zz} - гравитационный градиент аномальной составляющей ГПЗ.

По результатам измерений текущего расстояния в виде зафиксированного количества интерференционных полос, а также моментов времени, соответствующих началу и концу каждой полосы, из формулы (18) путем статистической обработки находятся неизвестные l_0, V_0, W_{zz} .

Чтобы оценить точность измерений градиента, положим в формуле (18) $V_0 = 0$. Тогда приращение расстояния, вызванное только влиянием градиента, составит: $l_w = 0,5W_{zz}l_0t^2 = 0,5\lambda n(t)$, откуда получаем формулу для определения градиента:

$$W_{zz} = \frac{\lambda n(t)}{l_0 t^2}. \quad (19)$$

Для одной фиксируемой интерференционной полосы ($n=1$) относительная среднеквадратическая ошибка определения градиента составит:

$$\frac{\sigma_w}{W_{zz}} = \left[\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l_0} \right)^2 \right], \quad (20)$$

где $\sigma_\lambda, \sigma_t, \sigma_l$ - среднеквадратические ошибки определения длины волны, продолжительности движения интерференционной полосы в плоскости фотоприемника и начального расстояния между чувствительными массами. Достижимые относительные погрешности определения каждой из этих величин существенно менее 10^{-6} . В результате статистической обработки измерений по n интерференционным полосам интегральная погрешность определения градиента уменьшается в $\sqrt{n}$ раз.

Для реализации лазерного градиентометра необходимо использование развитых современных прецизионных технологий измерений длины, а также частоты и времени.

Ожидаемая относительная погрешность измерений гравитационного градиента Земли на борту низкоорбитального КА при времени свободного движения чувствительных масс 10 с составляет 10^{-7} .

6. Радиовысотомер, доплеровский комплекс, лазерный локаатор и НАП ГНСС в составе космического геодезического комплекса

Измеритель текущей высоты КА над поверхностью океана (радиовысотомер, или радиоальтиметр) предназначен для контроля реальной топографии морской (океанической) поверхности с борта КА с последующим определением текущего УОЛ и аномалий силы тяжести вдоль

трассы движения спутника (рис. 5).

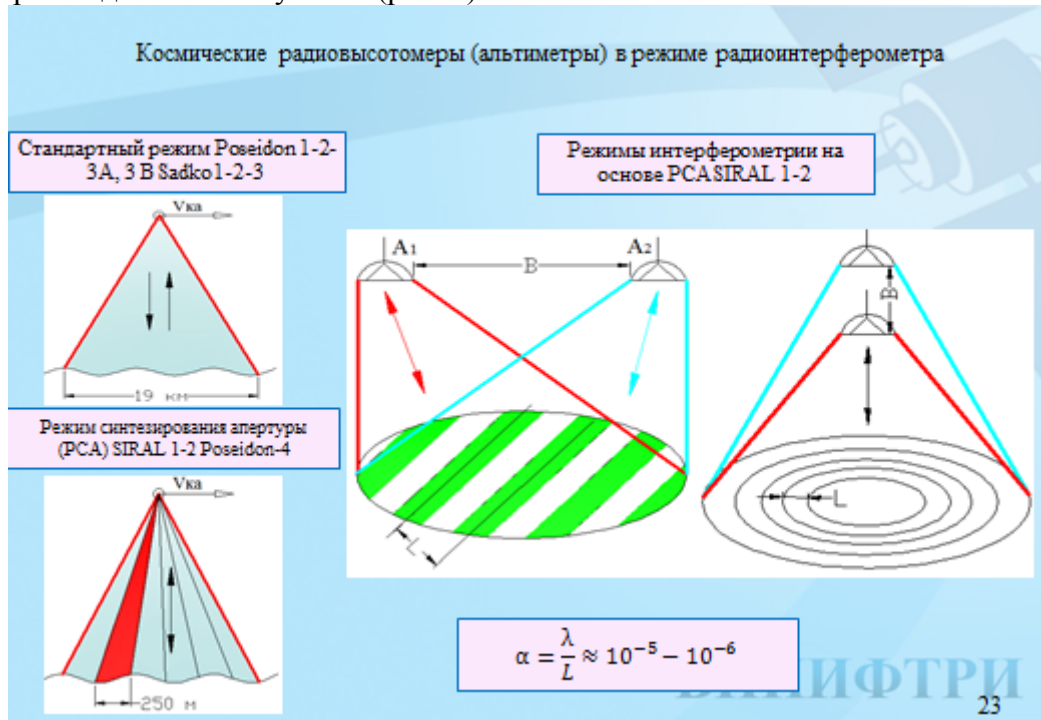


Рис. 5. Космические высотометры (альтиметры)

Среди множества известных спутниковых геодезических комплексов, решающих эту задачу, отметим только «Jason-1» и «Jason-2» [14], созданные специалистами Франции и США. Проект «Jason-2» (запущен на орбиту 20 июня 2008 года) является дальнейшим развитием работ в области высотометрии морской поверхности и известен также как проект OSTM (Ocean Surface Topography Mission). Основной задачей проекта является измерение реальной топографии океана с погрешностью около 1 см.

В состав бортовой аппаратуры КА «Jason-2» входят:

1) твердотельный двухчастотный радиовысотометр (Solid-State Radar Altimeter) «Poseidon-3» [15], работающий в частотных диапазонах 5,3 ГГц и 13,575 ГГц (длины волн, соответственно 5,67 и 2,21 см) и обеспечивающий измерение высоты с погрешностью около 1 см;

2) микроволновый радиометр AMR (Advanced Microwave Radiometer – усовершенствованный микроволновый радиометр), работающий в частотных диапазонах 18,7; 23,8 и 34 ГГц (длины волн соответственно 1,6; 1,15 и 0,88 см) и обеспечивающий «тропосферную» коррекцию радиолокационных измерений высоты на основе учета интегрального влагосодержания атмосферы, влияния недождевой облачности и ветрового воздействия на морскую поверхность;

3) орбитальный приемник радиотехнической высокоточной доплеровской навигационной системы DORIS, являющейся неотъемлемой частью практически всех спутниковых альтиметрических систем и обеспечивающей измерение радиальной скорости относительно наземных маяков с погрешностью до 3 мм/с;

4) бортовой лазерный уголкового отражателя наземного лазерного локатора LRA (Laser Retroreflector Array), оптимизированный для работы в диапазоне длины волны 532 нм (зеленый) и обеспечивающий погрешность измерения дальности до КА с наземных станций менее 1 см;

5) многоканальный навигационный GPS- приемник TRSR-2 (Turbo Rogue Space Receiver), способный измерять псевдодальность до 16 навигационных спутников системы GPS одновременно; ошибка измерения дальности по линии «низкий КА – высокий КА» достигает единиц сантиметров;

6) комплекс «Carmen-2» (Environment Characterization and Modelisation-2), предназначенный для определения характеристик потоков частиц высоких энергий с целью внесения «ионосферных» поправок в результаты измерений, выполняемых с помощью навигационной аппаратуры DORIS, а также вспомогательная измерительная аппаратура.

Межвитковое расстояние по экватору для КА «Jason-2» составляет 315 км.

Одновременное нахождение на орбите двух однотипных КА – «Jason-1» и «Jason-2» позволило создать систему (тандем), обеспечивающую двукратное увеличение частоты съемки поверхности Мирового океана. При этом трассы одного из КА были расположены между трассами другого, а сдвиг в обзоре одних и тех же районов океана первым и вторым КА составлял ~ 5 суток. Кроме этого, в «тандемном» режиме работы отработаны подходы к созданию перспективных альтиметрических систем ДЗЗ. Дальнейшим развитием космических систем морской топографии данного типа является КА «Jason-3» и «Jason-CS» (2017 г.).

7. Релятивистская геодезия: основные положения релятивистской теории распространения радиоволн в околоземном пространстве

Постановка задачи

Релятивистская геодезия предполагает всесторонний учет и измерение влияния гравитационного поля Земли на измерения характеристик пространства и времени, в том числе на условия распространения электромагнитных волн в измерительных радиоэлектронных системах наземной и космической геодезии, радионавигации и синхронизации.

Достигнутая точность измерения расстояний в системах космической геодезии, космической навигации ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, а также РСДБ характеризуется в настоящее время миллиметровым уровнем погрешностей измерения глобальных расстояний. Точность сличения частоты разнесенных стандартов методами РСДБ характеризуется относительной погрешностью 10^{-14} [16], а достигнутая погрешность измерения времени запаздывания в

Альманах современной метрологии, 2015, №3

космических радиолиниях навигации и синхронизации составляет десятки пикосекунд [17]. Эти достижения во многом связаны с существенным прогрессом в создании наземных и бортовых стандартов частоты и развитием методов их синхронизации. Как уже отмечалось выше, достигнутая стабильность частоты современных стандартов составляет 10^{-14} - 10^{-16} , а в ближайшей перспективе планируется достигнуть 10^{-17} - 10^{-18} .

Вместе с тем, релятивистские поправки в измерения, вызванные влиянием гравитационного поля, а также влиянием относительного движения спутников и наземных измерителей, уже соизмеримы, а в ряде случаев существенно превышают уровень инструментальных погрешностей навигационных и геодезических систем. Так, относительный релятивистский сдвиг частоты и времени в космических измерительных системах достигает 10^{-9} - 10^{-10} , что на 5 – 6 порядков превышает допустимые ошибки измерений. В системах ГЛОНАСС и GPS гравитационное поле изменяет и расстояния: несоответствие между измеряемым и действительным расстоянием в этих системах достигает 6-7 мм. Для компенсации некоторых релятивистских эффектов в космических системах навигации предпринимаются специальные меры. Еще более ярко проявляются релятивистские эффекты при переходе к вращающимся системам отсчета, каковой является широко используемая в геодезии и гравиметрии международная земная система отсчета ITRS (International Terrestrial Reference System), жестко связанная с вращающейся Землей [18]. Прогресс в создании высокоточных инструментальных средств космических измерений требует совершенствования электродинамических моделей распространения радиоволн в околоземном пространстве применительно к системе ITRF.

Особенность наземно-космических измерительных радиолиний геодезии и навигации состоит в том, что они пролегают в гравитационном поле Земли, пересекая атмосферу. С другой стороны, они рассматриваются из вращающейся системы ITRF. В этой системе, в силу принципа эквивалентности в общей теории относительности, в околоземном пространстве появляется наведенное вращением дополнительное гравитационное поле (поле сил инерции), действие которого на электромагнитную волну аналогично действию истинного гравитационного поля Земли. Поэтому задача состояла в определении релятивистских преломляющих свойств околоземного пространства, включая атмосферу, и релятивистских дополнений к параметрам распространения радиоволн.

Выбранный путь решения и результаты

Решение задачи проводилось на основе общей теории относительности в рамках электродинамики сплошных сред, движущихся в неинерциальных системах отсчета. При этом использовались традиционные тензорные уравнения Максвелла и обобщенные тензорные материальные соотношения, несущие информацию об атмосфере, гравитационном поле и вращении

Альманах современной метрологии, 2015, №3

системы отсчета [13]. На основе этих уравнений определены поля и токи в движущейся проводящей атмосфере. Для электромагнитной волны в движущейся изотропной проводящей среде получено волновое уравнение и соответствующее дисперсионное соотношение, решением которого является выражение для обобщенного коэффициента преломления околоземного пространства. Он является пространственной характеристикой и учитывает преломляющие свойства атмосферы и гравитационного поля, а также искривление пространства-времени в гравитационном поле. В первом приближении, с учетом членов порядка $1/c^2$ (c – скорость света), он определяется формулой [20]:

$$n^{**} = 1 + \Delta n_a + \left\{ \frac{2\varphi}{c^2} + \frac{[\vec{\Omega R}]^2}{2c^2} + \frac{1}{2c^2} \left([\vec{\Omega R}] \vec{e} \right)^2 \right\} + \frac{1}{c} [\vec{\Omega R}] \vec{e}, \quad (21)$$

где $\Delta n_a = n_a - 1$, n_a – коэффициент преломления атмосферы; φ – гравитационный потенциал ГПЗ, определяемый формулами (1) и (2); $\vec{\Omega}$ – угловая скорость системы ITRS; $\vec{R}$ – текущий радиус-вектор радиоволны; $\vec{e}$ – орт радиоволны.

Другой пространственной характеристикой «гравитационной» околоземной среды является коэффициент релятивистского преобразования частоты, или частотной активности, F [21, 22]:

$$F = 1 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2} + \frac{G_2^2 - G_1^2}{2}, \quad (22)$$

где φ – гравитационный потенциал ГПЗ; $\vec{G} = [\vec{\Omega R}] / c$; индексы 1 и 2 относятся к началу и концу трассы распространения, соответственно.

Анализ релятивистских дополнений к характеристикам среды распространения в ITRS

В формуле (21) член Δn_a определяет преломляющие свойства атмосферы. Для тропосферы $\Delta n_{\text{тр}} = 10^{-3} - 10^{-4}$, для ионосферы $\Delta n_{\text{ион}} = 10^{-5} - 10^{-6}$. Тропосфера является изотропной неоднородной преломляющей средой, поскольку ее коэффициент изменяется с высотой. По этой причине оптические и радиолучи претерпевают в этой среде рефракцию. Ионосфера в общем случае является средой анизотропной и неоднородной, причем, одна и другая характеристика сильно зависят от частоты электромагнитной волны. Радиоволны в ионосфере также претерпевают заметную рефракцию и дополнительную задержку, зависящую от частоты.

Члены в фигурных скобках обладают неоднородностью и не зависят от частоты. Чисто гравитационная составляющая имеет величину, которая максимальна у поверхности Земли: при $R = 6,4 \cdot 10^6$ м имеем $2\varphi/c^2 \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$. Составляющие, пропорциональные Ω^2 , растут с

расстоянием от центра вращения и вблизи геостационарной орбиты имеют максимальную величину, равную $0,5 \cdot 10^{-10}$.

Особыми свойствами обладает последний член формулы (21) вида $\Delta n_{\Omega} = \frac{1}{c} [\overline{\Omega R}] \vec{e}$, который характеризует свойства «гирогравитационной» среды, возникающей вследствие вращения системы ITRS. Оптическая плотность этой «среды» имеет цилиндрическую симметрию с образующей, параллельной оси вращения. В плоскости экватора Земли величина коэффициента преломления этой среды изменяется от значения $1,55 \cdot 10^{-6}$ на поверхности Земли до 10^{-5} на геостационарной орбите, что соизмеримо с характеристиками ионосферы. Эти цифры свидетельствуют о существенной неоднородности рассматриваемой среды и ожидаемом существенном влиянии ее на рефракцию радиоволн и оптических лучей. В протяженных космических радиолиниях влияние этой «гирогравитационной» среды на параметры распространения радиоволн, например, на рефракцию и на задержку, существенно выше, чем в ионосфере. Нетрудно показать, что дополнительная «гирогравитационная» задержка, например, для навигационного сигнала на трассе «навигационный КА - Земля» может достигать десятков наносекунд.

Другим замечательным свойством «гирогравитационной» среды в системе ITRS является ее анизотропность, поскольку произведение $[\overline{\Omega R}] \vec{e}$ зависит от направления волны относительно направления вращения системы. Следствием этого свойства является изменение знака коэффициента Δn_{Ω} для встречных лучей и, соответственно, инверсия задержки и угла рефракции. Встречные оптические лучи в такой среде имеют разную задержку, и они распространяются по разным трассам. Наконец, составляющая Δn_{Ω} принципиально не зависит от показателя преломления атмосферы.

Коэффициент F (22) определяет частотно-преобразующие свойства околоземной гравитационной среды во вращающейся системе отсчета. Он не зависит от свойств атмосферы и скорости движения источника и приемника радиоволны. Он определяется только разностью гравитационных потенциалов на концах трассы распространения. В этой связи его можно назвать показателем частотной активности околоземной «гравитационной» преломляющей среды. В зависимости от направления радиолуча он может быть больше или меньше единицы. Его релятивистская часть в пределах геостационарной орбиты достигает $\pm 6 \cdot 10^{-9}$, что на 5-6 порядков превышает уровень стабильности современных стандартов частоты и времени. Поэтому при точных геодезических измерениях с использованием протяженных радиотрасс его необходимо учитывать с высокой точностью.

В целом, «гравитационная» оптически плотная среда в системе ITRS

обладает следующими свойствами: 1) неоднородностью, что вызывает рефракцию радиоволн; 2) анизотропностью, что вызывает различие в задержках встречных радиолучей; 3) частотной активностью, что, помимо эффектов Доплера 1 и 2 порядков, существенно изменяет частоту радиоволны; 4) оптической активностью, что вызывает поворот плоскости поляризации; 5) нестационарностью из-за неравномерности вращения Земли. На основе этих показателей получают уточненные релятивистские выражения для параметров радиоволны в односторонней радиолинии в ITRS: времени распространения, частоты, фазы, угла рефракции, поворота плоскости поляризации, а также угла скоростной абберации [22].

Кроме того, вычисляя коэффициенты n^{**} и F для известного положения космической радиолинии, релятивистскую задачу можно свести к классической задаче по распространению радиоволн.

8.Релятивистская геодезия: релятивистские гравитационные измерители

Интерференционные измерители на основе гамма-излучателей и оптических лазеров

В релятивистских гравитационных измерителях используются два основных гравитационных эффекта, предсказанных Эйнштейном в общей теории относительности [23]: эффект замедления времени (и, соответственно, гравитационного смещения частоты) и эффект удлинения пути за счет искривления пространства-времени. Эти эффекты проявляются при распространении волны любой природы: радио- и световой волны [21], рентгеновского и гамма-излучения, звуковой волны, волны Де-Бройля электрона, протона и др. В любом случае гравитационное поле изменит фазу волны за счет совместного воздействия обоих эффектов.

Относительный частотный релятивистский сдвиг, вызванный эффектом гравитационного смещения частоты, на поверхности Земли при длине вертикальной базы 10 м составляет 10^{-15} . Поэтому такой измеритель гравитационного ускорения может быть реализован на источниках гамма-излучения, использующих эффект Мессбауэра [24-26]. Он позволяет на такой базе получить относительную погрешность 10^{-4} .

Измерители, позволяющие накапливать гравитационный набег фазы, могут быть реализованы на двух катушках волоконных световодов, разнесенных по высоте [21, 27-29]. Вместе с тем, даже при длине волокна 10 км (что вполне реализуемо) при приемлемых размерах измерителя на частоте оптического лазера полезный фазовый сдвиг не превышает 10^{-4} рад.

Атомный интерференционный гравиметр

В последние годы в ряде стран проводятся работы по созданию гравиметров нового типа на основе технологии атомной интерферометрии [30]. Эта технология основана на использовании двойственной природы атома, когда, с одной стороны, он используется в качестве механической

чувствительной массы, а с другой стороны, измерения эффекта воздействия гравитационного поля проводятся на его материальной волне, или волне де Бройля. Частота этой волны на 9-10 порядков выше частоты фотонов оптического диапазона, поэтому атомный интерферометр должен обладать более высокой чувствительностью. В настоящее время значительное развитие получила технология измерения фазовых сдвигов на материальной волне атомов цезия. Принцип действия такого прибора как волнового измерителя рассмотрим в соответствии с рис. 6.

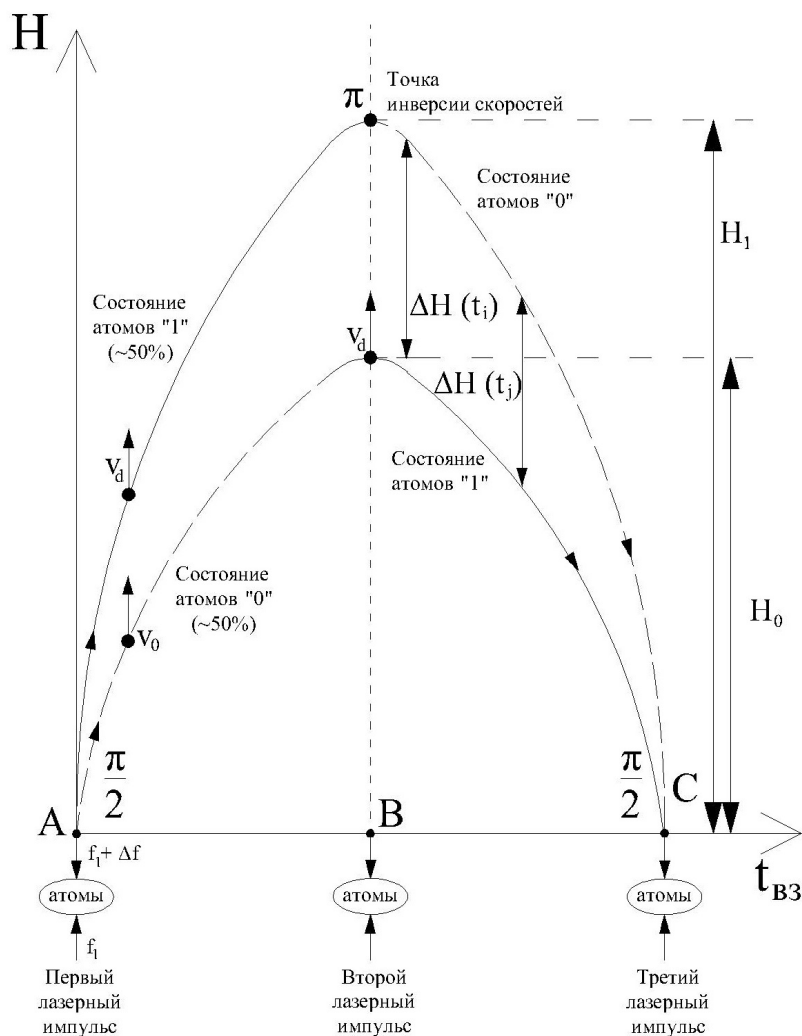


Рис. 6. К принципу действия атомного гравиметра

Атомный пучок в исходной точке А из исходного облака атомов испускается вверх с начальной скоростью v_0 . Затем исходный пучок

облучается встречными импульсами специальных Рамановских лазеров, под действием которых он разделяется на 2 пучка, находящихся, соответственно, в состояниях «1» и «0» с разными энергетическими уровнями. Процентное соотношение количества атомов в пучках примерно 50:50. Эта часть прибора называется расщепителем пучков по аналогии с оптическими расщепителями. При этом начальное фазовое рассогласование волн де Бройля обоих пучков устанавливается равной $\pi/2$, что соответствует фазовому сдвигу в оптических расщепителях. При этом атомы верхнего пучка приобретают дополнительную вертикальную скорость v_d , в результате чего вертикальная скорость первого пучка $V_1 = v_0 + v_d - gT$, где g - ускорение свободного падения, T - текущее время, или время взаимодействия с гравитационным полем. Соответственно атомы нижнего пучка имеют скорость $V_0 = v_0 - gT$. Нетрудно показать, что высоты, достигаемые атомами обоих пучков за время T , составят: $H_0 = v_0 T - 0,5gT^2$, $H_1 = (v_0 + v_d)T - 0,5gT^2$. Соответственно разность высот на этом же интервале времени будет равна:

$$\Delta H = V_{\text{отн}} T, \quad (23)$$

где $V_{\text{отн}} = V_1 - V_0 = v_d$ - относительная скорость атомов.

Через некоторое время, вблизи точки перегиба параболы траектории атомов - точке В, с помощью второго лазерного импульса облучения энергетические состояния атомов инвертируются: верхний переводится в состояние «0» со скоростью v_0 , а нижний - в состояние «1» со скоростью v_1 . При такой операции дополнительное фазовое рассогласование волн де-Бройля составляет π , или 180 градусов, что соответствует зеркальному отражению в оптике. Далее при этих условиях нижний атом как бы замедляется в своем падении, «поджидая» верхний, и через время $T = \Delta H / v_d$ они встречаются в точке С, где и происходит интерференция двух волн де-Бройля.

Фазовый набег на трассе движения атомов обоих потоков (эйконал, по аналогии с оптикой) определяется известной формулой:

$$\Phi_i = \omega_i \cdot t_{tr}, \quad (24)$$

где $t_{tr} = \frac{l_{tr}}{V_{\text{отн}}}$ - время движения пучка на трассе (время взаимодействия с гравитационным полем); $i = 1; 0$.

Вследствие эффекта Эйнштейна частоты верхнего и нижнего пучков связаны соотношением:

$$\omega_1 = \omega_0 \left(1 + \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{c^2} \right) = \omega_0 \left(1 + \frac{g \cdot dH}{c^2} \right), \quad (25)$$

где φ - гравитационный потенциал.

Вследствие кривизны пространства в гравитационном поле протяженность трассы обоих пучков также неодинакова:

$$l_1 = l_0 \left(1 + \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{c^2} \right) = l_0 \left(1 + \frac{g \cdot dH}{c^2} \right). \quad (26)$$

Далее, учитывая, что $T = l_0/V_{\text{отн}}$, находим приращение взаимного фазового набегу двух волн, «падающих» от точки инверсии В до точки встречи С:

$$d\Phi = \omega_0 \cdot T \cdot \frac{2g \cdot dH}{c^2}. \quad (27)$$

Используя соотношение (23), получаем выражение для искомого фазового сдвига:

$$\Delta\Phi = \frac{\omega_0}{c^2} \vec{V}_{\text{отн}} \vec{g} T^2 = \vec{k}_{\text{eff}} \vec{g} T^2, \quad (28)$$

где $\vec{k}_{\text{eff}} = \frac{\omega_0}{c^2} \vec{V}_{\text{отн}} = \frac{\omega_0}{c^2} (\vec{V}_1 - \vec{V}_0)$ - разностный, или эффективный, волновой вектор системы двух падающих волн.

Интересно отметить, что в частном случае оптической волны ($V_{\text{отн}} = c$), как и следовало ожидать, имеем $k_{\text{eff}} = \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Измеряя разность фаз $\Delta\Phi$, из формулы (28) находим искомое ускорение свободного падения g .

На сегодняшний день на данном принципе уже созданы несколько прототипов гравиметров, в частности исследовательским коллективом университета им. Гумбольта (Германия), а также фирмой μ -Quans (Франция) (рис. 7).

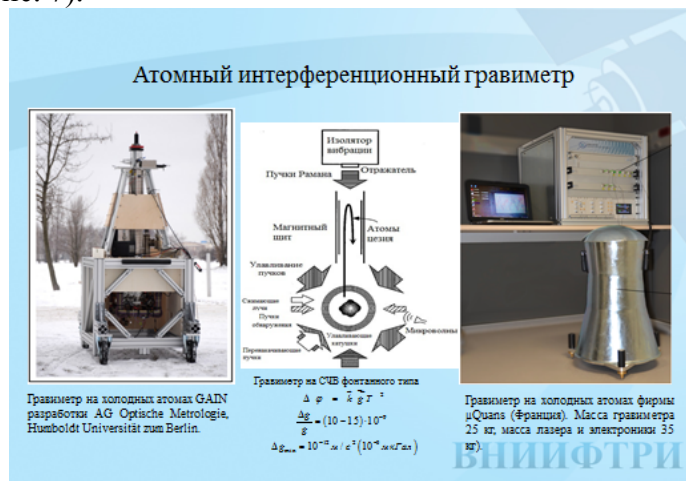


Рис. 7. Образцы атомных интерферометров

Технические характеристики прибора следующие:

- относительная чувствительность и погрешность измерения ускорения свободного падения на первом этапе создания прибора $\Delta g / g = 10^{-8}$ - 10^{-9} , что не хуже характеристик лучших образцов лазерных АБГ; при усреднении на периоде наблюдений 48 часов достижимая относительная чувствительность составляет 10^{-10} ; фундаментальные пределы чувствительности оцениваются величиной 10^{-12} - 10^{-14} ;

Преимущества прибора по сравнению с лазерным АБГ:

- более высокая оперативность проведения измерения для достижения соизмеримой точности: интервал осреднения составляет 1 мин против 15 минут у АБГ;

- радикальное уменьшение объема прибора: с сотен литров до нескольких литров;

- упрощение условий эксплуатации в полевых условиях, что объясняется меньшим весом, меньшей потребляемой мощностью, большим межремонтным периодом по причине отсутствия движущихся механических частей и др.

Области применения: геодезические измерения при стационарном размещении (в условиях геодезических полигонов) и при размещении на мобильных носителях (воздушных, подводных и др.).

Атомный гравитационный градиентометр

Средства измерений вертикального градиента гравитационного поля необходимы при измерении абсолютных значений ускорения свободного падения (УСП), так как гравитационное поле Земли неоднородно, и его изменения по высоте могут составлять величину около 3 микрогал на сантиметр. В настоящее время значения вертикального градиента определяются длительными многократными измерениями распределения гравитационного поля по высоте с помощью относительных гравиметров, устанавливаемых на разных высотах. Точность определения гравитационного градиента таким способом составляет (30-40)Е.

Принцип работы атомного гравитационного градиентометра основан на измерении разностного интерференционного эффекта, вызванного гравитационным градиентом в атомном гравиметре, измерительная база которого распределена по высоте. Важно, что измерения реализуются в одном приборе. За рубежом созданы экспериментальные образцы атомных интерференционных градиентометров с достаточно высокой чувствительностью. Достигнутая точность измерения вертикального гравитационного градиента на поверхности Земли – (1-7) Е [31].

Оценка погрешности измерения гравитационного градиента в состоянии невесомости дает цифру (10^{-2} - 10^{-3})Е.

Физический эффект, позволяющий провести такое измерение, называется эффектом гравитационного замедления времени. Он проявляется в смещении шкалы времени (запаздывании) часов, помещенных в гравитационное поле, по отношению к часам, находящимся вне его. На практике двое часов, размещенных в точках с разными гравитационными потенциалами, испытывают взаимный сдвиг шкал времени, пропорциональный разности ортометрических высот. Этот эффект предсказан Эйнштейном в рамках общей теории относительности [23]. Поскольку время и частота есть величины взаимообратные, то другое проявление этого эффекта – гравитационное смещение частоты электромагнитного излучения, распространяющегося в гравитационном поле. Иногда этот сдвиг частоты называется эффектом «красного» смещения. Оба этих эффекта подтверждены экспериментально [32, 33]. Одно из космических применений этого эффекта предложено автором и состоит в контроле орбит КА [34, 35].

Точные релятивистские соотношения для эффектов смещения частоты и времени мобильных СЧВ в гравитационном поле приведены в работах [21, 36]. В первом приближении эффекты гравитационного смещения времени $\Delta\tau_{\text{рел}}$ и частоты $\Delta f_{\text{рел}}$ по отношению, соответственно, к интервалу наблюдения τ_0 и номинальной частоте f_0 электромагнитного излучения определяются соотношением:

$$\frac{\Delta\tau_{\text{рел}}}{\tau_0} = \frac{\Delta f_{\text{рел}}}{f_0} = \frac{\varphi_{\text{м}} - \varphi_0}{c^2} \approx \frac{g_0 \Delta H_{\text{орт}}}{c^2} \quad (29)$$

где $\varphi_{\text{м}} - \varphi_0$ - разность гравитационных потенциалов в точках размещения измерительного (мобильного) стандарта частоты и времени (СЧВ) и базового СЧВ, являющегося хранителем шкалы времени τ_0 и частоты f_0 ; g_0 - ускорение свободного падения в точке размещения базового СЧВ; $\Delta H_{\text{орт}} = H_{\text{орт}}^{\text{м}} - H_{\text{орт}}^0$ - искомая разность ортометрических высот измерительного СЧВ $H_{\text{орт}}^{\text{м}}$ базового СЧВ $H_{\text{орт}}^0$. Если базовый СЧВ размещен на поверхности геоида, т.е. на берегу океана, то $H_{\text{орт}}^0 = 0$ и $\Delta H_{\text{орт}} = H_{\text{орт}}^{\text{м}}$. Это измерение используется для калибровки измерителя.

Измерение гравитационных эффектов смещения времени и частоты между наземными и космическими стандартами частоты и времени производится по каналам синхронизации шкал времени и каналам сличения частот. Такие каналы для наземных СЧВ реализуются в радиотехническом и оптическом диапазонах волн, а также с помощью перебазируемых квантовых часов [36].

Достигнутая относительная нестабильность стационарных стандартов СЧВ «фонтанного типа» имеет показатель $5 \cdot 10^{-16}$ [37]. В РФ и в ряде

зарубежных лабораторий плановым порядком создаются оптические СЧВ с нестабильностью 10^{-17} [38]. Нобелевская премия по физике 2013 г. присуждена за разработку прообраза стандарта с нестабильностью 10^{-18} [39]. В целом, рост стабильности СЧВ в последние годы на основе новых физических открытий приобретает взрывной характер и для оптических стандартов уже обсуждаются цифры 10^{-19} - 10^{-20} .

Чувствительность к изменению значения гравитационного потенциала $\delta\varphi$ определяется относительной нестабильностью задающего генератора $\frac{\delta f}{f}$: $\delta\varphi = \frac{\delta f}{f} c^2$, где c - скорость света. При нестабильности $5 \cdot 10^{-16}$ относительное значение чувствительности гравипотенциалометра составит $\approx 7 \cdot 10^{-7}$, что уже имеет практическое значение, поскольку соизмеримо с относительной чувствительностью других гравитационных измерителей. При нестабильности 10^{-17} ожидаемое относительное значение чувствительности составит $1,4 \cdot 10^{-8}$, что эквивалентно разрешению по ортометрической высоте около 9 см.

С помощью данного комплекса возможны прямые съемки профиля гравитационного потенциала вдоль орбиты КА. Такие измерения запланированы в 2016 г. в эксперименте ACES Европейского космического агентства на базе МКС с использованием бортовых стандартов частоты и времени с нестабильностью 10^{-16} - 10^{-17} [40].

Литература

1. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976.
2. Татевян С.К. Глобальная геодезическая система наблюдения GGOS. Научные задачи и перспективы / Материалы конференции «Современные проблемы зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11-14 ноября 2008 г.
3. Vitushkin L. Measurement standards in gravimetry, 2008 . Proceedings of International Symposium "Terrestrial Gravimetry. Static and Mobile Measurements TGSMM-2007", St Petersburg, Russia, State Research Center of Russia Electropribor, p. 98-105.
4. Drinkwater Mark R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., Floberghagen R., Kern M. and Fehringer M. «THE GOCE GRAVITY MISSION: ESA'S FIRST CORE EARTH EXPLORER», Proceedings of the 3rd International GOCE User Workshop, 6-8 November, 2006, Frascati, Italy.
5. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука, 1974.
6. Авдеевский В.С., Дубовской В.Б. и др. Пространственная эволюция остаточных ускорений на борту космических аппаратов // Космические исследования, т.27, вып. 4, 1988.

7. Дубовской В.Б., Леонтьев В.И., Пшеняник В.Г., Сбитнев А.В. Методы уточнения глобальной модели гравитационного поля Земли с использованием спутниковой акселерометрии и градиентометрии. Материалы IX НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2012, с.383-388.
8. Красовский А.А., Румянцев Е.А., Сучков А.И., Вавилов Ю.А. Одноканальные двумерные измерительные и управляющие системы. / Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, вып. 1207. Издание Академии, 1967, 345 с.
9. Wills W. C. Spaceborne gravity gradiometers, NASA Conference Publication 2305, edited by William C., Wells, 1984, 76 p.
10. Сорока А.И., Фатеев В.Ф. Способ измерения гравитационного градиента / Авт. свид. на изобретение №1108892, приоритет от 02.09.1982 г.
11. Сорока А.И., Фатеев В.Ф., Лапин А.М. Гравитационный градиентометр / Авт. свид. на изобретение №1108893, приоритет от 02.09.1982 г.
12. Сорока А.И., Микаэльян С.В., Полубехин А.И., Цыганков В.Ю., Попадьев В.В. Аэрокосмическая гравиградиентометрия, её статус, перспективы дальнейшего развития и возможного инновационного использования. Материалы Всероссийской научно-технической конференции “XI Научные чтения, посвященные памяти Н.Е. Жуковского”/ Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2014, с.341-343.
13. National aeronautics and space administration (NASA), GRACE launch, Press Kit, March 2002.
14. Jason-1 Altimetry Mission. Сайт «Sharing Earth Observation Research – eoPortal». [Электронный ресурс].
http://www.eoportal.org/directory/pres_Jason1AltimetryMission.html
15. Poseidon-3 Сайт «CEOS EO Handbook: Instrument SummarySTRUMENT SUMMARY– POSEIDON-3» [Электронный ресурс].
<http://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=829>
16. Жуков Е.Т., Иванов Д.В., Курдубов С.Л. Сличение удаленных стандартов частоты и времени методом РСДБ. Материалы 4-й Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2011), С-Петербург, 10-14 окт., 2011 г./ «Труды ИПА РАН», вып. 23, 2012,с.125-130.
17. Садовников М.А., Федотов А.А., Шаргородский В.Д. Высокоточная односторонняя дальнометрия: состояние и перспективы применения в ГЛОНАСС, там же, с. 61-69.
18. Petit G. and Lusum B. International Earth Rotation and Reference System Servis (IERS) Conventions (2010) // IERS Technical Note, № 36, Frankfurt

- am Main, 2010.
19. Коростелев А.А., Фатеев В.Ф. Электродинамика движущихся сред в неинерциальных системах отсчета применительно к процессам в кольцевом резонаторе // Оптика и спектроскопия, 1978. т. 45, вып. 1, с.132-139.
 20. Фатеев В.Ф. Преломляющие свойства гравитационной сферы Земли во вращающихся системах отсчета // Электромагнитные волны и электронные системы, 2013, том 18. № 5, с. 73-82.
 21. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория радионавигации и синхронизации. – Л.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 1988.
 22. Фатеев В.Ф. Гравитационные и релятивистские эффекты в односторонней околоземной космической радиолинии // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013, том 18, № 5, с. 83-93.
 23. Мёллер К. Теория относительности / 2-е изд. М.: Атомиздат, 1975.
 24. Bommel H.E. Measurement of the frequency shift of gamma rays in accelerated system using the Mossbauer effect . The Mossbauer effect. N. Y. 1961.
 25. Бортовой акселерометр на основе эффекта Мёссбауэра. / Патент Франции. Кл. G 01 №1605400, опубли. 18.04.75.
 26. Фатеев В.Ф. и др. Устройство для определения параметров движения ИСЗ на орбите // А.С. № 469374, приоритет от 23.02.1973.
 27. Фатеев В.Ф. Способ измерения гравитационного поля и линейного ускорения / А.С. № 696827, приоритет от 25.01.1978.
 28. Фатеев В.Ф. и др. Датчик напряженности гравитационного поля / А.С. № 778498, приоритет от 03.05.1979.
 29. Фатеев В.Ф. Датчик напряженности гравитационного поля / А.С. №699918, приоритет от 19.06.1978.
 30. Барышев В.Н., Блинов И.Ю. Применение атомных интерферометров в гравиметрии // Измерительная техника. 2014, № 12. с. 3-6.
 31. McGuirk J.M., Foster G.T., Fixler J.B., Snadden M.J. and Kasevich M.A. Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry// PHYSICAL REVIEW A, 2002, v. 65, 033608.
 32. Pound R.V., Snider J.L. Effect of gravity on gamma radiation // Phys.Rev. 1965, v 140, B788-B803.
 33. Vessot R.F.C. et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser //Phys. Rev. Let., 1980, v. 45. p. 2081-2084.
 34. Быков В.Е., Фатеев В.Ф. Исследование возможностей использования релятивистских эффектов для построения систем, предназначенных для измерения параметров движения объектов. Отчет о НИР, №58-У, РВКИУ им. М.И. Неделина, Ростов-на-Дону, 1971, 120 стр.
 35. Быков В.Е., Фатеев В.Ф. Способ контроля круговых экваториальных орбит ИСЗ / Авт. свид. на изобретение №370831 с приоритетом от
-

04.05.1970.

36. Фатеев В.Ф., Сысоев В. П. Релятивистские эффекты в мобильных часах // Измерительная техника, 2014, №2, с. 31-36. Fateev V.F., Sysoev V.P. Relativistic Effects on Moving Clocks // Measurement Techniques. November 2014, v. 57, Issue 8, p. 891-897.
37. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Гончаров А.С. и др. Состояние и перспективы развития Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012/ Материалы VII Международного симпозиума "Метрология времени и пространства". Суздаль, 2014, 17-19 сентября, с.7-8.
38. Пальчиков В.Г. Состояние и перспективы развития оптических стандартов времени и частоты на холодных атомах и ионах / Материалы 4-й Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2011)». С-Пб, 10-14 окт/ 2011 г. В кн. «Труды ИПА РАН», 2012, вып. 23. с.107-111.
39. Bloom B.J., Nicholson T.L., Williams J.R. e.a. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level // Nature, 2014, v. 506, p. 71-75.
40. Cacciapuoti L., Salomon C. Atomic Clock Ensemble in Space/ International Symposium on Physical Sciences in Space, Journal of Physics: Conference Series 327 (2011) 012049, doi:10.1088/1742-6596/327/1/012049.