



Республика Таджикистан

(19) **TJ** (11) **276**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ
ВЕДОМСТВО

(51) **7 G01V 7/02**

(12) **Описание изобретения** К ПАТЕНТУ

(21) 97000462

(22) 04.10.95

(31) 264610

(32) 04.10.94

(33) NZ

(46) 05.10.2000, Бюл №3 (19)

(85) 04.05.97

(86) PCT/GB 95/02349 (04.10.95)

(72) Веряскин Алексей Владимирович (NZ)

(71) (73) Грэвитек Инструментс Лимитед (GB)

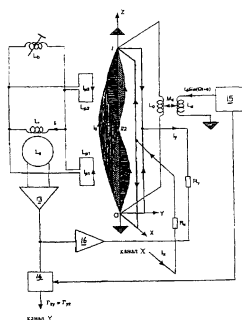
(56) US 3483753 A, 16.12.69. US 3722284 A,

27.03.69. US 3769840 A, 06.11.73. US 3564921 A,

23.02.71. FR 1599859 A, 20.07.70. SU 1428046 A1, 15.12.93.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

(57) Использование: измерение абсолютных значений недиагональных составляющих тензора градиента гравитации. Устройство для измерения гравитационных полей содержит сверхпроводящую струну, закрепленную на своих концах и образующую часть замкнутого сверхпроводящего контура, индуктивно связанного с двумя соленоидами возбуждения. Смещение струны, реагирующей на гравитационное поле, обнаруживается двумя преобразователями магнитного потока, каждый из которых содержит сигнальную катушку и две измерительные катушки. Пары измерительных катушек находятся в двух перпендикулярных плоскостях, формируя два независимых канала измерения. Две ветви каждого преобразователя потока сбалансированы для того, чтобы преобразовывать в выходное напряжение только амплитуды несимметричных собственных колебаний струны. Выходное напряжение каждого канала используется для формирования, распределения тока обратной связи вблизи струны параллельно ей. Путем подстройки тока обратной связи может быть отрегулировано эффективное время затухания и резонансная частота первого несимметричного собственного колебания струны. Технический результат: увеличение чувствительности устройства к градиентам гравитации. 4 с, и 18 з.п.ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

Настоящее изобретение относится к измерению гравитационных полей, в частности к градиометрии гравитации, а более конкретно - к способу измерения абсолютных значений недиагональных составляющих тензора градиента гравитации.

Тензор градиента гравитации представляет собой двумерную матрицу вторых частных производных гравитационного потенциала V относительно декартовых координат x, y, z некоторой произвольно выбранной эталонной системы координат. Он показывает, как изменяется сам вектор гравитации в каждом из этих направлений вдоль осей.

Точные измерения абсолютных значений составляющих тензора градиента гравитации $G_{ij} = \partial^2 V / \partial x_i \partial x_j$ ($i, j = x, y, z$), проведенные в некоторой локальной системе координат $OXYZ$, очень важны для прогресса в областях геологического прогнозирования, составления карт гравитационного поля Земли, а также для космической, морской и подводной навигации.

Способ абсолютного измерения составляющих тензора градиента гравитации, использующий баланс деформации кручения с известными массами, свисающими на разной высоте с горизонтальной траверсы, подношенной на тонкой нити, был впервые изобретен бароном Роландом фон Этвешем в 1890 г. Градиенты гравитации вызывают появление дифференциальных усилий, воздействующих на массы, что в результате приводит к деформированию крутящего момента на траверсе и в результате к угловому отклонению масс, которое может быть обнаружено с помощью соответствующего датчика. Полученная чувствительность может составить порядка $1E$ ($1E = 1$ этвеш $= 10^{-9} \text{ с}^{-2}$), но для измерения только в одном положении необходимы несколько часов вследствие необходимости перерасчетов составляющих градиента гравитации на основании, по меньшей мере 5 независимых измерений углового отклонения, каждое с другим углом азимута.

Созданные на практике устройства в соответствии с этим основным принципом имеют большие размеры и низкий уровень защиты от шума окружающей среды, таким образом, требуя специально подготовленных условий для измерений, что исключает любую возможность использования этих устройств на подвижном носителе.

Способ измерения абсолютных величин составляющих тензора градиента гравитации, который улучшает вышеописанный метод, был изобретен Форуардом в середине шестидесятых годов [(см. патенты США 3.722.284 (Форуард и др.) и 3.769.840 (Хансен)].

Способ включает установку как балансного генератора, так и датчика смещения на платформе, которая равномерно вращается в горизонтальной плоскости с некоторой частотой Ω относительно оси крутящейся нити. Генератор затем работает в режиме вынужденных колебаний на удвоенной частоте вращения, в то время как многочисленные источники шума и источники помех модулируются с частотой вращения или не модулируются (в частности, шум $1/f$). Амплитуда вынужденного колебания имеет максимальное значение, когда частота вращения удовлетворяет условию резонанса $2\Omega = \omega_0$, где ω_0 - угловая резонансная частота, а добротность генератора Q стремится к бесконечности.

В отличие от метода, где используется вращение, данный метод позволяет быстро определять величины $G_{yy} - G_{xx}$ и G_{xy} путем выделения квадратурных составляющих характеристики, используя синхронное детектирование с эталонным сигналом частоты 2Ω .

Такой же принцип может непосредственно использоваться, как это предлагается Метцгером (см. патент США 3.564.921), если заменить генератор двумя или более отдельными акселерометрами, расположенными соответствующим образом на такой подвижной платформе. Данный принцип не имеет каких-либо новых особенностей по сравнению с известным, за исключением того, что необходимо дополнительное симметрирование выходов пары акселерометров.

Устройства, выполненные в соответствии с этим методом, имели больше недостатков, чем преимуществ, в основном вследствие необходимости сохранения точно равномерного вращения, а также измерения малого смещения относительно вращающейся системы координат. Устройства выходят на максимальную рабочую точность порядка нескольких десятых Этвеш в течение периода измерений, равного одной секунде, и они чрезвычайно чувствительны к вибрационному шуму окружающей среды вследствие своих относительно низких резонансных частот. Возникающие в этом случае технические проблемы настолько трудно разрешить, что конструкции вращающихся градиометров гравитации на сегодняшний день находятся только на стадии прототипов, точность измерений которых значительно ниже, чем предельные теоретические оценки.

В работе А. Николанджа и А. Тарамопулоса (I1 Nuovo Cimento, V. 107B, N 11, страницы 1261-1266, ноябрь 1992) рассматривается теоретическое перемещение струны с фиксированными концами под воздействием плоской монохроматической гравитационной волны, изменяющейся во времени. В соответствии с этим документом струна с фиксированными концами может возбуждаться до состояния резонанса при обеспечении некоторых условий в зависимости от длины и ориентации струны, а также длины волны гравитационной волны. Предлагается возможность использования разложения Фурье для перемещения струны с целью выделения направления и энергии падающей волны. Этот документ намеренно избегает какого-либо обсуждения технического внедрения теории, но он настойчиво предлагает возможность использования струн длиной несколько метров или несколько километров для выявления космологического

излучения или гравитационного излучения от черной дыры или сверхновой звезды, так как длина струны может быть сравнима с длиной волны гравитационных волн. Для того, чтобы теоретический детектор работал, необходимо колебание гравитационного поля в форме гравитационной волны, что невозможно для гравитационных полей, ассоциируемых с массивными телами, такими как Земля.

Известны сверхпроводящие градиометры гравитации (см. патент США N 4.841.772 и Австралийскую патентную заявку 48185/90), использующие пару или более сверхпроводящих акселерометров, удаленных друг от друга на значительное расстояние. Даже после значительного уменьшения коэффициента внутреннего шума и теплового шума окружающей среды, использования стабильных устойчивых сверхтоков для симметрирования выходов акселерометров и наиболее чувствительных датчиков смещения, выполненных на СКВИДах (сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики), эти устройства не могут измерять составляющие тензора градиента гравитации в их абсолютных единицах вследствие невозможности зафиксировать положение контрольной массы акселерометров, на которые не воздействуют какие-либо силы. Поэтому могут измеряться только относительные смещения контрольных масс. Вращающиеся конструкции таких сверхпроводящих градиометров гравитации неизвестны.

В "Patent Abstract of Japan, v.009, N 117 (P-375)" и патенте JP-A-60 050476 описано устройство для измерения ускорения гравитации, в котором груз подвешен на струне. Ток, протекающий через струну, заставляет ее вибрировать в магнитном поле постоянного магнита. Усиленный электрический сигнал, соответствующий этой вибрации, подается обратно на струну и струна начинает вибрировать с заданной частотой в результате самовозбуждения. Ускорение гравитации измеряют, исходя из этой частоты.

Целью настоящего изобретения является создание устройства для измерения гравитационных полей с уменьшенными размерами и улучшенными чувствительностью и невосприимчивостью к шуму по сравнению с известными системами.

Еще одной целью настоящего изобретения является создание неизвестного ранее устройства для измерения абсолютных значений недиагональных составляющих тензора градиента гравитации, в котором эффект вращения заменяется параметрическим взаимодействием между чувствительным элементом и соединениями обратной связи, благодаря чему достигается улучшенная чувствительность и устойчивость к вибрационному шуму.

Еще одной целью настоящего изобретения является простое техническое воплощение вышеописанного устройства, использующее преимущества стандартной технологии сверхпроводимости, которые показали способность достижения максимальной чувствительности для измерений механической деформации, а также сохранения внутреннего шума на минимальном уровне.

Для достижения этих целей настоящее изобретение представляет собой устройство для измерения квазистатических гравитационных полей, содержащее: струну, удерживаемую под натяжением, и установленные на выходе средства для формирования выходного сигнала, который является функцией гравитационного поля, характеризуемое, в отличие от "Patent Abstract of Japan, v.009, N 117 (P-375)" и JP-A-60 050476, следующим: струна фиксируется с обоих концов; устройство содержит средства для обнаружения поперечного смещения струны из состояния покоя вследствие гравитационного поля, воздействующего на струну, и установленные на выходе средства реагируют на обнаруженное смещение для формирования выходного сигнала, который является функцией гравитационного поля.

Понятие "струна" не предполагает какого-либо ограничения с точки зрения материала или конструкции. Используется любой продольный элемент натяжения, который может отклоняться в поперечном направлении под воздействием гравитационного поля и обеспечивать усилия восстановления.

Находящаяся в состоянии покоя растянутая гибкая струна с закрепленными концами образует абсолютно прямую линию в пространстве, проходящую через точки, где фиксируются концы струны. Эта линия может быть определена как одна из осей локальной системы координат, скажем Z, а две другие оси, X и Y, выбираются так, чтобы располагаться в поперечных к струне плоскостях. Любое отклонение струны от этой линии вызывается абсолютными величинами поперечных составляющих усилия на единицу длины, которое прикладывается к каждому единичному отрезку длины струны.

Если рассматривать другой аспект изобретения, то оно представляет собой способ измерения квазистатических гравитационных полей, включающий использование струны, удерживаемой под натяжением; формирование выходного сигнала, причем выходной сигнал является функцией гравитационного поля, характеризуемый следующим: струна имеет закрепленные концы; способ, кроме того, включает обнаружение поперечного смещения струны из состояния покоя вследствие гравитационного поля, воздействующего на струну; и выходной сигнал, который является функцией гравитационного поля, формируется в ответ на обнаруженное смещение.

Отклонение струны из ее состояния покоя может легко обнаруживаться с помощью любого подходящего устройства, чувствительного к смещению.

Желательно, чтобы струна была выполнена из проводящего материала, но наиболее желательным является сверхпроводящий материал. В этом случае, если через струну протекает электрический ток, в поперечной плоскости и вдоль направления струны (формируется распределенное магнитное поле. Если

струна выполнена из материала, имеющего свойств сверхпроводимости, то может пропускаться максимальный ток и может достигаться последующая максимальная чувствительность к отклонению. Постоянный или переменный ток может формироваться в струне посредством включения струны в токопроводящую схему, или напрямую, или через индуктивную связь со схемой (ами) подкачки при условии, что струна образует часть замкнутого проводящего или сверхпроводящего контура. Переменный ток может индуцироваться в струне, например, посредством одной или более предпочтительно продольно расположенных симметричных катушек, которые могут иметь свойства сверхпроводимости. Использование переменного тока имеет преимущества в том смысле, что он позволяет выполнять синхронное детектирование выходного сигнала.

Когда струна переносит ток, поперечное магнитное поле вокруг струны может взаимодействовать с другими проводниками или сверхпроводниками посредством индуктивной связи. Амплитуда тока, индуцируемого в проводнике в непосредственной близости от струны, может напрямую соотноситься с расстоянием струны от проводника. Таким образом, в предпочтительном варианте изобретения одна или несколько фиксированных измерительных катушек размещаются по всей длине струны, чтобы действовать как средство обнаружения смещения, причем ток, индуцируемый в каждой катушке, непосредственно соотносится со смещением струны относительно позиции покоя.

В предпочтительном варианте изобретения средство обнаружения смещения содержит, по меньшей мере два датчика, возможно измерительные катушки, расположенные симметрично в продольном направлении относительно средней точки струны.

В особенно преимущественном варианте изобретения датчики смещения, например измерительные катушки, расположены в непосредственной близости от струны в двух непараллельных предпочтительно перпендикулярных плоскостях с тем, чтобы иметь возможность обнаружения одновременного смещения струны в двух поперечных направлениях одновременно.

Следует понимать, что смещение струны длиной 1 из своего положения покоя, например в y-направлении вышеописанной локальной системы координат, как функция положения по оси z единичного отрезка длины и времени, $y(z,t)$, может быть описано следующим дифференциальным уравнением

$$\eta \frac{\partial^2}{\partial t^2} y(z, t) + h \frac{\partial}{\partial t} y(z, t) - Y A \frac{\Delta l}{l} \frac{\partial^2}{\partial z^2} y(z, t) = -\eta g_y(0, t) - \eta \Gamma_{yz}(0, t) z + \bar{f}_L(z, t) \quad (1)$$

с предельными условиями, соответствующими фиксированным концам струны, т.е. $y(0,t) = y(1,t) = 0$. В этом уравнении η обозначает массу струны на единицу длины, h - коэффициент трения на единицу длины, параметры Y , A и $\Delta l/l$ - модуль Янга струны, площадь поперечное сечения и натяжение струны соответственно. Величины $g_y(0,t)$ и $\Gamma_{yz}(0,t)$ являются абсолютными величинами y-составляющей суммарного ускорения и соответствующей составляющей тензора градиента гравитации вдоль струны, причем обе

измерены в центре выбранной локальной системы координат. Функция $\bar{f}_L(z, t)$ представляет произвольное усилие Ланжевена на единицу длины, воздействующее на струну вследствие ее взаимодействия с термостатом, имеющим абсолютную температуру T , со следующей функцией корреляции

$$(\bar{f}_L(z, t) \bar{f}_L(z', t')) = 4k_B T h \delta(z-z') \delta(t-t'), \quad (2).$$

где $k_B = 1.4 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ – постоянная Больцмана, а $\delta(x-x')$ - дельта-функция.

В этом описании y-направление было выбрано как пример, для того чтобы упростить объяснение принципов настоящего изобретения. Однако вышеописанный и нижеследующий анализ в равной степени применим к любому направлению, поперечному к струне, или любому количеству направлений.

При использовании анализа Фурье для сложной формы струны, вызванной ее взаимодействием с гравитационным полем, функция $y(z,t)$ может быть описана в пределах $z=0$ до $z=1$ бесконечной суммой синусоидальных функций с периодом $2l$ с соответствующими коэффициентами $c_y(n, t)$. Таким образом, решение уравнения (1), которое удовлетворяет приведенным выше предельным условиям, может быть представлено следующей суммой, в которой каждый член в n соответствует одной из собственных вибрационных мод струны:

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_y(n, t) \sin\left[\frac{\pi n}{l} z\right]. \quad (3)$$

При подстановке уравнения (3) в уравнение (1) и при умножении его левой и правой частей на $\sin(\pi n' z/l)$ и затем при интегрировании обеих частей через z от 0 до 1, можно получить дифференциальное уравнение для $C_y(n,t)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} C_y(n,t) + \frac{2}{\tau} \frac{d}{dt} C_y(n,t) + \omega_n^2 C_y(n,t) = \\ = \frac{2}{\pi n} \left[(-1)^n - 1 \right] g_y(0,t) \\ + (-1)^n \frac{2l}{\pi n} \Gamma_{yz}(0,t) \\ + \frac{2}{\eta l} \int_0^l dr \bar{f}_L(z,t) \sin\left[\frac{\pi n}{l} z\right], \quad (4) \end{aligned}$$

где величины

$$\omega_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{\frac{Y}{\rho} \frac{\Delta l}{l}} \quad (5)$$

воспроизводят собственные частоты струны, τ и ρ - время релаксации и объемная плотность струны соответственно.

Когда n принимает четное значение, т.е. для тех членов бесконечной суммы в уравнении (3), которые соответствуют вибрационным модам струны, имеющим узел при $z = 1/2$ (несимметричные моды), член, включающий $g_y(0,t)$ равняется нулю. Таким образом, для n четного C_y зависит только от Γ_{yz} (и теплового шума).

На практике это означает, что амплитуда C_y несимметричных синусоидальных составляющих отклонения струны в y -направлении, $y(z,t)$, зависит только от величины составляющей тензора градиента гравитации Γ_{yz} .

Средняя точка струны $z=1/2$ находится в положении узла во всех несимметричных вибрационных модах струны. Если датчики располагаются симметрично в продольном направлении относительно этой точки, то появляется возможность идентификации смещений струны, соответствующих собственным несимметричным вибрационным модам струны за вычетом смещений, соответствующих симметричным модам, на величину которых оказывает влияние не только составляющая тензора градиента гравитации Γ_{yz} , но также абсолютное ускорение вследствие гравитации в y -направлении, g_y .

Особые преимущества дает размещение датчиков смещения в $z = 1/4$ и $z = 3/4$, позициях, соответствующих пучности первой несимметричной вибрационной моды струны и $n = 2$. В этих точках смещение струны, соответствующее моде $n = 2$, находится на максимуме и таким образом сигнал от датчика также будет на максимуме, давая оптимальную чувствительность.

В соответствии с дальнейшим развитием изобретения в непосредственной близости от струны может располагаться проводник. Проводник может пропускать ток, непосредственно связанный с выходным сигналом устройства обнаружения благодаря использованию цепи положительной обратной связи. Ток может возбуждаться непрерывно или периодически, например, в режиме "Выключено - Включено". В этом случае небольшое смещение струны под воздействием гравитационного поля будет усиливаться магнитным взаимодействием струны и проводника. Иными словами, проводник будет "толкать" (или "тянуть") струну, смещая ее еще больше, непосредственно в ответ на небольшое смещение, вызываемое воздействием гравитационного поля на струну. Это имеет четкие преимущества к том смысле, что смещение струны становится больше благодаря магнитному взаимодействию с проводником и поэтому его легче измерить, что улучшает чувствительность устройства.

В особо преимущественном варианте данной разработки два или более проводника, возможно сверхпроводника, располагаются в продольном направлении симметрично относительно центра струны так, что они усиливают несимметричные моды струны.

В итоге предпочтительный вариант изобретения предлагает новое устройство для одновременных измерений абсолютных величин пары недиагональных составляющих тензора градиента гравитации посредством гибкой сверхпроводящей токопроводящей струны с фиксированными концами, содержащей активные подключения параметрической обратной связи. Струна представляет собой конкретный чувствительный элемент, симметричные собственные поперечные моды в котором вызываются общим ускорением в поперечной плоскости, в то время как несимметричные моды вызываются только абсолютными величинами составляющих градиента гравитации вдоль направления струны.

В этом варианте струна образует низкоиндуктивную часть замкнутой сверхпроводящей цепи, которая индуктивно связана с высокоиндуктивным возбуждающим соленоидом (ами), проводящим переменный эталонный ток от внешнего источника подкачки с некоторой частотой Ω . Струна также индуктивно связана с двумя сверхпроводящими преобразователями магнитного потока, каждый из которых содержит катушку сигнала и две измерительные катушки, причем пары измерительных катушек располагаются в двух

перпендикулярных плоскостях, линия пересечения которых совпадает со струной в состоянии покоя, таким образом образуя два независимых канала измерения. Два плеча каждого сверхпроводящего преобразователя потока балансируются, чтобы выполнять преобразование только несимметричных собственных мод струны в ток сигнала в катушке сигнала для измерения электронными устройствами на СКВИДах (сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики). Выходное напряжение каждого канала, глубоко модулированное с частотой ω , становится затем пропорциональным амплитудам несимметричных собственных мод струны. Это напряжение пропускается через дифференцирующий и суммирующий усилитель и затем используется для нагрузки цепи обратной связи для формирования внутри цепи распределения тока обратной связи в непосредственной близости от струны и параллельно ей. Посредством регулирования тока обратной связи можно соответственно увеличивать и уменьшать эффективное время релаксации и резонансную частоту первой несимметричной собственной моды струны (амплитуда которого зависит только от градиента гравитации вдоль направления струны), в то время как аналогичные параметры для симметричных собственных мод (амплитуда которых зависит от общего ускорения в поперечной к пружине плоскости) остаются неизменными.

На практике схема обратной связи сдвигает броуновский уровень и уровень вибрационного шума значительно ниже чувствительности, необходимой для промышленного применения.

Далее будет описан предпочтительный вариант изобретения только для примера со ссылкой на следующие чертежи, в которых:

Фиг. 1 - общее схематичное представление предпочтительного варианта и

Фиг. 2 - схема устройства в поперечном сечении по вертикали в соответствии с предпочтительным вариантом изобретения.

Одноканальный опытный образец устройства в соответствии с изобретением (см. фиг.2) имеет гибкую струну 1. Струна предпочтительно выполняется из сверхпроводящего материала, например ниобия (Nb). Проволока из ниобия является наилучшим выбором, поскольку она имеет оптимальные характеристики эластичности, которые были проверены на рабочие свойства при 4.2 К. Струна формирует низкоиндуктивную часть L_0 сверхпроводящей замкнутой цепи, которая имеет индуктивную связь с высокоиндуктивным возбуждающим соленоидом (ами) L_d , по которому протекает переменный эталонный ток $I_d(t)$ с внешнего источника подкачки с некоторой частотой ω . Остальная часть цепи закрыта кожухом устройства 2, 2', 3, 4, 5.

В этом варианте струна имеет длину $l = 24$ см, 1 мм в диаметре и фиксируется на концах двумя колпачками 2, 2' из Nb, имеющими цилиндрическую форму, и каждый колпачок - отверстие в центре диаметром 1 мм. Колпачки 2, 2' плотно закрывают концы Nb цилиндра, содержащего три части 3, 4, 5, соединенные вместе двумя Nb цилиндрическими кольцами 6, 6', имеющими тонкую резьбу. Части 3 и 5 также имеют резьбу для того, чтобы обеспечивать механическое соединение других элементов конструкции. Натяжение струны формируется двумя Nb гайками 7, 7', имеющими тонкую резьбу 1 мм.

Конструкция в целом образует закрытый сверхпроводящий цилиндрический резонатор с аксиально расположенной струной. Внутри этого объема имеются три зоны 10, 11, 12 с как можно более полной электромагнитной изоляцией относительно друг друга вставками 9 из Nb. В двух из них 10, 12 размещаются возбуждающие тороидальные соленоиды L_{d1} и L_{d2} , намотанные Nb проволокой диаметром 0,01 мм и подключенные последовательно, формируя таким образом большую общую индуктивность M_d между $L_d = L_{d1} + L_{d2}$ и индуктивность цилиндрического резонатора L_0 , которая составляет порядка 10^{-7} Гн (генри) для выбранных размеров. Соотношение M_d/L_0 составляет порядка $5 \cdot 10^2$, так что если переменный ток подкачки I_d (+) в возбуждающих соленоидах имеет амплитуду порядка 100 мА, то индуцируемый переменный сверхток I_0 , проходящий через струну, имеет максимальный размах амплитуды 50 А. В этом случае соответствующая круговая составляющая магнитной индукции B на поверхности струны составляет почти 200 Гс, что приблизительно в четыре раза меньше, чем первое критическое поле ниобия B_{c1} .

Две измерительные катушки прямоугольного типа L_{p1} и L_{p2} сверхпроводящего преобразователя потока и активная схема обратной связи устанавливаются вместе на титановой трубе 8, расположенной внутри центральной части конструкции, показанной на фиг. 2. Титан выбран потому, что его коэффициент теплового расширения согласуется с аналогичным параметром ниобия. Активная схема обратной связи содержит два плеча из изолированной медной проволоки диаметром 0,5 мм, натянутой параллельно струне и проводящей ток обратной связи $I_y = I_{y1} + I_{y2}$.

Эта конструкция имеет особые преимущества, например, замкнутая сверхпроводящая конфигурация обеспечивает оптимальное экранирование от изменяющихся внешних электромагнитных полей. Кроме того, цилиндрически симметричная конфигурация имеет малый радиальный размер, который составляет не более 3,8 см в диаметре, включая все составные части опытного образца. Таким образом, можно использовать стандартный промышленный сосуд жидкого гелия на 100 литров, имеющий входное отверстие около 4 см в диаметре для охлаждения конструкции с помощью стандартного зонда. Специальные гелиевые криостаты, которые использовались для известных устройств, исключают возможность удаления устройства из внутреннего объема криостата, например, если что-то случается, для перерегулировки устройства в полевых условиях. Удаление устройства из криостата требует длительного периода времени, порядка, например,

нескольких часов для того, чтобы внутреннее содержимое криостата прогрелось до атмосферной температуры, в противном случае под влиянием резкого теплового расширения может произойти взрыв. Это - один из основных недостатков известных конструкций. Однако небольшое входное отверстие стандартных промышленных сосудов на 100 литров жидкого гелия предотвращает возможность такого взрыва, а это означает, что устройство, соответствующее настоящему изобретению, можно достать из сосуда и отрегулировать в полевых условиях.

Струна отклоняется неоднородным квазистатическим гравитационным полем и взаимодействует с переменным током обратной связи, распределяемым в непосредственной близости от струны и практически параллельно ей. Распределение является оптимальным, когда ток обратной связи инжектируется в точку или снимается с точки в схеме обратной связи, противоположной средней точке струны (см. фиг. 1). В выбранной локальной системе координат эта точка составляет $z = 1/2$. Другим требованием, удовлетворяющим оптимальные рабочие характеристики, является то, что два плеча схемы обратной связи практически равны и заземлены на концах. В этом случае между током обратной связи и замкнутым сверхпроводящим контуром, в котором находится струна, не образуется электромагнитной связи.

Ток $I_0(t)$, протекающий через струну и взаимодействующий с распределенным током обратной связи $I_y(z,t)$, вызывает появление следующей поперечной составляющей усилия на единицу длины $f_y(z,t)$, воздействующего на струну

$$f_y(z,t) = \pm \frac{\mu_0}{2\pi d} I_0 I_y(z,t) \sin(\Omega t), \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ – магнитная проницаемость в вакууме, d – расстояние между центром струны в состоянии покоя и центром проволоки, проводящей ток обратной связи, а фаза источника 15 тока подкачки выбирается равной нулю. Знак "+" или "-" определяется выходным буферным каскадом дифференцирующего и суммирующего усилителя 16, показанного на фиг. 1. Поперечное перемещение отрезка: единицы длины струны в плоскости OYZ в том случае описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\eta \frac{\partial^2}{\partial t^2} y(z, t) + h \frac{\partial}{\partial t} y(z, t) - Y_{Nb} A \frac{\Delta l}{l} \frac{\partial^2}{\partial z^2} y(z, t) = -\eta g_y(0, t) - \eta \Gamma_{yz}(0, t) z \pm \frac{\mu_0}{2\pi d} I_o I_y(t) \sin(\Omega t) + \bar{f}_L(z, t), \quad (7)$$

которое будет соответствовать уравнению (1) с добавлением члена уравнения (6). Как следствие уравнение (7) также имеет решение формы уравнения (3). Таким образом, выполняя такую же алгебраическую манипуляцию, как для уравнения (1), для этого варианта может быть получено дифференциальное уравнение для $C_y(n, t)$. Это уравнение (8), которое соответствует уравнению (4), но с добавлением члена обратной связи.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} C_y(n, t) + \frac{2}{\tau} \frac{d}{dt} C_y(n, t) + \omega_n^2 C_y(n, t) = \frac{2}{\pi n} [(-1)^n - 1] g_y(0, t) + (-1)^n \frac{2l}{\pi n} \Gamma_{yz}(0, t) \pm \frac{1}{\eta} \frac{\mu_0}{2\pi^2 d} e I_o I_y(z, t) \sin(\Omega t) + \frac{2}{\eta l} \int_0^l dz \bar{f}_L(z, t) \sin\left(\frac{\pi n}{l} z\right). \quad (8)$$

Величина ϵ_n соотносится с характеристиками системы преобразователя цепи обратной связи; чем больше длина плеч схемы обратной связи, тем больше величины ϵ_n . Если плечи схемы обратной связи абсолютно одинаковы, то величины ϵ_n равны нулю для всех нечетных $n = 1, 3, 5, \dots$. Их особые значения для размеров, показанных на фиг. 2, определяются

$$\epsilon_n = \frac{1}{n} \left[\cos\left(\frac{\pi n}{6}\right) + \cos\left(\frac{5\pi n}{6}\right) - 2\cos\left(\frac{\pi n}{2}\right) \right] \quad (9)$$

Таким образом, для правильно отрегулированной схемы обратной связи только несимметричные собственные моды струны взаимодействуют с током обратной связи. Однако, как видно из уравнений (4) и (7), только несимметричные собственные моды струны оказываются чувствительными к абсолютной величине измеряемой составляющей тензора градиента гравитации.

Сверхпроводящие измерительные катушки в непосредственной близости от L_{p1} и L_{p2} размещаются в непосредственной близости от струны и при условии отличной балансировки выводят два плеча сверхпроводящего преобразователя магнитного потока на режим преобразования только несимметричных собственных мод в ток сигнала I_i , который обнаруживается электронными датчиками 13 на СКВИДах (см. фиг. 1). Используются именно СКВИДы 13 (сверхпроводящие квантовые интеграционные устройства), т. к. они на сегодняшний день являются наиболее чувствительными из имеющихся датчиков магнитного потока и переменного тока. В образце, показанном на фиг. 2, измерительные катушки выполнены в форме двух отдельных контуров прямоугольного типа из N_b проволоки, размещенных симметрично относительно средней точки струны и подключенных параллельно катушке сигнала L_i . При идеальной симметрии и абсолютно одинаковых площадях контуров симметричные собственные моды не формируют какой-либо ток сигнала I_i или ток обратной связи I_y . Такой же эффект может быть получен для несколько неидентичных измерительных катушек с необходимой точностью, если использовать дополнительную индуктивность (и) L_b , подключенную параллельно и/или последовательно с одной или обеими измерительными катушками. Индуктивность (и) L_b может подстраиваться для обеспечения симметрии двух плеч сверхпроводящего преобразователя потока. Остаточный ток "нулевой моды" в катушке сигнала L_i , соответствующий состоянию покоя струны может компенсироваться непосредственно внутри СКВИДа за счет дополнительной связи (не показанной) на источник тока подкачки. Если режимы симметрии удовлетворяются, то выходное напряжение электронной схемы 13 СКВИДа определяется

$$V_y(t) = KI_0 L_a \sin(\Omega t) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n c_y(n, t) \right] + K\bar{\Phi}_N(t), \quad (10)$$

где K - передаточная функция общий поток/напряжение, а L_s – индуктивность СКВИДа. Величины β_n зависят от физической конструкции и местоположения измерительных катушек и равны нулю, если $n = 1, 3, 5$. Функция $\Phi_N(t)$ является эквивалентным шуму хаотическим магнитным потоком внутри контура СКВИД, спектральная плотность которого $Sf(\omega)$ определяет внутренний предел прибора с точки зрения точности измерений. Ток обратной связи $I_y(t)$ формируется из выходного напряжения $V_y(t)$ путем пропускания его через дифференцирующий и суммирующий усилитель, который нагружается сопротивлением R_y . В этом случае ток обратной связи $I_y(t)$ может быть представлен следующим

$$I_y(t) = \frac{p\tau}{R_y} \frac{d}{dt} V_y(t) + \frac{q}{R_y} V_y(t), \quad (11)$$

где p , q , и τ^* являются постоянными параметрами, которые зависят от конструкции дифференцирующего и суммирующего усилителя 16.

Следует отметить, что между двумя плечами схемы обратной связи всегда существует определенное рассогласование. Конструкция, показанная на фиг.2, использует два одинаковых сопротивления обратной связи R_{y1} и R_{y2} , по одному, для каждого плеча. В этом случае рассогласование может легко компенсироваться путем подстройки одного из сопротивлений, скажем R_{y2} для получения оптимального режима. Уравнения (7) и (11) воспроизводят замкнутую бесконечную группу дифференциальных уравнений параметрического типа. Тщательный анализ показал, что члены, содержащие величины $C_y(n, t)$ с $n > 2$ в правой части уравнения (11), можно не принимать во внимание. Причина этого состоит в том, что именно одна мода может делаться "мягкой", т.е. наиболее чувствительной к градиенту гравитации, а именно $C_y(2, t)$. В случае, если собственные частоты струны имеют достаточно высокие значения и разделяются отдельными октавными промежутками, то необходимы только коррекции второго порядка, которые легко учитывать наряду с анализом других приборных погрешностей. Затем, как следует из уравнения (7), уравнение для чувствительной моды градиента гравитации $n = 2$, включая неизбежные источники шума основной гармонике, можно в свою очередь записать в форме

$$\begin{aligned} & \frac{d^2}{dt^2} c_y(2, t) + \left[\frac{2}{\tau} - \frac{1}{2}\alpha + \frac{1}{2}\alpha \cos(2\Omega t) \right] \frac{d}{dt} c_y(2, t) + \\ & + \left[\omega_2^2 - \frac{1}{2}\omega_2^2 + \frac{1}{2}\omega_2^2 \cos(2\Omega t) - \frac{1}{2}\alpha \Omega \sin(2\Omega t) \right] c_y(2, t) = \\ & = \frac{1}{\pi} \Gamma_{yz}(0, t) + \frac{2}{\eta l} \int_0^l dz \bar{f}_L(z, t) \sin\left[\frac{2\pi}{l} \cdot z\right] + \\ & + \left[\text{шум обратного действия} \right] \sin(\Omega t), \quad (12) \end{aligned}$$

где

$$\bar{\omega}^2 = \left| \epsilon_2 \beta_2 q K \right| \frac{1}{\eta} \frac{\mu_0 I_0^2 L_s}{2\pi^2 d R_y} \alpha = \bar{\omega}^2 \left| \frac{p}{q} \right| \tau. \quad (13)$$

и предполагается, что для тока обратной связи был выбран реальный знак.

Если удовлетворяются некоторые легко выполняемые условия, которыми являются

$$\frac{1}{l} \frac{d\Gamma}{dt} \ll \sqrt{\omega_2^2 - \frac{1}{2}\omega_2^2} 8\Omega \gg \omega_2^2 \frac{2}{\Omega \tau} \ll 1 \quad (14)$$

тогда можно показать, что постоянное выходное напряжение составляет,

$$V_y(t) = \beta_2 K I_0 L_p \left[\frac{1}{\pi} \frac{\Gamma_{yz}(0, t)}{\omega_2^2 - \frac{1}{2}\omega_2^2} + \text{шум Броуна} \right] \times \sin(\Omega t) + K\bar{\Phi}_N(t), \quad (15)$$

где под "шумом Броуна" понимается комбинация теплового шума и шума обратного действия.

Интересно оценить предельную точность измерения этого варианта изобретения, которая может быть представлена величиной минимального обнаруживаемого градиента гравитации

$$\Gamma_{min} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{16k_B T}{m\tau_{eff}} + \frac{\omega^4 E_F(\omega)}{2\beta_2^2 L_s I_0^2}} 10^9 \frac{\mathcal{E}_{ТВЕШ}}{\sqrt{\Gamma_{II}}}, \quad (16)$$

где $\tau_{eff} = \tau/(1-\alpha\tau/4)$ есть эффективное время релаксации, m - суммарная масса струны, $E_F(\Omega)$ - энергетическая разрешающая способность СКВИДа. Используя следующие рабочие параметры: $l = 0.24$ м, $m = 1.6 \cdot 10^{-3}$ кг, $\tau_{eff} = 10^{-4}$ с, $\beta_2 = 4 \cdot 10^3$ м⁻¹, $L_s = 5 \cdot 10^{-11}$ Гн, $I_0 = 50$ А, $(\omega_2^2 \omega^2/2)/2\pi = 2$ Гц, $\omega/2\pi = 40$ Гц, $\Omega/2\pi \geq 2 \cdot 10^2$ Гц, $E_F(\Omega) = 2 \cdot 10^{-31}$ Дж/Гц (СКВИД, смещаемый в режиме постоянного тока) можно получить из уравнения (16)

$$\Gamma_{min} = 0,4 \frac{\mathcal{E}_{ТВЕШ}}{\sqrt{\Gamma_{II}}}. \quad (17)$$

Можно показать, что диапазоны параметров $\tau, \omega_2, \omega, \alpha$ и Ω имеют место, когда характеристика струны, описываемая уравнением (12), является стабильной. Например, для квазистатических градиентов гравитации и достаточно высокой частоты подкачки Ω можно игнорировать колеблющиеся члены, содержащие $\cos(2\Omega t)$ и $\sin(2\Omega t)$ в правой части уравнения (12).

Имеется целый ряд методик обнаружения, которые могут быть использованы настоящим изобретением на этой стадии и которые зависят от первоначальных механических параметров струны, а также области применения, для которой предназначено устройство. Предпочтительно использовать струну с высокой механической жесткостью и малым временем релаксации для того, чтобы увеличить невосприимчивость к вибрационному шуму, являющемуся основным источником шума в условиях промышленного использования устройства, в частности в мобильной градиометрии гравитации. С другой стороны, чем жестче струна, тем сильнее усилие обратной связи, которое должно быть приложено к струне для смягчения моды сигнала и тем больше шум обратного действия, ассоциируемый с током сигнала.

Кроме того, чем короче время релаксации струны, тем сильнее влияние тепловых колебаний струны на точность измерений, поскольку масса на единицу из длины струны будет, как правило, довольно малой.

Для решения обеих из вышеназванных проблем наилучший способ разрешения проблем измерения градиента гравитации в соответствии с другим вариантом настоящего изобретения использует переменную обратную связь в режиме "Выключено - Включено". В этом случае усилие переменной обратной связи первоначально не прикладывается к струне на период "Выключено", во время которого струна достигает термодинамического равновесия. Усилие обратной связи затем быстро активизируется на период "Включено", во время которого эффективная собственная частота

$$\omega_{eff} = \sqrt{\omega_2^2 - \frac{1-\alpha}{2}\omega^2} \quad (18)$$

и эффективное время релаксации

$$\tau_{eff} = \tau \left(1 - \frac{\alpha\tau}{4}\right)^{-1} \quad (19)$$

становятся существенно меньше и длительнее соответственно по сравнению с соответствующими исходными параметрами струны. Обратная связь подстраивается таким образом, что эффективное время релаксации становится значительно более длительным, чем период "Включено". Измерения выполняются только в период "Включено", в который струна достигает термодинамического равновесия. Например, теорема флуктуационного рассеяния неприменима к струне в течение периода измерений и ее отклик на все внешние источники шума изменяется (см. В.Б. Брагинский и А. Б. Манукин. – Измерение слабых усилий в физических экспериментах, издано Д.Х. Дугласом, Университетская Пресса Чикаго, 1977).

Можно показать, что в этом случае наименьший градиент гравитации, обнаруживаемый данным вариантом изобретения, может быть представлен

$$\Gamma_{min} = \frac{\pi}{I} \sqrt{Y(\delta) \left[\frac{16kT}{m\tau_m} + \frac{\omega^4 E_\Phi(\Omega)}{2\beta_2^2 L_s I_0^2 \tau_{eff}} \log \left(\frac{1}{\delta} \right) \right]} 10^9 \text{ Этвеш}, \quad (20)$$

где

$$Y(\delta) = \frac{4\tau_m}{\tau_{eff}^2} \log \left(\frac{1}{\delta} \right) + \frac{\omega_{eff}^4}{\omega_2^4} \left[\frac{1}{\delta} + \log \left(\frac{1}{\delta} \right) \right], \quad (21)$$

τ_m - время измерений (период "Включено"), m - общая масса струны, $E_\Phi(\Omega)$ - разрешающая способность энергии СКВИДа на частоте Ω , а δ - статистическая погрешность первого типа. Величина δ - это вероятность того, что эквивалентный шум градиента гравитации будет превышать величину, представленную левой частью уравнения (20) для периода измерений.

При использовании следующих рабочих параметров: $l = 0.24$ м, $m = 1.6 \cdot 10^{-3}$ кг, $\tau = 0.5$ с, $\tau_m = 1$ с, $\tau_{eff} = 10^4$ с, $\beta_2 = 4 \cdot 10^3$ м⁻¹, $L_s = 5 \cdot 10^{-11}$ Гн, $I_0 = 50$ А $\omega_{eff}/2\pi = 3$ Гц, $\omega_2/2\pi = 80$ Гц, $\Omega/2\pi \geq 10^4$ Гц, $E_\Phi(\Omega) = 5 \cdot 10^{-32}$ Дж/Гц (500 А СКВИД, смещаемый в режиме постоянного тока) можно получить из уравнения (20)

$$\Gamma_{min} = 0,02 \text{ Этвеш.}$$

В обоих вышеописанных вариантах полезный сигнал получается из выходного напряжения синхронным детектированием с эталонным сигналом, снимаемым с источника 15 подкачки, и изобретение позволяет выполнять калибровку полезного сигнала к абсолютным единицам градиента гравитации без вращения, как предлагалось для известных вращающихся градиометров гравитации. Что касается вращающихся конструкций, то изобретение позволяет выполнять перемещение спектра шума в частотный диапазон, в котором вклад i/t является достаточно малым. Собственные вибрации струны, которые имеют место во время измерений (период "Включено"), не создают проблем поскольку они могут отфильтровываться из полезного сигнала при условии, что период "Включено" выбирается значительно длиннее, чем период $(2\pi/\omega_{eff})$ таких вибраций.

Невосприимчивость к вибрационному шуму может улучшаться на коэффициент $(\omega_{eff}/\omega_1)^2$ который может быть установлен на малой величине порядка 10^{-2} .

Необходимо учитывать индуктивную перекрестную связь между токами обратной связи и каждой парой измерительных катушек, а также перекрестную связь между самими измерительными катушками, обе из которых действуют как цепи отрицательной обратной связи. С одной стороны, это приводит к отсутствию

необходимости перенормировки амплитуд выходных сигналов до тех пор, пока усиление электронных схем на СКВИДах не превышает некоторую критическую величину. С другой стороны, в случае измерений по двум каналам выходной сигнал по каждому каналу содержит линейную комбинацию каждой измеряемой составляющей градиента гравитации. Можно показать, что каждая такая составляющая может, тем не менее, измеряться отдельно и одновременно, если используется соответствующая система опроса данных. Этого можно легко избежать путем обеспечения дополнительной положительной обратной связи для противодействия этой отрицательной обратной связи, например, путем подключения через слабую индуктивную связь каждого тока обратной связи с каждым СКВИДом.

На практике устройство в соответствии с изобретением может использоваться для определения абсолютных значений недиагональных составляющих градиента гравитации. Просмотрев гравитацию по всей площади, можно обнаружить небольшие изменения абсолютного значения градиента гравитации. Такие небольшие изменения могут быть показателем изменений местных геологических особенностей, например наличия минералов, газа или нефти.

Повторные показания через некоторое время в одной местности могли бы указывать на изменения геологического состояния района, например, подъем магмы. Совершенно очевидно, что изобретение улучшает прогнозирование и другие направления сбора данных, где необходимы точные измерения гравитационных полей. Использование абсолютных величин улучшает информацию, которая может быть получена по данным измерений. Градиометр в соответствии с изобретением может использоваться в подвижном состоянии, что позволяет устанавливать его на движущихся средствах, земных, морских или воздушных. Например, устройство может подвешиваться на вертолете и использоваться во время пересечения вертолетом выбранного участка.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для измерения квазистатических гравитационных полей, содержащее струну, удерживаемую под натяжением, и выходные средства для формирования выходного сигнала, который является функцией гравитационного поля, **отличающееся тем, что** струна зафиксирована с обоих концов, устройство содержит средства для обнаружения поперечного смещения струны из состояния покоя вследствие гравитационного поля, воздействующего на струну, и выходные средства реагируют на обнаруженное смещение для формирования выходного сигнала, который является функцией гравитационного поля.

2. Устройство по п.1, **отличающееся тем, что** средства для обнаружения поперечного смещения струны содержат по меньшей мере два датчика, расположенных симметрично относительно средней точки струны в продольном направлении.

3. Устройство по п.1 или 2, **отличающееся тем, что** струна выполнена из проводящего материала и пропускает ток I_0 .

4. Устройство по п.3, **отличающееся тем, что** оно содержит также проводящие средства, располагающиеся в непосредственной близости от струны и проводящие ток I_y , причем величина тока I_y является функцией выходного сигнала средств для обнаружения поперечного смещения струны, а магнитные поля, возбуждаемые током I_y через проводящие средства и током I_0 через струну, взаимодействуют, создавая усилие обратной связи, действующее на струну, для увеличения поперечного смещения струны из состояния покоя в ответ на гравитационное поле, воздействующее на струну.

5. Устройство по п.4, **отличающееся тем, что** проводящие средства содержат по меньшей мере два проводника, расположенных симметрично относительно средней точки струны в продольном направлении, причем каждый проводник пропускает практически равную часть тока I_y .

6. Устройство по п.4 или 5, **отличающееся тем, что** ток I_y через проводящие средства пропускается периодически.

7. Устройство по любому из пп.3 - 6, **отличающееся тем, что** средства для обнаружения поперечного смещения струны содержат по меньшей мере одну измерительную катушку, в которой ток I_p наводится током I_0 через струну, причем ток I_p является функцией смещения струны.

8. Устройство по любому из пп.3 - 7, **отличающееся тем, что** ток I_0 через струну является переменным током.

9. Устройство по любому из пп.3 - 8, **отличающееся тем, что** ток I_0 индуцируется в струне индуктивными средствами.

10. Устройство по п.9, **отличающееся тем, что** индуктивные средства содержат два соленоида, расположенных симметрично относительно средней точки струны в продольном направлении.

11. Устройство по любому из пп.3 - 10, **отличающееся тем, что** струна выполнена из сверхпроводящего материала.

12. Устройство по любому из предшествующих пунктов, **отличающееся тем, что** средства для обнаружения поперечного смещения струны содержат средства для обнаружения поперечного смещения струны в двух непараллельных плоскостях.

13. Устройство для измерения недиагональных составляющих тензора градиента гравитации, содержащее устройство по п.1 и средства для приложения усилия на единицу длины струны так, что отклонение струны вызывается абсолютными величинами поперечных к струне составляющих усилия, причем отклонение струны является комбинацией собственных мод струны и четные моды вызываются только абсолютными величинами составляющих градиента гравитации в направлении струны, в то время как нечетные моды вызываются суммарным ускорением в поперечной к струне плоскости.

14. Способ измерения квазистатических гравитационных полей, включающий удержание струны под напряжением и формирование выходного сигнала, который является функцией гравитационного поля, **отличающийся тем, что** обнаруживают поперечное смещение струны из состояния покоя вследствие гравитационного поля, воздействующего на струну, причем струна закреплена на своих концах, и в ответ на обнаруженное смещение формируют выходной сигнал, который является функцией гравитационного поля.

15. Способ по п.14, **отличающийся тем, что** выходной сигнал формируют посредством измерения пространственного положения по меньшей мере одной точки на струне относительно положения этой точки в состоянии покоя.

16. Способ по п.5, **отличающийся тем, что** пространственные положения четного количества точек на струне измеряют относительно их положений в состоянии покоя, а точки выбирают вдоль струны попарно симметрично относительно средней точки струны в продольном направлении.

17. Способ по п.16, **отличающийся тем, что** указанные точки соответствуют положениям пучностей несимметричных собственных мод струны.

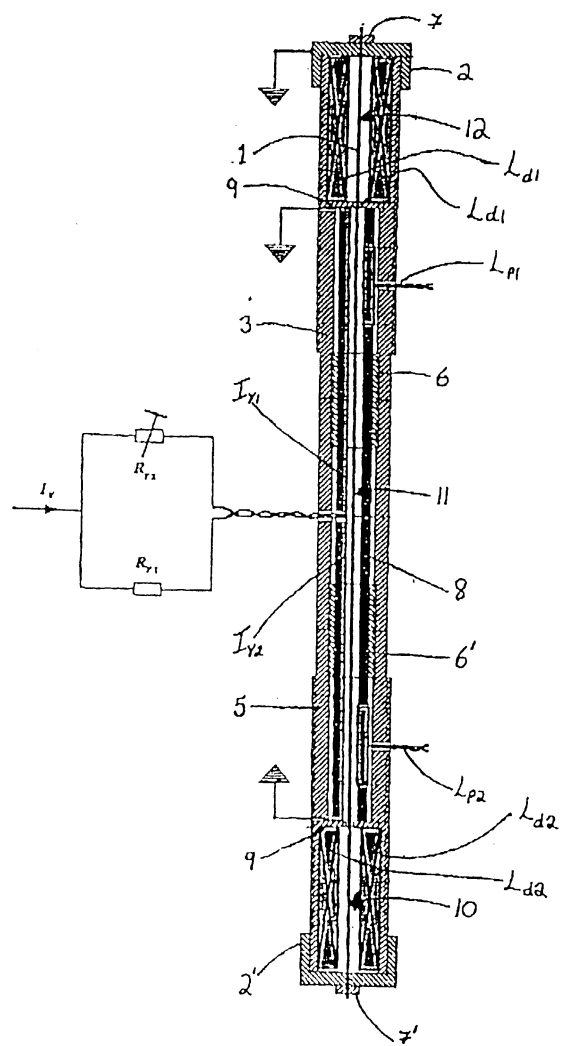
18. Способ по любому из пп.14 - 17, **отличающийся тем, что** смещение струны увеличивают посредством приложения усилия обратной связи к струне, причем это усилие является функцией гравитационного поля, воздействующего на струну.

19. Способ по п.18, **отличающийся тем, что** усилие обратной связи находится в прямой зависимости от выходного сигнала.

20. Способ по п.19, **отличающийся тем, что** усилие обратной связи прикладывают к струне так, чтобы усиливать составляющие пространственной конфигурации струны, соответствующие собственным несимметричным модам струны, по отношению к составляющим пространственной конфигурации, соответствующим собственным симметричным модам.

21. Способ по любому из пп.14 - 19, **отличающийся тем, что** смещение измеряется в двух непараллельных плоскостях.

22. Способ измерения абсолютных величин недиагональных составляющих тензора градиента гравитации посредством устройства по п.1, **отличающийся тем, что** отклонение струны из ее состояния покоя вызывается абсолютными величинами поперечных к струне составляющих усилия на единицу длины, прикладываемого к каждой единице длины струны, так, что отклонение представляет собой комбинацию собственных мод струны, причем четные моды вызываются только абсолютными величинами составляющих градиента гравитации в направлении струны, в то время как нечетные моды вызываются суммарным ускорением в поперечной к струне плоскости.



Фиг. 2