

УДК 681.2

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ ДЛЯ
ИЗМЕРЕНИЙ НА КА И ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ****А.Б. Манукин, И.И. Калинин, В.П. Матюнин, В.Б. Дубовской,
В.И. Леонтьев***Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН
e-mail: amanukin@yandex.ru*

В статье рассмотрены вопросы измерений с помощью высокочувствительных акселерометров на КА и планетах. Выделены 4 основные группы задач гравиинерциальных измерений: инженерно-технические, измерение воздействий на КА негравитационных сил, исследование гравиинерционных полей планет, проведение тонких физических экспериментов. Приведены оценки величины негравитационных сил, действующих на КА.

Приведено описание разработанного малогабаритного высокочувствительного акселерометра с оценками предельной чувствительности, определяемой тепловыми флуктуациями, и возможности его применения для измерений на борту КА и на поверхности планет.

Ключевые слова: акселерометры, гравиинерционные поля планет

Введение

Размещение высокочувствительных акселерометров на космических аппаратах (КА) создает предпосылки не только для измерения ускорений, вызванных работой двигателей малой тяги. Акселерометр на КА – устройство, которое измеряет принципиально только негравитационные воздействия на КА. Именно это обстоятельство и позволяет использовать такие измерительные средства для получения информации о плотности атмосферы планет как функции расстояния до планеты (вплоть до очень больших расстояний, где плотность мала), о плотности потоков возможных пылевых образований в Космосе, об эффектах давления электромагнитного излучения и солнечного ветра, влияния магнитных полей и т.п.

Измерения гравитационных и инерционных полей относятся к гравиинерциальным измерениям. Они отнесены к одному классу измерений в соответствии с принципом эквивалентности. Гравиинерциальный прибор для таких измерений представляет собой пробную массу, связанную с корпусом упругим и диссипативным элементами, движение которой относительно корпуса прибора измеряется с помощью чувствительного датчика.

Рассмотрены задачи, для решения которых необходимы гравиинерциальные измерения. Среди них выделено 4 основные группы:

1. Инженерно-технические задачи.
2. Измерение воздействия на КА негравитационных сил.
3. Исследование гравиинерциальных полей планет.
4. Проведение тонких физических экспериментов с использованием КА.

Для каждой группы указан ряд конкретных задач, необходимая чувствительность измерительных средств, их частотный и динамический

диапазоны. Рассмотрена возможность использования датчиков с электронными емкостными преобразователями малых механических перемещений пробной массы, построенных на основе разработанных малогабаритных двухкоординатных акселерометров [1,2]. Показано, что они могут найти применение для решения практически всех задач из первых 3-х основных групп и обеспечить диапазон измерений ускорений от 10^{-8} до 50 g.

Для проведения измерений при постановке тонких физических экспериментов необходима существенно более высокая чувствительность.

Рассмотрены вопросы предельной чувствительности гравиинерциальных измерений, определяемой только равновесными тепловыми флуктуациями механического осциллятора (преобразователь малых механических перемещений пока считается идеальным). Показано, что, например, увеличение величины пробной массы до 1 кг и изготовление на её основе механического осциллятора с собственной частотой $\sim 4,5 \cdot 10^{-2}$ рад/с, позволило бы проводить измерения ускорений с чувствительностью $\sim 3 \cdot 10^{-13}$ g. Приведены оценки обратного динамического влияния преобразователя на движение пробной массы.

Рассмотрены проблемы испытаний и проведения калибровок таких приборов в условиях наземной лаборатории.

Принцип построения разработанного акселерометра, основные характеристики и предельные оценки

Для решения задач измерения малых ускорений в рамках различных космических программ (MetNet, Солнечный парус, Фобос-Грунт, измерения на МКС) был разработан многофункциональный двухкоординатный акселерометр [1, 2], изменяя параметры которого можно существенно расширить область его применения. Здесь полезно привести краткое описание устройства акселерометра.

Цилиндрическая пробная масса m 1, (рис.1) связана с неподвижным цилиндрическим элементом 2 тонким стержнем 5, исполняющим роль элемента жесткости. Используется изгибная жесткость стержня. На внутренней поверхности диэлектрической трубочки 3, играющей роль корпуса чувствительного элемента, расположены 4 электрода 4. Electroды нанесены методом напыления и с пробной массой из молибдена образуют измерительные емкости. Две пары дифференциальных измерительных емкостей входят в состав двух емкостных преобразователей, с помощью которых смещение пробной массы по оси X преобразуется в изменение электрического напряжения U_x , а смещение по оси Z - в изменение электрического напряжения U_z . Зазор между пробной массой и электродами - d . (Этот зазор в разработанном варианте составляет 50 мкм).

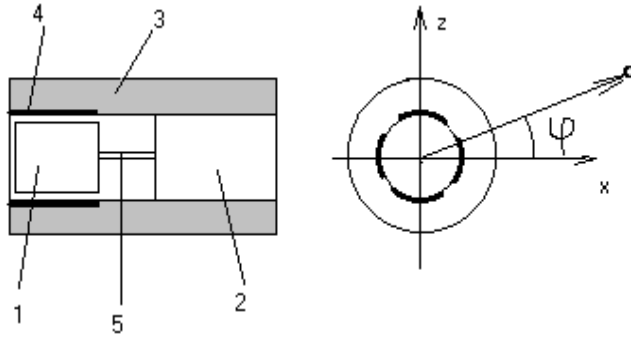


Рис. 1. Схема многофункционального двухкоординатного акселерометра

Требования к величине жесткости K упругого элемента и собственной механической частоте ω осциллятора с пробной массой m легко определить из следующих соображений. Пусть необходим акселерометр для измерения ускорений в диапазоне $(a_{\max} - a_{\min})$. Это означает, что механическое смещение x_{\max} пробной массы под действием ускорения a_{\max} должно быть не более величины зазора d , т.е. $x = d/n$, где n - число, большее 1, например, 2. Тогда $x_{\max} = m a_{\max}/K = a_{\max}/\omega^2 = d/n$. Поэтому собственная частота механического осциллятора:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n \cdot a_{\max}}{d}}. \quad (1)$$

Интересно, что для такого датчика собственная частота зависит только от максимального измеряемого ускорения и величины зазора в емкостном преобразователе. Так, при необходимости измерения минимального ускорения a_{\min} , и условия, что преобразователь позволяет обеспечить динамический диапазон $N = a_{\max}/a_{\min}$, $a_{\max} = N a_{\min}$. Поэтому соотношение (1) можно записать в виде

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n \cdot N \cdot a_{\min}}{d}}. \quad (2)$$

Так, при динамическом диапазоне 100 дБ, т.е. $N = 10^5$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{n \cdot 10^5 \cdot a_{\min}}{d}}$.

Оно определяет необходимую величину жесткости K упругого элемента чувствительной системы при выбранной величине пробной массы m .

$$K = \frac{m \cdot n \cdot 10^5 a_{\min}}{d}.$$

Это соотношение дает возможность задать конкретные геометрические и физические параметры элемента жесткости – модуль Юнга E , диаметр D и длина l .

Величину a_{\min} нельзя выбрать произвольно малой, поскольку она ограничена снизу прежде всего тепловыми флуктуациями механического осциллятора. Если считать электронный преобразователь малых механических перемещений пробной массы идеальным, т.е. не вносящим дополнительных шумов, то тепловые флуктуации механического осциллятора определяют предельную чувствительность прибора.

Оценку этих равновесных тепловых шумов можно получить из следующих соотношений. Величина минимально обнаружимого изменения ускорения, действующего на механический осциллятор, определяется выражением [3]:

$$a_{\min L} \approx \omega_0 \sqrt{\frac{\chi T}{m}}, \quad (3)$$

где ω_0 – собственная частота осциллятора, χ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, m – величина пробной массы осциллятора.

Из формул (1, 2, 3) для случаев, когда необходимо вести измерения с максимальной чувствительностью, можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$a_{\min L} \geq \frac{n \cdot N \cdot \chi T}{d \cdot m}, \quad \omega_0 \approx \frac{n \cdot N}{d} \sqrt{\frac{\chi T}{m}}. \quad (4)$$

Заметим еще раз, что соотношения (4) получены для случая, когда учитываются только тепловые флуктуации в механическом осцилляторе (механической упругой системе прибора). Наличие шумов электронного преобразователя, шумов техногенного происхождения на КА, конечно, ухудшит ситуацию, и реальная величина чувствительности $a_{\min} > a_{\min L}$. Однако получить чувствительность выше $a_{\min L}$ нельзя, поэтому она и называется предельной чувствительностью.

Из (4) очевидно, что для снижения величины $a_{\min L}$ необходимо увеличивать пробную массу m , увеличивать зазор d и уменьшать N и T , т.е. охлаждать систему. Предельная чувствительность разработанного акселерометра с параметрами: $d = 5 \cdot 10^{-5}$ м (50 мкм), $m = 5$ г, $N = 10^5$, $n = 2$, $T = 300$ К, $\chi = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град, $a_{\min L} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ м/с² = $3 \cdot 10^{-10}$ g. При этом необходимо, чтобы собственная частота механической упругой системы $\omega_0 \approx 4$ рад/с или $\sim 0,7$ Гц. В реальных образцах акселерометров $\omega_0 \approx 30$ рад/с, поэтому (3) $a_{\min L} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ м/с².

На рис.2 показана последовательность изготовления чувствительного элемента двухкоординатного акселерометра.

Последовательность изготовления чувствительного элемента

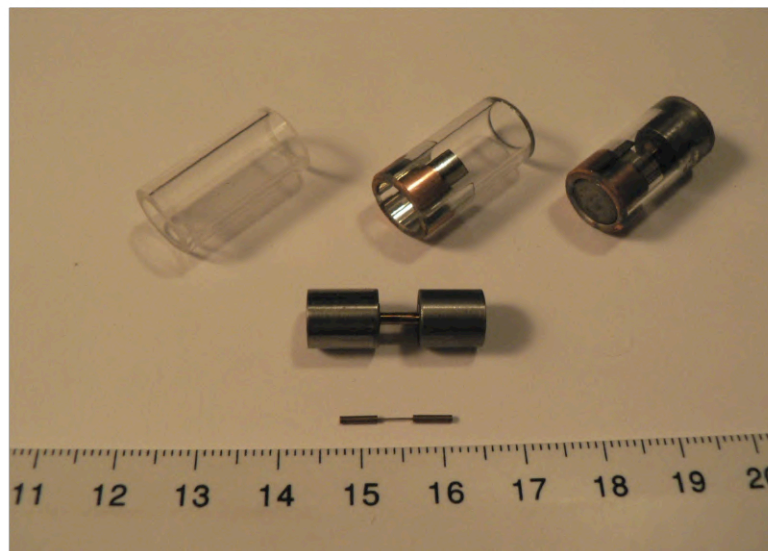


Рис. 2.

Увеличив пробную массу m до 1 кг, зазор d до 0,1мм и выбрав $N = 10^3$, получим $a_{\min L} \approx 10^{-14} \text{ м/с}^2$ и $\omega_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$. Плата за такую высокую чувствительность – увеличение массы прибора, снижение динамического диапазона и очень низкая собственная частота механической системы. Последнее вызывает наибольшие трудности, как в части технологии изготовления, так и в части испытаний в наземной лаборатории. Эталонирование акселерометров обычно ведется методом наклонов, однако получить столь малые величины проекции g на ось чувствительности прибора нереально, поскольку даже в самых «тихих» местах на Земле шумовые наклоны составляют $\sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ рад}/\sqrt{\text{Гц}}$ в широком частотном диапазоне. Это означает, что ошибки при эталонировании составят $\sim 5 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$. Чтобы почувствовать малость ускорений, которые можно в принципе измерять таким прибором, достаточно указать, что гравитационное ускорение от массы в 1 кг на расстоянии 80 м составляет $\sim 10^{-14} \text{ м/с}^2$.

Существует еще обратное влияние преобразователя малых механических перемещений на пробную массу акселерометра: динамическое и флуктуационное. Полагается, что компенсационными методами можно существенно уменьшить динамическое влияние преобразователя. Оно связано с кулоновским взаимодействием пробной массы и обкладок измерительных емкостей. Если U – напряжение между обкладками, d – зазор, S – площадь обкладки, ($S \approx \pi R^2$, R – радиус пробной массы, длина пробной массы также равна R). Поскольку $d \ll R$, конденсатор можно считать плоским. В этом приближении ускорение пробной массы под действием

кулоновской силы:

$$a_{\text{обр.динам.}} = \xi \frac{S \cdot U^2}{8\pi d^2 m} \quad (5)$$

При $R = 4$ мм, $U = 0,3$ В, $d = 50$ мкм, $m = 5$ г, $a_{\text{обр.динам.}} = \xi \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}$ м/с². Коэффициент ξ характеризует уровень компенсации. При уровне компенсации $\xi = 10^{-3}$, (который является уровнем), $a_{\text{обр.динам.}} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ м/с². Этот показатель всего в 2 раза меньше $a_{\text{minL}} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ м/с². Поэтому это влияние необходимо учитывать при проектировании преобразователя.

Если предположить, что применением компенсационных методов удалось исключить динамические эффекты влияния преобразователя, то остается некомпенсированным флуктуационное воздействие, связанное с флуктуационной составляющей U . Оценки показывают, что $a_{\text{обр.фл.}} \ll a_{\text{minL}}$, поэтому здесь обратное флуктуационное воздействие не рассматривается [3].

О квантовых ограничениях для минимально обнаружимого ускорения см. [3].

Теперь рассмотрим более подробно те области гравиинерциальных измерений, где устройства подобного рода могут применяться.

Инженерно-технические задачи

1. Измерение величины тяги двигателей КА. Диапазон измеряемых величин огромный – от нескольких g при работе мощных двигателей до очень малых ускорений при работе двигателей малой тяги, двигателей коррекции орбиты. В качестве иллюстрации можно рассмотреть случай ускорений МКС

($M \sim 1,5 \cdot 10^5$ кг) при работе двигателя с величиной тяги $F = 1$ г силы или 10^{-2} н. Ускорение $a = F/M \sim 7 \cdot 10^{-8}$ м/с² = $7 \cdot 10^{-9}g$. Для обеспечения всего диапазона необходимо использование нескольких акселерометров, предназначенных для работы в разных диапазонах. По результатам измерений можно оценить силу тяги двигательной установки.

2. Решение обратной задачи: оценка массы самого КА по измеренному ускорению и известной величине тяги.

3. Измерение не только линейных ускорений КА, но и параметров вращательных движений по показаниям системы разнесенных акселерометров. При известной силе тяги двигателей, по этим измерениям можно реально оценить не только массу КА, но и его моменты инерции.

4. Измерения уровня техногенных инерционных шумов на КА. Их оценка важна для постановки ряда прецизионных экспериментов и исследований на борту.

Измерение воздействия на КА негравитационных сил

Движение КА по геодезической кривой может возмущаться, если на него воздействуют не только гравитационные силы. Чаще всего это

поверхностные воздействия, хотя могут быть возмущающие силы и поверхностного характера.

1. Воздействие атмосферы.

Воздействие на спутник в верхних слоях атмосферы можно оценить из следующего соотношения:

$$a_{atm} = \frac{\rho_{atm} v_{ка}^2 C_D S}{2M},$$

где ρ_{atm} – плотность атмосферы на орбите КА, $v_{ка}$ – скорость КА, S – проекция площади КА на плоскость, перпендикулярную его скорости, C_D – безразмерный коэффициент лобового сопротивления. Так, для КА с $C_D=2$, $S = 2 \text{ м}^2$, $M = 200 \text{ кг}$, находящегося на высоте 400 км, величина $a_{atm} \sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$.

Если КА – спутник, движущийся по эллиптической орбите, по величине a_{atm} в разных точках орбиты можно судить о плотности атмосферы на разных высотах и ее неоднородностях. При спуске на исследуемую планету данные о a_{atm} можно использовать для получения плотностного разреза атмосферы планеты.

2. Давление солнечного излучения.

В рамках проекта «Солнечный парус» уже был разработан и изготовлен бортовой вариант акселерометра [4] с чувствительностью $10^{-7} g$. Ускорение от давления солнечного излучения с плотностью потока мощности W равно $a=WS/Mc$, c – скорость света, при известных параметрах спутника ($M=100 \text{ кг}$, $S=600 \text{ м}^2$) должно составлять $\sim 1,5 \cdot 10^{-5} g$. Масса акселерометра при этом была около 900 г. Использование обсуждаемого варианта акселерометра позволит снизить массу до 100 – 150 г и достигнуть чувствительности $10^{-9} g$. Она ограничена только равновесными тепловыми флуктуациями механического чувствительного элемента.

3. Эффект ротационной пондеромоторной неустойчивости.

Суть этого эффекта состоит в том, что сферически или цилиндрически симметричное тело в однородном потоке электромагнитного излучения становится ротационно неустойчивым. Это связано с тем, что симметричные относительно направления потока точки А и В (рис.3) физически несимметричны. Точка А, вышедшая из тени, имеет меньшую температуру, чем точка В, уходящая в тень.

Поскольку коэффициент поглощения для всех материалов растет с ростом температуры, то тангенциальная составляющая силы светового давления $F_B > F_A$, что создает момент сил, приводящий к ускорению начального вращательного движения тела.

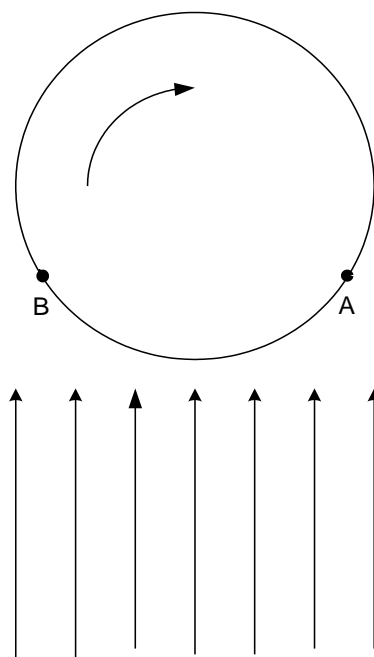


Рис. 3. Схема, поясняющая эффект ротационной пондеромоторной неустойчивости

Этот эффект наблюдался экспериментально [5] в лабораторных условиях.

Аналогичный эффект должен наблюдаться и для КА. Так, спутник диаметром 3 м и массой 300 кг за год вследствие данного эффекта увеличит свою угловую скорость на 0,1 рад/с при условии, что температурная зависимость коэффициента поглощения $\sim 10^{-4}$ 1/град. Центробежное ускорение, которое должен измерить акселерометр, установленный на расстоянии 1 м от оси вращения КА, составит $\sim 10^{-2}$ м/с².

4. Давление солнечного ветра.

Солнечный ветер вызывает ускорение КА $a_{с.в.}$ не больше, чем

$$a_{с.в.} \approx \frac{\kappa \cdot \mu \cdot S \cdot v^2}{M},$$

где κ - объемная концентрация частиц в солнечном ветре, масса которых μ и скорость v . Полагая $\kappa = 10 \text{ см}^{-3}$, $v = 10^6 \text{ м/с}$, $S = 7 \text{ м}^2$, $M = 300 \text{ кг}$, $\mu = 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ г}$, получим оценку $a_{с.в.} \approx 4 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}^2$.

5. Воздействие микрометеоритных потоков.

Удары микрометеоритов на околоземной орбите достаточно редки. Так, например, с метеоритом массой 10^{-12} г КА с площадью $S = 7 \text{ м}^2$ будет сталкиваться в среднем один раз в 25 с. При скорости микрометеоритов $3 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ и массе КА $M = 300 \text{ кг}$ вариации скорости КА порядка $\sim 10^{-13} \text{ м/с}$ и

усредненные изменения ускорения $a_{\text{м.м}} \sim 4 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}^2$.

Исследование гравиинерциальных полей планет

К этому разделу относится широкий круг задач, решаемых гравиинерциальными методами:

А. Измерение гравитационного поля планеты и его вариаций во времени, включая приливные вариации ускорения свободного падения. Данные измерения относятся к классическим гравиметрическим измерениям.

Б. Измерение наклонов аппарата относительно местной гравитационной вертикали.

В. Измерение микросейсмического фона планеты.

Задачи А и Б взаимосвязаны: для выявления причины изменения измеряемой величины требуется наличие трехкоординатного акселерометра. Для пояснения предлагаемой методики можно рассмотреть плоский случай, который легко распространить на трехмерный. Пусть после посадки КА наклон относительно местной гравитационной вертикали на угол b в плоскости осей чувствительности акселерометра xz (рис.4). Ось y перпендикулярна плоскости рисунка. Проекция g на оси чувствительности акселерометра:

$$g_x = g \cdot \sin b;$$

$$g_z = g \cdot \cos b.$$

При изменении g – ускорения свободного падения на величину Δg соответствующие изменения показаний по осям чувствительности:

$$\Delta g_x = \Delta g \cdot \sin b;$$

$$\Delta g_z = \Delta g \cdot \cos b.$$

При изменении угла наклона КА также будут наблюдаться изменения показаний акселерометра:

$$\Delta g_x = g \cdot \cos b \cdot \Delta b;$$

$$\Delta g_z = -g \cdot \sin b \cdot \Delta b.$$

Понять причину изменений показаний акселерометра можно по величине отношения

$$\frac{\Delta g_x}{\Delta g_z} = r.$$

Если изменяется g , то $r = \text{tg } b$, если же изменяется угол наклона КА, то $r = -\text{ctg } b$.

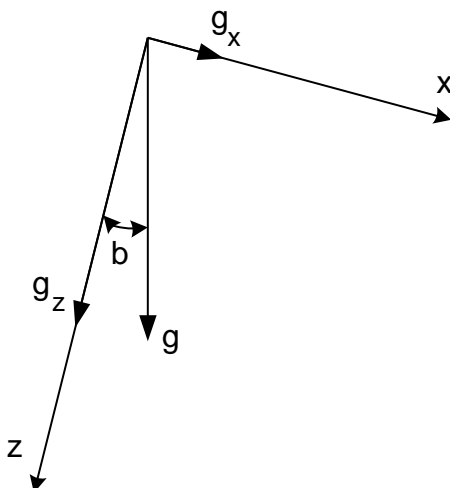


Рис. 4. Схема, поясняющая методику выявления причин изменения проекций ускорения свободного падения g на оси чувствительности прибора: вариации g или вариации наклонов прибора относительно местной гравитационной вертикали

При использовании описанного ранее акселерометра можно измерить относительное изменение ускорения свободного падения

$$\frac{\Delta g}{g} \approx 10^{-6}.$$

Эта величина определяется в основном динамическим диапазоном прибора и связана с тем, что в рассмотренном простом варианте акселерометра, без систем с обратной связью, упругий элемент обеспечивает полную компенсацию силы тяжести, действующей на пробную массу. Минимальный измеряемый уход угла наклона КА имеет ту же величину – 10^{-6} рад или $\sim 0,2$ угл. с., при условии, что диапазон измеряемых ускорений по осям x и y также $1g$. Если же есть возможность выставить акселерометр так, чтобы его ось z была направлена вдоль местной гравитационной вертикали с ошибкой не более 10^{-2} рад ($0,6^\circ$), то разрешение по измерению вариаций угла наклона КА может быть 10^{-8} рад или 2 угл. мс. Это связано с тем, что в этом случае для измерений вдоль осей x , y можно использовать более чувствительные акселерометры.

С помощью акселерометра возможно также и решение задачи В – измерение микросейсмического фона планеты.

Если основание прибора совершает гармонические колебания с частотой ω и амплитудой A , то амплитуда колебаний пробной массы акселерометра

$$x = \frac{A\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega_0^2 \omega^2}{Q^2}}}. \quad (6)$$

Здесь Q – добротность механического осциллятора. Пусть акселерометр должен измерять полное значение ускорения свободного падения планеты g_p . Тогда квадрат его собственной частоты (1)

$$\omega_0^2 = \frac{g_p \cdot n}{d}.$$

Приравнявая $x_{\min} = d/nN$ выражению (6) и учитывая, что для интересующей сейсмологов полосы частот 0,1 – 10 Гц $\omega_0 \gg \omega$, получим для A_{\min} :

$$A_{\min} \cong \frac{g_p}{N\omega^2}. \quad (7)$$

В отличие от классического сейсмометра в выражении (7) присутствует явная зависимость A_{\min} от частоты, но эта зависимость известна, и ее можно учесть при обработке результатов измерений. Для планеты с $g_p = 5 \text{ м/с}^2$ значения A_{\min} для трех основных частот приведены в табл. 1:

Таблица 1

Частота, Гц	A_{\min} , М
0,1	$1,2 \cdot 10^{-5}$
1	$1,2 \cdot 10^{-7}$
10	$1,2 \cdot 10^{-9}$

Если есть возможность выставить акселерометр на КА так, чтобы его ось z была направлена вдоль местной гравитационной вертикали с ошибкой не более 10^{-2} рад ($0,6^\circ$), то для координат x и y можно использовать более чувствительные элементы, для которых $a_{\max} = 10^{-2} g_p$.

Табл. 2, аналогичная предыдущей, для минимальных горизонтальных смещений почвы в этом случае будет иметь вид:

Таблица 2

Частота, Гц	A_{\min} , М
0,1	$1,2 \cdot 10^{-7}$
1	$1,2 \cdot 10^{-9}$
10	$1,2 \cdot 10^{-11}$

Таким образом, данные акселерометры могут использоваться и для измерения сейсмической активности планет.

Проведение тонких физических экспериментов с использованием КА

Среди физических экспериментов, связанных с обнаружением гравитационных релятивистских эффектов в неволновой зоне можно выделить те, обнаружение которых сводится к обнаружению малых сил или моментов сил, действующих на пробные тела. Это эффекты нелинейного взаимодействия гравитационных масс и эффекты, вызванные относительным движением гравитационных масс.

Здесь мы более подробно остановимся на проблеме обнаружения гравитационного излучения от внеземных источников. Этой проблеме посвящено несколько международных экспериментальных программ. Наземные лазерные интерферометрические гравитационно-волновые антенны [6] (программы LIGO, VIRGO, Geo-600, TAMA) должны достигнуть чувствительности в единицах возмущения метрики $h \sim 10^{-21}$. Этой величине соответствует амплитуда колебаний между двумя зеркалами – маятниками, разнесенными на расстояние $L = 4$ км, $\Delta X = (1/2)hL = 2 \cdot 10^{-16}$ см.

Другая интересная экспериментальная программа – это проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna), который предполагается осуществить в 2020 – 2030 гг. [7] По существу, это такая же гравитационно-волновая антенна на свободных зеркалах-массах с лазерным интерферометрическим измерителем, регистрирующим малые относительные колебания зеркал, как и в LIGO и VIRGO. Различие лишь в том, что LIGO и VIRGO нацелены на диапазон гравитационного излучения от 30 Гц до 1000 Гц, в то время как LISA – на диапазон от 10^{-5} Гц до 10^{-2} Гц. Поэтому расстояние между зеркалами $L \sim 5$ млн. км и зеркала размещены на трех спутниках, общий центр масс которых вращается вокруг Солнца на той же орбите, что и Земля. Планируемая чувствительность должна быть на уровне $h \sim 6 \cdot 10^{-21}$ (на частоте 10^{-4} Гц и времени усреднения 10^4 с.) Этому соответствует амплитуда колебаний зеркал $\Delta X = (1/2) hL = 1,5 \cdot 10^{-10}$ см, создаваемая разностью ускорений у зеркал $a_{LISA} = 6 \cdot 10^{-16}$ см/с². В малости этой величины – основная трудность в проекте LISA. Главная трудность состоит в том, что у обычных, не слишком массивных КА, траектории заметно отличаются от геодезических (в основном из-за вариаций давления солнечной радиации и солнечного ветра). Это отклонение соответствует отличию ускорения от чисто ньютоновского на величину $\sim 10^{-16}$ см/с².

Возможный путь решения этой проблемы – создание спутника, свободного от сноса либо измерение негравитационных ускорений КА с чувствительностью $a_{LISA} = 6 \cdot 10^{-16}$ см/с² и внесение соответствующих поправок при обработке результатов эксперимента. При создании такого прецизионного акселерометра необходимо будет учитывать не только классические тепловые шумы, но и квантовые ограничения [3,8].

Литература

1. Готлиб В.М., Евланов Е.Н., Манукин А.Б., Ребров В.И. и др. Датчик микроускорений / Сборник докладов выездного семинара «Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении», Таруса, 25-27 марта 2003г., ИКИ РАН, 2004, с. 275-285.
2. Готлиб В.М., Зубков Б.В., Линкин В.М., Липатов А.Н., Манукин А.Б. Миниатюрный акселерометр-сейсмометр для малой марсианской станции / Сб. докладов выездного семинара «Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении». М.: ИКИ РАН, 2005, с.213-234.
3. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука,1974, 152 с.
4. Готлиб В.М., Евланов Е.Н., Манукин А.Б., Ребров В.И. и др. Высокочувствительный кварцевый акселерометр для измерения малых ускорений КА // Известия РАН. Космические исследования, 2004, № 1, т. 42, с. 57-62.
5. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. // Письма ЖЭТФ, 11, 1970, с. 321.
6. Брагинский В.Б. // УФН, 2000, 170 с. 743.
7. Брагинский В.Б. // УФН, 2003, 173, 1, с. 89.
8. Брагинский В.Б. // УФН, 2005, 175, 6, с. 621.