

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **035215**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.05.18

(21) Номер заявки
201891561

(22) Дата подачи заявки
2017.01.25

(51) Int. Cl. **G01P 15/14** (2013.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01H 17/00 (2006.01)
G01V 8/02 (2006.01)

(54) ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С УМЕНЬШЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

(31) **15/007,752**

(32) **2016.01.27**

(33) **US**

(43) **2018.12.28**

(86) **PCT/US2017/014929**

(87) **WO 2017/132252 2017.08.03**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БЕЙКЕР ХЬЮЗ, Э ДЖИИ
КОМПАНИ, ЛЛК (US)**

(72) Изобретатель:
**Адамс Роберт В., Эдвардс Карл М.,
Чутак Себастьян, Вельман Феликс,
Фанини Отто (US)**

(74) Представитель:
**Веселицкий М.Б., Веселицкая И.А.,
Кузенкова Н.В., Каксис Р.А., Белоусов
Ю.В., Куликов А.В., Кузнецова Е.В.,
Кузнецова Т.В., Соколов Р.А. (RU)**

(56) **US-A1-2006-0192974
US-A1-2009-0109445
US-A1-2015-0115145
JP-A-2015-143686
US-A1-2013-0327146**

(57) Устройство для измерения ускорения содержит опорный объемный резонатор, имеющий первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность; измеряющий объемный резонатор, имеющий неподвижную отражающую поверхность и не неподвижную отражающую поверхность, причем не неподвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; источник оптического излучения для освещения опорных и измеряющих объемных резонаторов; контроллер для изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды объемных резонаторов; фотодатчик для обнаружения света, излучаемого опорными и измеряющими объемными резонаторами; датчик интерферометра для измерения с помощью обнаруженного света, для каждого изменения длины волны света и/или показателя преломления опорного смещения опорного объемного резонатора и измерительного смещения измеряющего объемного резонатора; и процессор для расчета ускорения с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.

035215 B1

035215 B1

Существует множество вариантов применения для акселерометров, используемых под поверхностью земли. В одном варианте применения акселерометры прикреплены к колонне бурильных труб, имеющей буровое долото для бурения ствола скважины вглубь земли. Акселерометры могут измерять вибрации, которые могут привести к повреждению оборудования или замедлить скорость проходки при бурении и, таким образом, служить для регулирования параметров бурения для снижения вибраций.

В другом подповерхностном варианте применения акселерометр с повышенной чувствительностью может использоваться в качестве гравиметра для измерения силы гравитационного притяжения и, следовательно, гравитационного ускорения. Путем измерения гравитационного ускорения ниже поверхности земли могут быть обнаружены различные свойства пластового резервуара для целей управления пластовым резервуаром.

Одной из проблем, с которыми сталкиваются приборы, расположенные глубоко внутри земли, является высокая температура, которая может достигать или превышать 200°C. Высокая температура может привести к сбою в работе акселерометра или к неточным измерениям. Следовательно, усовершенствования акселерометров для подповерхностных вариантов применения были бы хорошо восприняты в буровой отрасли и отрасли добычи углеводородов.

Раскрыто устройство для измерения ускорения. Устройство содержит опорный объемный резонатор, имеющий оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность, и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; измеряющий объемный резонатор, имеющий оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $D_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности; причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии на нее силы ускорения; источник оптического излучения, выполненный с возможностью освещать опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор; контроллер, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды; фотодатчик, выполненный с возможностью обнаружения света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором; датчик интерферометра, выполненный с возможностью измерения с использованием света, обнаруживаемого посредством фотодатчика, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; и процессор, выполненный с возможностью вычисления ускорения с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.

Также раскрыто скважинное устройство для измерения ускорения. Скважинное устройство содержит носитель, выполненный с возможностью перемещения через ствол скважины, проникающий вглубь земли; контрольный объем, расположенный на носителе; опорный объемный резонатор, расположенный в контрольном объеме, а также имеющий оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; измеряющий объемный резонатор, расположенный в контрольном объеме, а также имеющий оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $D_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности; причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; лазерный источник оптического излучения, выполненный с возможностью освещать опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор; фотодатчик, выполненный с возможностью обнаружения света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором; газовый элемент, выполненный с возможностью обеспечения источника лазерного излучения опорной длиной волны света; опорный генератор тактовых импульсов, выполненный с возможностью вывода основного сигнала времени; синхронный контроллер, выполненный с возможностью: а) изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды и б) синхронизации с основным сигналом времени; множество опорных датчиков, выполненных с возможностью определения свойств контрольного объема; калибратор, выполненный с возможностью подачи сигнала возбуждения известной величины на измеряющий объемный резонатор, который приводит к изменению $d_{\text{ИЗМЕР}}$ для обеспечения калибровочного ответного сигнала; датчик интерферометра, выполненный с возможностью измерения с использованием света, обнаруживаемого посредством фотодатчика, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптического носителя: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; синхронный процессор, выполненный с возможностью: а) синхронизации с основным сигналом времени, б) вычисления ускорения с использованием каждого из первых смещений и вторых

смещений, свойств, обнаруженных опорными датчиками, и калибровочного ответного сигнала; память, выполненную с возможностью хранения вычисленного ускорения; и устройство связи, выполненное с возможностью передачи вычисленного ускорения, сохраненного в памяти, вверх по стволу скважины по направлению к поверхности земли.

Далее раскрыт способ измерения ускорения. Способ включает использование опорного объемного резонатора, имеющего оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; использование измеряющего объемного резонатора, имеющего оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности, причем неподвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; освещение опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора источником оптического излучения, который выполнен с возможностью излучения света на одной или более длинах волн; изменение длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды с помощью контроллера; обнаружение света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором с использованием фотодатчика; измерение с помощью датчика интерферометра с использованием света, обнаруженного фотодатчиком, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; и вычисление процессором ускорения с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.

Краткое описание графических материалов

Следующие описания не должны рассматриваться как каким-либо образом ограничивающие. Со ссылкой на прилагаемые графические материалы аналогичные элементы пронумерованы аналогичным образом:

на фиг. 1 проиллюстрирован вид в поперечном сечении варианта реализации скважинного спускаемого на тросе инструмента, размещенного в стволе скважины, проникающем в глубь земли;

на фиг. 2 проиллюстрированы аспекты передачи света через интерферометр Фабри-Перо;

на фиг. 3 проиллюстрированы аспекты множества уникальных линий передачи объемного резонатора для обеспечения чувствительного ответного сигнала во всей области дисперсии объемного резонатора.

на фиг. 4А и 4В, совместно именуемых фиг. 4, проиллюстрированы аспекты системы интерферометрического акселерометра, имеющей измеряющий объемный резонатор и опорный объемный резонатор.

на фиг. 5А и 5В, совместно именуемых фиг. 5, проиллюстрированы аспекты различных конфигураций измеряющих и опорных объемных резонаторов в контрольном объеме;

на фиг. 6А и 6В, совместно именуемых фиг. 6, проиллюстрированы аспекты монолитного многоволнового лазера и пример длины волны лазера в зависимости от рабочей температуры и электрического тока;

на фиг. 7 проиллюстрированы аспекты спектра усиления с использованием множества лазерных источников по сравнению с опорной линией из газового элемента;

на фиг. 8А-8С, совместно именуемых фиг. 8, проиллюстрированы аспекты длины волны полупроводникового лазера в зависимости от рабочей температуры и электрического тока и аспекты калибровки полупроводникового лазера;

на фиг. 9 проиллюстрированы аспекты оптического отклика объемного резонатора на различные эффективные длины волн;

на фиг. 10А-10D, совместно именуемых фиг. 10, проиллюстрированы аспекты относительного знака фазы по причине изменения размера объемного резонатора из-за колебаний измеряемого свойства;

на фиг. 11 проиллюстрирована блок-схема, изображающая аспекты работы системы интерферометрического акселерометра;

на фиг. 12 проиллюстрирована блок-схема для получения и обработки данных для интерферометрического акселерометра.

Подробное описание сущности изобретения

Подробное описание одного или более вариантов реализации раскрытого устройства и способа, представленных в настоящем документе, в качестве примера, а не ограничения со ссылкой на фигуры.

Раскрыты устройство и способ измерения ускорения, включая гравитационное ускорение. В частности, устройство и способ могут быть использованы для измерения ускорения в земном стволе скважины (то есть в глубине скважины). Устройство и способ компенсируют влияние внешних условий и, таким образом, могут использоваться в высокотемпературных внутрискважинных средах с повышенной точностью по сравнению с предшествующим уровнем техники.

На фиг. 1 проиллюстрирован вид в поперечном сечении приведенного в качестве примера варианта реализации скважинного инструмента 10, расположенного в стволе скважины 2, проникающем вглубь земли 3, которая может включать земной пласт 4. Пласт 4 представляет собой любой представляющий интерес подповерхностный материал, который может быть обнаружен инструментом 10. Термин "подповерхностный материал" может использоваться для обозначения любого материала под поверхностью земли 3, такого как пласт 4, пластовый флюид или твердый материал и материал ствола скважины в качестве неограничивающих примеров. Скважинный инструмент 10 транспортируют через ствол скважины 2 с помощью несущего устройства 5. В варианте реализации изобретения по фиг. 1 несущее устройство 5 представляет собой армированную каротажную проволоку 6. Помимо поддержки скважинного инструмента 10 каротажная проволока 6 может обеспечивать связь (т. е. телеметрию) между скважинным инструментом 10 и компьютерной системой 9 обработки данных, расположенной на поверхности земли 3. Связь может включать отправку данных измерений вверх по стволу скважины в компьютерную систему 9 обработки данных или команд вглубь ствола скважины к скважинному инструменту 10. Термин "вверх по стволу скважины" относится к более близкому к поверхности местоположению по стволу скважины. Для того чтобы управлять скважинным инструментом 10, обрабатывать данные измерения и/или обеспечивать интерфейс связи с компьютерной системой 9 обработки данных, скважинный инструмент 10 содержит скважинное электронное оборудование 8. Функциональные и обрабатывающие функции по настоящему раскрытию могут выполняться посредством скважинного электронного оборудования 8, компьютерной системы 9 обработки данных или их комбинации. В альтернативном варианте реализации изобретения, именуемом как каротаж в процессе бурения (КПБ) или измерение в процессе бурения (ИПБ), несущее устройство 5 может быть бурильной колонной или бурильным трубчатым элементом. В каротажной проволоке, КПБ, или вариантах реализации ИПБ, данные измерений могут быть загружены в режиме реального времени или после того, как скважинный инструмент 10 извлекают из ствола скважины 2. Неограничивающие варианты реализации телеметрии для вариантов реализации КПБ или ИПБ включают гидроимпульсную скважинную и проводную бурильную трубу. Скважинный инструмент 10 может работать непрерывно по всему диапазон глубин или на отдельных выбранных глубинах в стволе скважины 2.

В варианте реализации изобретения, проиллюстрированном на фиг. 1, скважинный инструмент 10 содержит скважинную систему 7 интерферометрического акселерометра, которая также может упоминаться как акселерометр 7. Акселерометр 7 выполнен с возможностью измерения ускорения с учетом гравитационной силы, из которой можно получить гравитационное ускорение.

Основной целью любого относящегося к гравитации измерительного устройства является точное измерение гравитационного ускорения. Изменения ускорения можно измерить как смещение пружинно-массовой системы. Способ, выбранный для измерения небольших перемещений, состоит в том, чтобы сконструировать интерферометр Фабри-Перо, в котором одно зеркало зафиксировано, а другое зеркало прикреплено к пружинно-массовой системе. Таким образом, расстояние между зеркалами восприимчиво к ускорению, и интенсивность как отраженного, так и прошедшего света является периодической функцией расстояния между зеркалами. Интерферометры Фабри-Перо выполнены с возможностью выполнять чрезвычайно точные измерения ширины интерферометра Фабри-Перо, например "объемного резонатора". Однако динамический диапазон измерения ограничен отношением области дисперсии (ОД), деленной на добротность объемного резонатора, как проиллюстрировано на фиг. 2. ОД является мерой периодичности функции интенсивности, и воспринимающий отклик происходит около этих пиков. Добротность объемного резонатора представляет собой отношение между ОД и полной шириной на половине максимума резонансных пиков.

Передача света через объемный резонатор является функцией добротности объемного резонатора F , длины волны света λ , зависящего от давления показателя преломления объемного резонатора $n(p, T)$, зависящей от температуры длины объемного резонатора $d(T)$ и угла распространения света через объемный резонатор θ , определяемый формулой

$$I(\lambda, d) \approx \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n(p, T) \cdot d(T) \cdot \cos \theta \right)} \quad (1a)$$

Уравнение (1a) можно упростить путем объединения показателя преломления, угла падения и длины волны в единственный член - эффективную длину волны.

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda}{n \cos \theta} \quad (1b)$$

Динамический диапазон может быть сделан непрерывным через множество этих функций интенсивности с достаточной единственностью, чтобы перекрыть всю ОД воспринимающим откликом, см. фиг. 3. На фиг. 3 проиллюстрированы аспекты множества однозначно определенных линий передачи для объемного резонатора для обеспечения воспринимающего отклика по всей ОД объемного резонатора. Как раскрыто в настоящем документе, данное множество создается источником длины волны сканирования достаточной $\Delta\lambda$, или путем изменения показателя преломления (n) объемного резонатора с достаточ-

ным Δn для покрытия ОД объемного резонатора. Однозначно определенные функции интенсивности создаются путем изменения параметров уравнения 1. Длина объемного резонатора представляет собой подлежащий измерению параметр - оставление длины волны, показателя преломления или угла распространения в качестве переменных параметров для создания набора однозначно определенных профилей интенсивности, которые покрывают ОД объемного резонатора.

Устройство и способ, раскрытые в настоящем документе, снижают или сводят к минимуму воздействие внешней среды на измерение длины объемного резонатора путем изменения параметров функции интенсивности. Параметры одновременно изменяются в измеряющем объемном резонаторе и неподвижном опорном объемном резонаторе, будучи размещенными в пределах одной и той же среды. Путем оценки отклика этих двух объемных резонаторов можно нормализовать (например, вычесть) воздействие окружающей среды на измеряющий объемный резонатор, увеличив общую точность измерения.

В одном или более вариантах реализации устройства и способа, раскрытых в настоящем документе, используется подход с двойным объемным резонатором, как проиллюстрировано на фиг. 4. Система датчиков 40 содержит неподвижный опорный объемный резонатор 41 и измеряющий объемный резонатор 42, в которых одна зеркальная плоскость измеряющего объемного резонатора представляет собой пружинно-массовую систему. Как неподвижный опорный объемный резонатор 41, так и измеряющий объемный резонатор 42 расположены в контрольном объеме 50. Контрольный объем 50 выполнен с возможностью поддерживать одну и ту же среду одновременно в неподвижном опорном объемном резонаторе 41 и измеряющем объемном резонаторе 42. Не проиллюстрированы компоненты в контрольном объеме 50, такие как изоляция, которая может использоваться для поддержания одной и той же среды одновременно в обоих объемных резонаторах. Опорный объемный резонатор 41 содержит первую неподвижную отражающую поверхность 43 и вторую неподвижную отражающую поверхность 44, причем расстояние между этими двумя отражающими поверхностями ($d_{\text{ОТРАЖ}}$) фиксировано при воздействии силы ускорения. Неподвижные отражающие поверхности 43 и 44 выполнены с возможностью быть зафиксированными по отношению к корпусу 49 опорного резонатора. В отличие от опорного объемного резонатора 41 измеряющий объемный резонатор 42 содержит неподвижную отражающую поверхность 45 и подвижную отражающую поверхность 46. Для зеркальных плоскостей интерферометра Фабри-Перо требуется отражающий материал, который частично передает и отражает поступающее излучение. Важно, чтобы поглощение и рассеяние света были как можно более низкими. Отражающие покрытия, в зависимости от длины волны света, обычно представляют собой многослойные диэлектрические системы, которые состоят из чередующихся слоев по меньшей мере из двух разных оптических материалов. Данные материалы имеют разные показатели преломления. Эти системы хорошо понятны и позволяют хорошо регулировать отражательную способность и свойства передачи зеркальных плоскостей. Отражающие поверхности могут быть изготовлены из материала с незначительным термическим расширением, такого как церодур, Corning ULE glass 7972 или плавленый кварц. Все материалы должны иметь полностью или частично отражающее поверхностное покрытие на представляющей интерес длине волны. Подвижная отражающая поверхность 46 соединена с пружинным устройством 47, которое проявляет пружинные свойства, в том числе характеризуется пружинной постоянной. Пружинное устройство 47, в свою очередь, соединено с корпусом 48 измеряющего объемного резонатора. Подвижная отражающая поверхность 46 и пружинное устройство 47 составляют пружинно-массовую систему, в которой подвижная отражающая поверхность 46 может быть смещена относительно корпуса 48 измеряющего объемного резонатора и неподвижной отражающей поверхности 45 при воздействии силы ускорения. При воздействии силы ускорения или ускорения расстояние между неподвижной отражающей поверхностью 45 и подвижной отражающей поверхностью 46 ($d_{\text{ИЗМЕР}}$) может изменяться в зависимости от величины силы ускорения. Фотодатчики или фотодетекторы (не показаны) обнаруживают изменения интенсивности луча света, распространяющегося через измеряющий и опорный объемные резонаторы, измеряя отраженный/и передаваемый свет, пропорциональный функции передачи объемных резонаторов. Каждый луч следует анализировать с точки зрения его оптической мощности после его прохождения через зеркальные плоскости. Для анализа луча необходимы измерительные фотодатчики, такие как фотодиоды, чувствительные в представляющей интерес области длины волны.

Объемные резонаторы размещены в одном и том же контрольном объеме с одинаковой температурой, давлением и показателем преломления оптической среды 51 объемного резонатора. Необходимой оптической средой является материал, который пропускает свет через объемный резонатор и не сильно ослабляет свет посредством поглощения или рассеяния. Примером газа или жидкости может быть воздух или некоторые углеводороды. Неограничивающим вариантом реализации оптической среды 51 объемного резонатора является оптически прозрачное минеральное топливо. Объемные резонаторы перепроверяются одновременно источником 52 длины волны, причем источник длины волны относится к газовому элементу 53, которая действует как блокирующее устройство с чрезвычайно низкой восприимчивостью к воздействию окружающей среды. Интенсивность каждого объемного резонатора измеряется одновременно при одновременном изменении длины волны источника с использованием контроллера 54 подстройки длины волны (фиг. 4А) или показателя преломления контрольного объема с использованием контроллера 55 показателя преломления (фиг. 4В). Затем длина измеряющего и опорного объемных ре-

зонаторов вычисляется на основании отклика интенсивности. Опорные и измеряющие объемные резонаторы могут быть интегрированы в параллельный оптический путь, как проиллюстрировано на фиг. 5А, или последовательный оптический путь, как проиллюстрировано на фиг. 5В. Может быть понятно, что в настоящем документе может использоваться множество типов интерферометра вместо подробно описанного в настоящем документе вида интерферометра Фабри-Перо.

В том, что ускорение является второй производной смещения во времени, а сила ускорения пропорциональна массе, умноженной на ускорение, изменение длины измеряющего объемного резонатора может быть использовано для расчета ускорения и силы ускорения или гравитационной силы. В одном или более вариантах реализации изобретения отношение длин объемных резонаторов используется для оценки изменения длины измеряющего объемного резонатора, вызванного ускорением и другими эффектами, по отношению к ускоряемой массе в датчике и пружине. В одном или более вариантах реализации изобретения измеряющие и опорные объемные резонаторы изготовлены из одних и тех же материалов и размещены в одном и том же контрольном объеме и таким образом сводят к минимуму воздействие окружающей среды на смещение. Это приводит к более точным выходным данным.

Чтобы получить воспринимающий отклик по всему динамическому диапазону измеряющего объемного резонатора, зазор между ОД обратного импульса одного луча должен быть заполнен обратным импульсом, или откликом, с линейной частотной модуляцией из множества однозначно определенных откликов интенсивности (см. уравнение 1, фиг. 2 и 3).

В одном или более вариантах реализации изобретения множество откликов интенсивности создается путем изменения длины волны источника или показателя преломления контрольного объема контролируемым образом. Далее следуют способы изменения этих параметров.

В первом способе независимые лазерные линии избирательно включаются и выключаются. В этом способе монолитно-интегрированный многоволновый полупроводниковый лазер, такой как проиллюстрированный на фиг. 6А, имеющий множество S-изогнутых волноводов, используется в качестве источника с переменной длиной волны. Выходная длина волны выбирается путем модуляции отдельных волноводов путем эффективного выбора длин волн "на лету". Каждый из выходов этого многоволнового лазера может быть связан с газовыми элементами или с фиксированными опорными резонансами для управления выходной стабильностью всего модуля.

Во втором способе генерируется непрерывный спектр длин волн из одного лазерного источника. В этом способе выходной сигнал длины волны лазерного источника с широким спектром амплитудно-частотной характеристики откалиброван до изменений тока возбуждения и рабочей температуры. На фиг. 6В представлен один пример длины волны полупроводникового лазера в зависимости от рабочей температуры и электрического тока (I_j). Длина волны может изменяться путем регулирования тока, проходящего через устройство, или изменения его рабочей температуры. Калибровки на испытательном стенде в сочетании с наименьшими квадратами, соответствующими параметрам регулирования температуры и тока, ведут к контролируемой и хорошо известной длине волны выходного сигнала лазерного излучения. Затем параметры регулирования калибровки используются для оценки длины волны света во время процесса измерения.

В третьем способе непрерывный спектр длин волн $\Delta\lambda$ из одного лазерного источника генерируется с использованием способа относительной калибровки и одной или более опорных точек фиксированной длины волны. Во время калибровки лазер фиксируют на опорной точке λ_0 фиксированной длины волны, например линии поглощения в газовом элементе, и его рабочие параметры записывают. Затем измеряют выходную длину волны при регулировании путем изменения рабочей температуры и тока возбуждения лазера, сохраняя при этом фиксированную выходную длину волны. Таблица калибровки выходной длины волны создается путем разложения калибровочного измерения в единицах разложения в ряд Тейлора вокруг точки фиксированной длины волны, $\lambda_0(I, T)$, где I представляет собой ток возбуждения, а T представляет собой температуру. Единицы в разложении в ряд Тейлора оцениваются с помощью соответствия наименьших квадратов параметрам возбуждения. Они показаны как частные производные в уравнении. Газовый элемент содержит по меньшей мере одно вещество, которое обеспечивает достаточные опорные линии поглощения. Могут быть добавлены другие вещества, то есть газы, для увеличения количества линий поглощения в широком спектре длин волн.

Во время работы датчика лазер фиксируют на точке фиксированной длины волны и измеряют его параметры возбуждения, $I_0(t)$ и $T_0(t)$. Параметры возбуждения могут быть медленно изменяющейся функцией времени из-за изменения свойств в результате старения или других эффектов. Затем лазер расфиксируют, после чего изменяют параметры возбуждения, а длину волны света оценивают по разложению в ряд Тейлора.

$$\lambda = \lambda_0 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial I} \right)_{\lambda_0} \Delta I + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \right)_{\lambda_0} \Delta T; \quad (2)$$

$$\Delta I = I - I_0(t); \Delta T = T - T_0(t).$$

В настоящем документе длину волны раскладывают только до первого порядка, но специалисты в данной области техники поймут, что разложение может содержать члены более высоких порядков. Этот

способ учитывает неопределенный параметр смещения переменной. Данный способ проиллюстрирован на фиг. 8А.

В другом варианте реализации изобретения используются две опорные величины фиксированной длины волны, $\lambda_{0,1}$ и $\lambda_{0,2}$. Лазер сначала фиксируют на опорной величине фиксированной длины волны $\lambda_{0,1}$, затем настраивают посредством рабочей температуры и/или тока возбуждения на вторую опорную величину фиксированной длины волны, $\lambda_{0,2}$. Около обоих этих точек параметры возбуждения изменяются, сохраняя фиксированную длину волны. Эти точки данных используются для создания таблицы калибровки с использованием разложения в ряд Тейлора около центра данных.

$$(\hat{I}_0, \hat{I}_0) = (\langle I \rangle, \langle \dot{I} \rangle), \quad (3)$$

где "крышечка" представляет собой данные калибровки, а среднее значение принимается по всему множеству. Во время работы датчика лазер фиксируется как на точках фиксированных длин волн, так и на своих измеряемых параметрах возбуждения, $(I_{0,1}(t), T_{0,1}(t))$ и $(I_{0,2}(t), T_{0,2}(t))$ аналогично первому варианту реализации изобретения, описанному, начиная с параграфа. Эти точки используются для корректировки точки, в отношении которой использовалось разложение в ряд Тейлора, при условии, что коэффициенты фиксированы, а коэффициенты отношения

$$\left| \frac{\hat{I}_{2,0} - \hat{I}_{1,0}}{I_{2,0}(t) - I_{1,0}(t)} \right|, \left| \frac{\hat{I}_{2,0} - \hat{I}_{1,0}}{T_{2,0}(t) - T_{1,0}(t)} \right| \quad (4)$$

используются для масштабирования коэффициентов разложения в ряд Тейлора (см. фиг. 8В).

В другом варианте реализации изобретения лазер фиксируется на трех или более опорных точках фиксированных длин волны, $\lambda_{0,N}$. Во время калибровки аналогично первому и второму вариантам реализации изобретения параметры настройки изменяются с сохранением фиксированной длины волны в каждой опорной точке. Это улучшает точность и динамический диапазон согласованного разложения в ряд Тейлора (см. фиг. 8С).

Во время работы датчика отдельные измерения на каждой из фиксированных длин волн производятся периодически, а линейные члены в разложении Тейлора рассчитываются "на лету". Отношение линейных членов, оцениваемых во время калибровки, к линейным членам, оцениваемым во время работы датчика, используется для корректировки более высоких порядковых членов, если таковые имеются, в разложении в ряд Тейлора.

В четвертом способе для увеличения $\Delta\lambda$, динамического диапазона источника длины волны, используются два или более лазерных источника. Этот способ изменения длины волны аналогичен второму/третьему способу с добавлением более одного перекрывающегося лазерного источника спектра усиления. Спектры усиления каждого лазера будут перекрываться по опорным точкам фиксированной длины волны. Это позволяет, например, использовать лазеры с гораздо более точной шириной линии, одновременно с покрытием большого $\Delta\lambda$. На фиг. 7 проиллюстрированы спектры усиления множества лазерных источников по сравнению со значением фиксированной длины волны λ_0 . Спектры усиления лазерных источников покрываются по значению фиксированной длины волны. Такая конфигурация обеспечивает ответные сигналы/настраиваемость обоих лазерных источников, исходя из одного и того же значения фиксированной длины волны, с большим агрегированным диапазоном настраиваемости длины волны, чем в случае одного лазерного источника.

Далее обсуждаются способы изменения показателя преломления оптической среды объемного резонатора в контрольном объеме. В первом способе показатель преломления оптической среды объемного резонатора в контрольном объеме изменяется путем изменения давления в контрольном объеме. В одном или более вариантах реализации изобретения начальное давление устанавливается пневматически, с разложением, контролируемым изменением длины поршня в камере или изменением регулируемого давления с фиксированного отверстия. Во втором способе, который аналогичен первому способу, показатель преломления вместо этого изменяется путем наложения электрического поля по всей оптической среде объемного резонатора, то есть за счет эффекта Поккельса или Керра. Подходящие материалы могут быть выбраны так, что заметное изменение показателя преломления достигается путем изменения наложенного электрического поля.

Далее обсуждается обработка данных измерений, полученных из интерферометрического акселерометра. Целью измерения является вычисление d_s , нормализованной по воздействию окружающей среды длины измеряющего объемного резонатора в зависимости от ускорения (g). На отклик измеряющего объемного резонатора влияют условия окружающей среды, в частности, температура и ее влияние на термическое расширение объема, окружающего объемный резонатор. Данные одновременно отбираются из измеряющих и опорных объемных резонаторов при одновременном изменении длины волны источника и/или показатель преломления контрольного объема. Обработка данных измерений одинакова для разложения длины волны λ и/или для разложения показателя преломления n .

В настоящий момент обсуждаются способы с использованием метода инверсии интенсивности. В первом способе множества ответных сигналов $S_R = (S_{R1}, \dots, S_{RJ})^T$, $S_S = (S_{S1}, \dots, S_{SJ})^T$, и для опорных и измеряющих объемных резонаторов, плюс $S_M = (S_{M1}, \dots, S_{MD})^T$ для фотодатчика (например, диода), который контролирует

интенсивность сигнала входного лазерного луча, получают при изменении входной длины волны света по ряду длин волн, $\lambda_{\text{eff}} = (\lambda_{\text{eff},1}, \dots, \lambda_{\text{eff},j})^T$, падающих на опорные и измеряющие объемные резонаторы. В настоящем документе сигналы представлены в виде векторов столбцов. Кроме того, векторы упорядочены так, что $\lambda_{\text{eff},j} < \lambda_{\text{eff},j+1}$ для всех j . Это упорядочение элементов λ_{eff} происходит от малого до большого и упрощает анализ, описанный ниже.

Источник переменной длины волны имеет некоторую интенсивность $I_0(\lambda_{\text{eff}})$, которая может быть функцией длины волны, причем доля света распространяется в опорный объемный резонатор, $f_R I_0$, измеряющий объемный резонатор, $f_S I_0$, и контрольный диод, $f_M I_0$, так что $f_R + f_S + f_M = 1$. Интенсивность также может зависеть от времени. Например, фиксирование лазерных диодов на линии поглощения требует преобразования тока, что одновременно преобразовывает как длину волны, так и интенсивность. Кроме того, лазерные диоды также имеют источник шумового тока, обычно называемый шумом относительной интенсивности, или ШОИ (RIN). Как следует из его названия, он производит изменения интенсивности на выходе лазерного излучения. Сигналы быстро поступают одновременно или последовательно (т.е. быстро по сравнению с откликом объемных резонаторов на внешние раздражители), и их получают через фотодатчики/фотодиоды/электронное оборудование, со следующими функциями передачи:

$$S_{Rj}(\lambda_{\text{eff},j}, d_R) = \frac{f_R \cdot G_R \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_R \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_R(T)\right)} \quad (5)$$

$$S_{Sj}(\lambda_{\text{eff},j}, d_S) = \frac{f_S \cdot G_S \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_S \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_S(T)\right)} \quad (6)$$

где G_i представляет собой коэффициент электронного усиления сигнальной цепи для соответствующих сигналов, F_R и F_S представляют собой коэффициенты добротности для опорных и измеряющих объемных резонаторов. Вышеприведенные уравнения неявно предполагают, что разность эффективных длин волн обусловлена либо изменением входной длины волны лазера, либо изменением показателя преломления. Изменения угла падения требуют различных коэффициентов электронного усиления и разных коэффициентов добротности в случае каждой эффективной длины волны. Этот тип датчика был раскрыт в другой заявке. Также предполагают, что эффективные длины волн равны между опорными, измеряющими и контрольными каналами. Однако этого не должно быть. Достаточно, чтобы между эффективными длинами волн между измеряющими, опорными и контрольными каналами существовало взаимно однозначное соответствие. Например, свет может попадать в измеряющий объемный резонатор под несколько иным углом, чем в опорный объемный резонатор, и, следовательно, эффективные длины волн будут несколько отличаться. Однако, поскольку углы фиксированы, поддерживается взаимно однозначное соответствие. Без потери универсальности специалисты в данной области техники знают, что эффективную длину волны можно также настроить путем изменения угла распространения через объемный резонатор показателя преломления или длины волны. Если опорные и измеряющие объемные резонаторы размещены в одном и том же контрольном объеме, то их температуры внешней среды, давления и показатели преломления будут равными, т.е. $n_R(P) = n_S(P) = n(P)$. Все зависимости параметров в следующих уравнениях трактуются как неявные.

Нормализация (1) и (2) с помощью отклика (3) контрольного сигнала дает в случае любой длины волны во множестве с показателем j следующее уравнение:

$$S'_{R,j}(\lambda_{\text{eff},j}, d_R) = \frac{S_R(\lambda_{\text{eff},j}, d_R)}{S_M(\lambda_{\text{eff},j})} = \frac{\frac{f_R \cdot G_R \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_R \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_R\right)}}{\frac{f_M \cdot G_M \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_M \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_R\right)}} = \frac{A_R}{1 + F_R \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_R\right)} \quad (7)$$

Аналогично в случае данных измеряющего канала

$$S'_{S,j}(\lambda_{\text{eff},j}, d_S) = \frac{S_S(\lambda_{\text{eff},j}, d_S)}{S_M(\lambda_{\text{eff},j})} = \frac{\frac{f_S \cdot G_S \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_S \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_S\right)}}{\frac{f_M \cdot G_M \cdot I_0(\lambda_{\text{eff},j})}{1 + F_M \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_S\right)}} = \frac{A_S}{1 + F_S \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff},j}} d_S\right)} \quad (8)$$

Коэффициенты пропорциональности A_R и A_S зависят от аппаратных настроек и, как таковые, могут быть вычислены с помощью методов калибровки. Например, максимум нормализованного ответного сигнала от опорного объемного резонатора дает следующее:

$$\max(S'_{k,j}(\lambda_{\text{eff},j}, d_k)) = \frac{A_k}{1 + F_k \sin^2(0)} = A_k, \quad (9)$$

где $k \in \{R, S\}$. Затем фактор добротности опорного объемного резонатора можно вычислить с помощью этого откалиброванного коэффициента пропорциональности и минимума нормализованного ответного сигнала

$$\min(S'_{k,j}(\lambda_{\text{eff},j}, d_k)) = \frac{A_k}{1 + F_k \sin^2(\pi/2)} = \frac{A_k}{1 + F_k}. \quad (10)$$

Также ясно, что A_k и F_k являются коэффициентами, не зависящими от эффективной длины волны. Поскольку множества сигналов $S'_{k,j}$ являются искаженными, A_k и F_k могут оцениваться методом наименьших квадратов.

Пример оптического отклика объемного резонатора на различные эффективные длины волн проиллюстрирован на фиг. 9. В этом примере коэффициент добротности F равен 5, а коэффициент усиления A равен 10, и можно наблюдать оптические отклики вблизи длины объемного резонатора около 50 мкм. Максимальное и минимальное значения откликов составляют 10 и 1,67 соответственно. Можно заметить, что пиковые отклики не равномерно распределены по длине объемного резонатора. Это связано с тем, что длины волн не соответствуют друг другу. Эффективные длины волн и соответствующие сигналы, используемые в примере, показаны в столбцах 1 и 2 табл. 1 для длины объемного резонатора 50 мкм. Данные примера в табл. 1 относятся к откликам, показанным на фиг. 9.

Таблица 1

λ_{eff} (мкм)	S'	фаза (ϕ)	p	q
1,525	1,743	1,339	66	1
1,535	5,032	0,460	65	0
1,545	2,569	0,864	65	1
1,555	2,272	0,970	64	0
1,565	6,674	0,321	64	1

Оптическая фаза может быть оценена по сигналу, коэффициентам пропорциональности и коэффициенту добротности

$$\phi_{R,j} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{A_R}{S_{R,j}} - 1} \right) \cdot \frac{1}{F_R} \quad (11)$$

$$\phi_{S,j} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{A_S}{S_{S,j}} - 1} \right) \cdot \frac{1}{F_S} \quad (12)$$

Затем нормализованные сигналы от опорных и измеряющих объемных резонаторов могут быть решены для оценки длины объемного резонатора, $\tilde{c}$:

$$\tilde{c}_{R,j} = \frac{1}{2} \left[p_{R,j} \pi + (-1)^{q_{R,j}} \phi_{R,j} \right] \quad (13)$$

$$\tilde{c}_{S,j} = \frac{1}{2\pi} \left[p_{S,j} \pi + (-1)^{q_{S,j}} \phi_{S,j} \right]$$

где $p_{R,j}$ и $p_{S,j}$ представляют собой целые порядки периодических функций передачи в случае опорных и измеряющих объемных резонаторов при показателе длины волны источника j . Константы $q_{R,j}$ и $q_{S,j}$ равны либо 0, либо 1 и определяют знак оптической фазы объемного резонатора. Таким образом, каждый из измеряющего и опорного канала дает оценку размера измеряющего объемного резонатора и опорного объемного резонатора соответственно. Таким образом, уравнение 6 решается самосогласованно для значений $p_{k,j}$ и $q_{k,j}$ для всех j . Одним из способов самосогласования измерений является минимизация дисперсии элементов $\tilde{c}_k$ по отношению к p_k и q_k ,

$$\text{Var}(\tilde{c}_k, \tilde{c}_{k-1}, \dots, \tilde{c}_{k-J+1}, \tilde{c}_{k+1}, \dots, \tilde{c}_{k+J}) \quad (14)$$

при условии ограничения

$$p_{k,1} \geq p_{k,2} \geq \dots \geq p_{k,J-1} \geq p_{k,J}.$$

Кроме того, дисперсию следует рассчитывать с использованием соответствующей весовой функции, поскольку точность значительно варьируется по ее диапазону $\pm\pi$. Одним из таких весовых коэффициентов может быть $1/\sigma_{\phi_{k,j}}^2$, где $\sigma_{\phi_{k,j}}$ является погрешностью в оценке фазы канала, оцененной на основании погрешности в S'_k .

Это ограничение возникает из-за того, что периодичность функций отклика, $S'_{k,j}$, представляет собой $A_{\text{eff},j}/2$. Таким образом, при заданной длине объемного резонатора, в функциях отклика для меньших длин волн имеется больше периодов, и поскольку элементы λ_{eff} были упорядочены от малого до большего, мы приходим к вышеуказанному ограничению. Кроме того, поскольку имеется процентное отклонение $\lambda_{\text{eff},j}$ от его среднего значения, ожидают, что диапазон будет также небольшим.

$$P + \Delta P \geq p_{k,j} \geq P \quad \forall j;$$

$$0 \leq \Delta P \leq \tilde{c}$$

Если возвратиться к примеру, проиллюстрированному на фиг. 9 и показанному в табл. 1, оптическая фаза может быть вычислена по сигналам и значениям A_k и F_k с помощью уравнения (11) и табл. 1.

Когда длина объемного резонатора вычисляется путем минимизации $Var(\tilde{c}_k)$, значения p_k и q_k находятся и показаны в таблице. Последующая оценка $\langle \tilde{c}_k \rangle$ является однозначно определенной, так как сигналы не соответствуют друг другу. Можно заметить, что p_k удовлетворяет уравнению (15) и что $\Delta P = 2$ удовлетворяет уравнению (16).

Кроме того, в случае, когда размер объемного резонатора изменяется из-за изменений подлежащего измерению свойства, то "относительный" знак фазы может быть определен путем построения графика $S'_k(\lambda_{eff,j}, d_k)$ по сравнению с $S'_k(\lambda_{eff,i}, d_k)$. В случае, когда наклон является положительным, то $(-1)^{q_{k,j}} = (-1)^{q_{k,i}}$. В случае, когда наклон является отрицательным, то $(-1)^{q_{k,j}} = -(-1)^{q_{k,i}}$. Пример этого свойства проиллюстрирован на фиг. 10.

В настоящем документе каждый из сигналов изображен по сравнению с сигналом для второй эффективной длины волны. В настоящем документе наклон является отрицательным для эффективных длин волн 1, 3 и 5, но положителен для длины волны 4. Таким образом,

$$\mathbf{q}_k = \{0, 1, 0, 1, 0\} \text{ или } \mathbf{q}_k = \{1, 0, 1, 0, 1\}.$$

В настоящем примере правильным выбором является последний, а не предыдущий. Это случай, представленный в конкретных примерах, кратко приведенных в крайнем правом столбце в табл.1, помеченном q. В случае гравиметра размер объемного резонатора восприимчив к сейсмическим колебаниям окружающей среды, и именно эти колебания обеспечивают оценку "относительного" знака фаз канала.

$Var(\tilde{c}_k)$ является нелинейным в p_k и q_k , и поэтому линейные способы наименьших квадратов, такие как разложение по сингулярным значениям, не будут работать при интерпретации данных из-за нелинейного характера необработанных данных этого интерферометра. Для измеряющего объемного резонатора элементы q_k являются, по существу, случайными значениями, и преобразование проблемы минимизации в линейный вид будет неэффективным. Неограничивающие примеры способов, которые могут быть использованы для решения проблемы интерпретации существенно нелинейных необработанных данных интерферометра, включают способы интерпретации глобальной оптимизации, такие как способ симуляции восстановления, генетические алгоритмы и нейронные сети. Могут использоваться и другие способы. Прямую модель, описывающую характеристики контрольно-измерительных приборов интерферометра с неизвестными функциональными параметрами, необходимо определить в известной среде калибровки. Как только параметры прямой модели будут откалиброваны, гравиметр контрольно-измерительных приборов интерферометра готов выполнять измерения в неизвестной среде. Из-за характеристик контрольно-измерительных приборов интерферометра для определения параметров калибровки интерферометра для нелинейных необработанных данных, полученных в известной среде калибровки, определяющей глобальный минимум для каждого определенного параметра, требуются методы глобальной оптимизации нелинейности. Как только прямая модель контрольно-измерительных приборов определена с помощью откалиброванной параметризации, как описано выше, можно использовать один или более методов глобальной оптимизации для интерпретации результатов измерений нелинейных необработанных данных интерферометра, выполненных в неизвестной полевой среде, предназначенной для исследования. В качестве альтернативного варианта, глобальная оптимизация может быть заменена двухэтапным решением гибридной оптимизации. Начальный этап глобальной оптимизации идентифицирует локальную область, в которой расположен глобальный минимум, а на втором этапе оптимизации локальное минимальное решение может быть расположено с использованием стандартного метода оптимизации, такого как алгоритм Левенберга-Марквардта (LMA), также известный как способ постепенно уменьшающихся наименьших квадратов (DLS), применяемый для определения локального минимума в этой локальной области. LMA может найти локальное минимальное решение в локальном регионе, определенное с помощью глобальной оптимизации как содержащее требуемый глобальный минимум.

В случае опорного объемного резонатора не ожидают, что изменения размера будут больше, чем любой элемент в $\lambda_{eff}/2$. Таким образом, после того, как начальное решение найдено с использованием данных калибровки, могут измениться только некоторые из элементов в p_R и q_R , и это начальное решение может быть использовано в качестве отправной точки оценок в режиме реального времени с использованием одного из алгоритмов решения.

Самосогласованные оценки $\langle \tilde{c}_s \rangle$ и $\langle \tilde{c}_k \rangle$ теперь определены как наилучшие оценки длин объемных резонаторов. В настоящий момент обсуждается использование этих оценок для минимизации влияния колебаний температуры, а также других факторов окружающей среды. Для простоты изложения самосогласованные оценки представлены уравнением

$$\tilde{c}_s = \sqrt{\tilde{c}_s^2}, \quad \tilde{c}_k = \sqrt{\tilde{c}_k^2}. \quad (17)$$

В следующем примере обсуждается конкретная реализация датчика в качестве гравиметра или акселерометра. Однако способы, описанные ниже, могут быть применены к измерению какого-либо конкретного свойства, пока эффект свойства преобразован в изменение длины объемного резонатора.

Зависимые от температуры величины расстояния в объемном резонаторе зависят от коэффициента термического расширения (СТЕ) материалов, используемых для создания объемных резонаторов

$$d_R(T) = d_{0R}(1 + CTE_R \cdot \Delta T) \quad (18)$$

$$d_S(T) = d_{0S}(1 + CTE_S \cdot \Delta T) + \frac{g}{\omega_0^2} (1 + CTE_S' \cdot \Delta T) \quad (19)$$

где ω_0^2 представляет собой резонансную угловую частоту пружинно-массовой системы в измеряющем объемном резонаторе;

CTE_S' представляет собой температурную зависимость воспринимающей пружины, включая температурную зависимость модуля Юнга; и

g представляет собой ускорение.

Нижний индекс 0 в d_{0R} и d_{0S} представляет собой длину объемных резонаторов при некоторой известной температуре, и ΔT представляет собой относительное изменение температуры по сравнению с этой температурой. При некоторой температуре соотношение между этими двумя расстояниями выражается следующим образом:

$$\frac{d_S(T)}{d_R(T)} = \frac{d_{0S}(1 + CTE_S \cdot \Delta T) + \frac{g}{\omega_0^2} (1 + CTE_S' \cdot \Delta T)}{d_{0R}(1 + CTE_R \cdot \Delta T)} \quad (20)$$

Из уравнения (20) может быть видно, что согласование СТЕ элементов минимизирует температурную зависимость измерения. Если $CTE_R = CTE_S$, исключаются температурные зависимости объемных резонаторов. Если $CTE_R = CTE_S'$, исключается температурная зависимость отклика акселерометра. Если $CTE_R = CTE_S = CTE_S'$, исключается температурная зависимость всей системы. Если точное совпадение невозможно, для минимизации общей температурной зависимости системы может быть использована комбинация методов согласования. В случае, когда согласуются только коэффициенты теплового расширения измеряющих и опорных объемных резонаторов, следует следующее уравнение:

$$\frac{d_S(T)}{d_R(T)} = \frac{d_{0S}}{d_{0R}} + \frac{\frac{g}{\omega_0^2} (1 + CTE_S' \cdot \Delta T)}{d_{0R}(1 + CTE_R \cdot \Delta T)} \quad (21)$$

Принимая аппроксимацию биномиальным распределением, предполагают, что члены ΔT^2 малы, и упрощают решение до следующего уравнения:

$$\frac{d_S(T)}{d_R(T)} \approx \frac{d_{0S}}{d_{0R}} + \frac{g}{\omega_0^2 \cdot d_{0R}} (1 + (CTE_S' - CTE_R) \cdot \Delta T).$$

В этом случае термические эффекты на преобразователе уменьшены. В практическом плане уравнение (22) можно переписать.

$$\frac{\tilde{z}_S}{\tilde{z}_R} \sim \alpha + \beta \frac{R}{L} \quad (23)$$

где α и β являются константами, определяемыми путем калибровки. В настоящем документе фактическими значениями заменяют оценки длин и гравитации объемного резонатора. Калибровка продолжается путем оценки длин объемных резонаторов при изменении g . Константы α и β оцениваются с помощью способа наименьших квадратов. Температура объемных резонаторов также может варьироваться и оценивать α и β как функции параметров окружающей среды, таких как T . Эти процессы аналогичны описанным выше процессам обработки данных измерений.

Далее описан конкретный способ обработки данных, полученных устройством, описанным в настоящем документе. Он включал отдельно первую оценку длин опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора. В настоящий момент описан еще один способ. Он определяется уравнением

$$\tilde{z}_j = \frac{\tilde{z}_{R,j} \left[\mu_{R,j} \pi + (-1)^{q_{R,j}} \phi_{R,j} \right] + \tilde{z}_{S,j} \left[\mu_{S,j} \pi + (-1)^{q_{S,j}} \phi_{S,j} \right]}{\mu_{R,j} \pi + (-1)^{q_{R,j}} \phi_{R,j} + \mu_{S,j} \pi + (-1)^{q_{S,j}} \phi_{S,j}} \quad (24)$$

Вместо минимизации $Var(\tilde{z}_R)$ по отношению к p_R и q_R и $Var(\tilde{z}_S)$ по отношению к p_S и q_S по отдельности, $Var(\tilde{z}_j)$ минимизировано по отношению к p_R , q_R , p_S и q_S одновременно. В уравнениях (15) и (16) все еще применяются правила, а также использование описанных выше измерений относительной фазы со ссылкой на "относительный" знак фазы. Результатом является наилучшая оценка соотношения датчика к длинам опорного объемного резонатора

$$\tilde{z}_j \sim \alpha + \beta \frac{R}{L} \quad (25)$$

По-прежнему применяется анализ температурной зависимости описанного выше конкретного примера датчика, относящийся к уравнениям (21) и (22), и $\tilde{z}$ может быть заменено на $\tilde{z}_S / \tilde{z}_R$ в уравнении (23). Константы калибровки остаются константами калибровки. Преимущество использования этого способа

состоит в том, что необходимость априори (заведомо) знать любую из эффективных длин волн полностью устранено. Кроме того, этот способ анализа устраняет необходимость регулировать давление жидкости внутри объемных резонаторов, чтобы минимизировать колебания эффективных длин волн из-за изменений показателя преломления.

Этот документ предлагает модификации устройства, проиллюстрированного на фиг. 4 и 5. Во-первых, контролируемая среда датчика и опорного объемного резонатора не должна быть герметично закрыта, если объемный резонатор не содержит жидкость, отличную от воздуха. Температуру регулируемой среды по-прежнему необходимо точно поддерживать на примере гравиметра из-за тепловой зависимости пружинного элемента внутри устройства. Во-вторых, исключается потребность в газовом элементе 53 по фиг. 4. Требуется только источник настройки длины волны 54.

Требования к источнику 52 длины волны состоят в том, что он должен иметь достаточно малую ширину линии по сравнению с добротностью объемных резонаторов; что его можно настраивать на достаточно большой диапазон длин волн и что его средняя оптическая частота должна быть достаточно стабильной, так что любое усреднение сигнала, выполняемое приемными электронными приборами, невелико по сравнению с областью дисперсии обоих объемных резонаторов. Можно использовать настраиваемые лазерные диоды внешнего объемного резонатора в конфигурациях Литтроу или Литмана, а также настраиваемые волоконные лазеры.

Еще одно требование состоит в том, что сигналы от опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора поступают одновременно. Это ограничивает скорость, с которой эффективная длина волны может быть изменена в дополнение к созданию условия стабильности длины волны, описанного выше. Ввиду этих условий может быть целесообразно изменять эффективную длину волны поэтапно, хотя это может быть ненужным в зависимости от конфигурации и топологии приемных электронных приборов.

Во втором способе расстояния объемного резонатора могут быть вычислены непосредственно на основании области дисперсии (ОД) измеряющих и опорных объемных резонаторов. Сначала определяют эффективную частоту как

$$f_{eff} = f(n \cos \theta). \quad (26)$$

Это эффективная частота света внутри объемного резонатора. Следует обратить внимание, что эффективная частота и эффективная длина волны все еще удовлетворяют условию

$$f_{eff} \lambda_{eff} = c. \quad (27)$$

Используя это определение, область дисперсии равна

$$\Delta f_{FSR,k} = \frac{c}{2n_k d_k \cos \theta_k}; \quad k \in \{S, R\}, \quad (28)$$

где c представляет собой скорость света в вакууме, n_k представляет собой показатель преломления измеряющего объемного резонатора, d_k представляет собой расстояние от объемного резонатора. Эффективную область дисперсии можно определить по аналогии с уравнением (26), и эффективная область дисперсии равна

$$\Delta f_{FSR,eff,k} = \frac{c}{2d_k}; \quad k \in \{S, R\}. \quad (29)$$

В этом способе объемный резонатор подвергают перепроверке с использованием распространенной длины волны (или показателем преломления) с достаточной областью для покрытия по меньшей мере двух резонансных пиков. Затем ОД рассчитывают как разность в области охвата параметров между пиками, см. фиг. 2. На этой фигуре горизонтальная ось, ширина объемного резонатора, заменяется частотой света или длиной волны. Пики встречаются при $\lambda_{eff,j}$ и $\lambda_{eff,j'}$, обозначенные локальными максимумами кривой отклика, S_{MAX} (см. также фиг. 9, на которой "длина волны сканирования" соответствует эффективной длине волны.) Затем эффективную ОД вычисляют на основании разности частот, соответствующих $\lambda_{eff,j}$ и $\lambda_{eff,j'}$. Расстояние объемного резонатора непосредственно вычисляют с использованием уравнения (29). Воздействия температур на вычисленном расстоянии объемного резонатора устраняют с помощью аналогичных методов нормализации измеряющих/опорных объемных резонаторов, как описано выше в предшествующих способах.

В третьем способе вариант реализации системы 7 интерферометрического акселерометра, проиллюстрированный на фиг. 11, включает лазерную систему и систему датчиков, подробно описанную выше и проиллюстрированную на фиг. 4 и 5, а также: опорный генератор тактовых импульсов 91, синхронный контроллер 92, синхронный процессор 93, дополнительный калибратор 94, память 95 и устройство 96 связи. Система 7 акселерометра дополнительно содержит контроллер 99 переменных параметров, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого лазером, и/или показателя преломления оптической среды.

Синхронный контроллер 92 управляет источником лазера, управляет калибратором 94 и управляет развертыванием переменного параметра. Контрольная синхронизация производится опорным генератором тактовых импульсов 91 и синхронизируется с процессором 93.

Дополнительный калибратор 94 выполнен с возможностью передачи известного ускорения на дат-

чик интерферометра. Это используется как неподвижное множество точек данных для известного входа для точной калибровки отклика датчика.

Синхронный процессор 93 получает данные от интерферометрического датчика относительно изменяемого параметра, относительно состояния калибратора и от датчиков окружающей среды. Датчики окружающей среды включают датчики температуры, давления, ускорения/наклона и генератор импульсов в реальном времени. Синхронизация времени сбора данных осуществляется опорным генератором тактовых сигналов 91 и синхронизируется с контроллером 92. Обработка данных может выполняться в скважине с помощью скважинных электронных приборов 8 или на поверхности с использованием наземной компьютерной системы обработки данных 9. Обработанные данные сохраняются в памяти 95. Устройство 96 связи выполнено с возможностью отправки сохраненных данных на поверхность. Датчики 98 окружающей среды могут использоваться для измерения параметров объемного резонатора, таких как давление и температура. В некоторых случаях данные датчиков окружающей среды используются для определения корреляций чувствительности датчика с параметрами, измеренными датчиками окружающей среды. Если корреляция определена, то чувствительность датчика изменяется для удаления предполагаемой зависимости от измеренного параметра. Например, измеряющие и опорные объемные резонаторы находятся в уединенно регулируемой среде для уменьшения температурной зависимости измеренных сигналов. Однако может оставаться определенная остаточная температурная зависимость. В случае, когда оставшаяся температурная зависимость больше, чем может допускаться, ее можно дополнительно уменьшить с помощью общих вычислительных способов, так как температура объемного резонатора была измерена одним из датчиков окружающей среды.

Данные интерферометрического акселерометра 7 получают посредством датчика интерферометра 97 с начальной калибровкой до известного возбуждающего воздействия с последующим немедленным сбором необработанных данных. Контрольный параметр непрерывно изменяется, как описано выше, во время процесса сбора данных. Необработанные данные одновременно получают от опорного объемного резонатора, измеряющего объемного резонатора, любых датчиков окружающей среды и развертки контролируемого параметра.

На фиг. 12 проиллюстрирована блок-схема для одного варианта реализации последовательности 120 сбора и обработки данных. На фиг. 12 блок 121 представляет собой начало последовательности, блок 123 представляет собой конец последовательности, и блок 122 представляет собой использование нелинейных алгоритмов, таких как симуляция восстановления, для минимизации изменения оценок длины измеряющего объемного резонатора и опорного объемного резонатора. После выполнения последовательности сбора данных, когда датчик откалиброван и затем получает данные в течение определенного периода времени, происходит обработка. Данные, полученные во время калибровки, инвертируются для получения коэффициентов пригодности для развертки переменного параметра. Затем эти коэффициенты пригодности применяются к необработанным данным, полученным во время последующих разверток параметра. К смещению объемного резонатора может быть применена коррекция пригодности, которая учитывает воздействия эффектов старения или начальные параметры окружающей среды, такие как температура. Эффекты параметров старения и окружающей среды на смещение объемного резонатора моделируются аналогично воздействию эффектов на длину волны источника с экспоненциальной зависимостью. Может быть выполнен дополнительный этап двойной инверсии для дальнейшего повышения точности смещения и/или сходимости к решению. Результатом этого процесса является абсолютное смещение измеряющего объемного резонатора, который затем связывают с ускорением.

В настоящий момент представлен пример одного способа измерения ускорения с использованием нескольких этапов. Первый этап предусматривает использование опорного объемного резонатора, содержащего оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности. Второй этап предусматривает использование измеряющего объемного резонатора, содержащего оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности, причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения. Третий этап предусматривает освещение опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора с помощью источника оптического излучения, который выполнен с возможностью излучать свет в одной или более длинах волн. Четвертый этап предусматривает изменение длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды с помощью контроллера. Пятый этап предусматривает обнаружение света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором с использованием фотодатчика. Шестой этап предусматривает измерение с помощью датчика интерферометра с использованием света, обнаруженного фотодатчиком, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе. Седьмой этап пре-

дусматривает вычисление ускорения с помощью процессора с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений. Приведенный в качестве примера способ также может включать вычисление соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора к расчетной длине опорного объемного резонатора и минимизацию дисперсии всех соотношений для каждой развернутой длины волны и/или показателя преломления.

Приведенный в качестве примера способ может также включать применение возбуждающей силы известной величины измеряющего объемного резонатора, прием опорного отклика и использование опорного отклика в вычислении ускорения. Приведенный в качестве примера способ может также включать инвертирование данных интенсивности света для обеспечения коэффициентов пригодности для уравнивания, описывающего опорное смещение и измерительное смещение как часть вычисления на шестом этапе.

Может быть понятно, что система 7 интерферометрического акселерометра в дополнение к использованию в глубине скважины также может быть выполнена с возможностью использования на поверхности земли для гравитационных и/или сейсмических измерений. Кроме того, система 7 акселерометра может использоваться в вариантах применения на море, например на борту судна или на морском дне.

Ниже изложены некоторые варианты реализации предшествующего изобретения.

Вариант реализации изобретения 1.

Устройство для измерения ускорения, содержащее опорный объемный резонатор, содержащий оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; измеряющий объемный резонатор, содержащий оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности, причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; источник оптического излучения, выполненный с возможностью освещать опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор; контроллер, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды; фотодатчик, выполненный с возможностью обнаружения света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором; датчик интерферометра выполнен с возможностью измерения с использованием света, обнаруживаемый посредством фотодатчика, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; и процессор, выполненный с возможностью вычисления ускорения с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.

Вариант реализации изобретения 2.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее контрольный объем, содержащий опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор и выполненный с возможностью поддерживать одну и ту же среду для опорных и измеряющих объемных резонаторов.

Вариант реализации изобретения 3.

Устройство по п.2, дополнительно содержащее опорный датчик, выполненный с возможностью измерения параметра окружающей среды контрольного объема, при этом процессор дополнительно выполнен с возможностью использования измеренного параметра окружающей среды для вычисления ускорения.

Вариант реализации изобретения 4.

Устройство по п.1, дополнительно содержащий корпус опорного резонатора, выполненный с возможностью размещения опорного объемного резонатора.

Вариант реализации изобретения 5.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее корпус измеряющего объемного резонатора, выполненный с возможностью размещения измеряющего объемного резонатора.

Вариант реализации изобретения 6.

Устройство по п.5, дополнительно содержащее пружинное устройство, соединяющее подвижную отражающую поверхность с корпусом измеряющего объемного резонатора.

Вариант реализации изобретения 7.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее контроллер регулирования длины волны, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения.

Вариант реализации изобретения 8.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее оптическую среду, расположенную в пределах отражающих поверхностей внутри опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора, причем оптическая среда является одинаковой внутри каждого из опорного объемного резонатора и из-

меряющего объемного резонатора.

Вариант реализации изобретения 9.

Устройство по п.8, дополнительно содержащее контроллер регулирования показателя преломления, выполненный с возможностью изменения показателя преломления оптической среды.

Вариант реализации изобретения 10.

Устройство по п.9, отличающееся тем, что контроллер регулирования показателя преломления выполнен с возможностью изменения давления оптической среды для изменения показателя преломления оптической среды.

Вариант реализации изобретения 11.

Устройство по п.8, дополнительно содержащее опорный датчик, выполненный с возможностью определения параметра оптической среды.

Вариант реализации изобретения 12.

Устройство по п.11, отличающееся тем, что параметр включает по меньшей мере одно из давления и температуры.

Вариант реализации изобретения 13.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее калибратор, выполненный с возможностью обеспечения возбуждения известной величины в измеряющем объемном резонаторе, и при этом процессор дополнительно выполнен с возможностью калибровки устройства на основании отклика на возбуждение.

Вариант реализации изобретения 14.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее носитель, на котором размещены опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор, причем носитель выполнен с возможностью перемещения через ствол скважины, проникающий вглубь земли.

Вариант реализации изобретения 15.

Устройство по п.1, дополнительно содержащее газовый элемент, выполненный с возможностью обеспечения источника оптического излучения опорной длиной волны света.

Вариант реализации изобретения 16.

Устройство по п.1, отличающееся тем, что ускорение представляет собой гравитационное ускорение.

Вариант реализации изобретения 17.

Устройство по п.1, отличающееся тем, что процессор дополнительно выполнен с возможностью вычисления соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора к расчетной длине опорного объемного резонатора и минимизации дисперсии всех соотношений для каждой развернутой длины волны и/или показателя преломления.

Вариант реализации изобретения 18.

Скважинное устройство для измерения ускорения, содержащее носитель, выполненный с возможностью перемещения через ствол скважины, проникающий вглубь земли; контрольный объем, расположенный на носителе; опорный объемный резонатор, расположенный в контрольном объеме и содержащий оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; измеряющий объемный резонатор, расположенный в контрольном объеме и содержащий оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности, причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; лазерный источник оптического излучения, выполненный с возможностью освещения опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора; фотодатчик, выполненный с возможностью обнаружения света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором; газовый элемент, выполненный с возможностью обеспечения источника лазерного излучения опорной длиной волны света; опорный генератор тактовых импульсов, выполненный с возможностью вывода основного сигнала времени; синхронный контроллер, выполненный с возможностью: а) изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды и б) синхронизации с помощью основного сигнала времени; множество опорных датчиков, выполненных с возможностью определения свойств контрольного объема; калибратор, выполненный с возможностью применения возбуждения известной величины к измеряющему объемному резонатору, которое приводит к изменению $d_{\text{ИЗМЕР}}$ для обеспечения отклика калибровки; датчик интерферометра, выполненный с возможностью измерения с использованием света, обнаруживаемого посредством фотодатчика, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; синхронный процессор, выполненный с возможностью: а) синхронизации с основным сигналом времени, б) вычисления ускорения с помощью каждого из первых смещений и вторых перемещений, свойств, обнаруженных опорными датчи-

ками, и отклика калибровки; память, выполненную с возможностью сохранения вычисленного ускорения; и устройство связи, выполненное с возможностью передачи вычисленного ускорения, сохраненного в памяти вверх по стволу скважины по направлению к поверхности земли.

Вариант реализации изобретения 19.

Способ измерения ускорения, включающий использование опорного объемного резонатора, содержащего оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность и вторую неподвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности; использование измеряющего объемного резонатора, содержащего оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность и подвижную отражающую поверхность, расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности, причем подвижная отражающая поверхность выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения; освещение опорного объемного резонатора и измеряющего объемного резонатора с помощью источника оптического излучения, который выполнен с возможностью излучения света на одной или более длинах волн; изменение длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды с помощью контроллера; обнаружение света, излучаемого опорным объемным резонатором и измеряющим объемным резонатором с использованием измерительного фотодатчика; измерение с помощью датчика интерферометра с использованием света, обнаруженного фотодатчиком, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности в опорном объемном резонаторе и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности по отношению к подвижной отражающей поверхности в измеряющем объемном резонаторе; и вычисление ускорения с помощью процессора с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.

Вариант реализации изобретения 20.

Способ по п.19, дополнительно включающий применение силы возбуждения известной величины к измеряемому объемному резонатору, прием опорного отклика и использование опорного отклика в вычислении ускорения.

Вариант реализации изобретения 21.

Способ по п.19, отличающийся тем, что вычисление включает инвертирование данных интенсивности света для обеспечения коэффициентов пригодности для уравнения, описывающего опорное смещение и измерительное смещение.

Вариант реализации изобретения 22.

Способ по п.19, дополнительно включающий транспортировку носителя через ствол скважины, проникающий в глубину земли, причем опорный объемный резонатор и измеряющий объемный резонатор размещены на носителе.

Вариант реализации изобретения 23.

Способ по п.19, отличающийся тем, что ускорение представляет собой гравитационное ускорение.

Вариант реализации изобретения 24.

Способ по п.19, дополнительно включающий расчет соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора к расчетной длине опорного объемного резонатора для каждой развернутой длины волны и/или показателя преломления, минимизацию дисперсии всех соотношений и вычисление оценки по методу наименьших квадратов отношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора к длине опорного объемного резонатора, при этом расчет включает использование оценки соотношения по методу наименьших квадратов.

Вариант реализации изобретения 25.

Способ по п.19, дополнительно включающий расчет оценок длины измеряющего объемного резонатора для каждой развернутой ширины волны и/или показателя преломления и минимизацию дисперсии всех оценок и вычисление оценки длины по методу наименьших квадратов; вычисление оценок длины опорного объемного резонатора для каждой развернутой длины волны и/или показателя преломления и минимизацию дисперсии всех оценок и вычисление по методу наименьших квадратов оценки длины опорного объемного резонатора; и вычисление соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора по методу наименьших квадратов к длине опорного объемного резонатора по методу наименьших квадратов; при этом вычисление включает использование соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора по методу наименьших квадратов к длине опорного объемного резонатора по методу наименьших квадратов.

Вариант реализации изобретения 26.

Способ по п.19, дополнительно включающий использование одной или более методов глобальной оптимизации для решения параметров калибровки для измерений известных значений для нелинейных необработанных выходных данных устройства, содержащего опорный объемный резонатор, измеряющий объемный резонатор, источник оптического излучения, контроллер, фотодатчик, датчик интерферометра и процессор.

Вариант реализации изобретения 27.

Способ по п.26, дополнительно включающий использование одного или более методов глобальной оптимизации для интерпретации нелинейных необработанных выходных данных на основании измерений неизвестных значений с помощью устройства.

Вариант реализации изобретения 28.

Способ по п.27, отличающийся тем, что использование одного или более методов глобальной оптимизации включает применение метода глобальной оптимизации для определения локальной области, в которой расположен глобальный минимум; и применение метода оптимизации для определения локального минимального решения в пределах определенной локальной области.

Вариант реализации изобретения 29.

Способ по п.28, отличающийся тем, что ускорение представляет собой гравитационное ускорение и устройство представляет собой гравиметр.

В поддержку приведенных в настоящем документе идей могут использоваться различные компоненты анализа, включая цифровую и/или аналоговую систему. Например, скважинные электронные приборы 8, наземная система 9 компьютерной обработки данных, лазерный источник 51, опорный генератор тактовых импульсов 91, синхронный контроллер 92, синхронный процессор 93, калибратор 94, память 95, устройство 96 связи, датчик интерферометра 97, контроллер 99 переменного параметра и/или опорные датчики 98 могут включать цифровые и/или аналоговые системы. В системе могут быть такие компоненты, как процессор, носитель данных, память, ввод, вывод, линия связи (проводная, беспроводная, оптическая, гидроимпульсная или т. д.), пользовательские интерфейсы (например, дисплей или принтер), программы системы программного обеспечения, процессоры для обработки сигналов (цифровые или аналоговые) и другие такие компоненты (такие как резисторы, конденсаторы, индукторы и т. д.) для обеспечения работы и анализа устройства и способов, раскрытых в настоящем документе любым из нескольких способов, хорошо известных в данной области техники. Считают, что эти идеи могут быть, но не обязательно, реализованы в сочетании с набором исполняемых компьютером команд, хранящихся на непереходном машиночитаемом носителе, включая память (ПЗУ, ОЗУ), оптические (CD-ROM) или магнитные (диски, жесткие диски) носители или носители любого другого типа, которые при выполнении предписывают компьютеру реализацию способа по настоящему изобретению. Эти команды могут обеспечивать работу и контроль оборудования, сбор и анализ данных, а также другие функции, которые по мнению проектировщика системы владельца, пользователя или другого подобного персонала считаются уместными в дополнение к функциям, описанным в этом раскрытии.

Кроме того, для обеспечения аспектов идей в настоящий документ могут быть включены и упомянуты другие различные компоненты. Например, источник питания (например, по меньшей мере один из генератора, дистанционного питания и батареи), компонент охлаждения, компонент нагрева, магнит, электромагнит, датчик, электрод, передатчик, приемник, приемопередатчик, антенна, контроллер, оптический блок, электрический блок или электромеханический блок могут быть включены для поддержки различных аспектов, обсуждаемых в настоящем документе, или для поддержки других функций, выходящих за рамки объема настоящего раскрытия.

Используемый в настоящем документе термин "носитель" означает любое устройство, компонент устройства, комбинацию устройств, среды и/или элемента, которые могут использоваться для передачи, размещения, поддержки или иного облегчения использования другого устройства, компонента устройства, комбинации устройств, среды и/или элемента. Другие приведенные в качестве примера неограничивающие носители включают бурильные трубы типа труб, смотанных в бухты, типа составных труб и любой их комбинации или части. Другие примеры носителей включают обсадные трубы, каротажные кабели, зонды на кабеле, зонды на скользящей муфте, укороченные системы, компоновки низа бурильной колонны, вставки бурильной колонны, модули, внутренние корпуса и их заменяющие части.

Элементы по вариантам реализации изобретения были введены в форме единственного числа. Формы единственного числа предназначены для обозначения одного или более элементов. Термины "включающий" и "имеющий" и тому подобные предназначены для включения в них таким образом, чтобы были дополнительные элементы, кроме перечисленных элементов. Союз "или" при использовании со списком по меньшей мере двух терминов подразумевает любой термин или комбинацию терминов. Термин "выполненный с возможностью" относится к одному или более структурным ограничениям устройства, которые необходимы для того, чтобы устройство выполняло функцию или операцию, для которых выполнено данное устройство.

Блок-схема, проиллюстрированная в настоящем документе, является всего лишь примером. Может быть множество вариаций этой блок-схемы или этапов (или операций), описанных в настоящем документе, без отклонения от сущности изобретения. Например, этапы могут выполняться в другом порядке, или этапы могут быть добавлены, удалены или изменены. Все эти вариации считаются частью заявленного изобретения.

Хотя проиллюстрированы и описаны один или более вариантов реализации изобретения, могут быть выполнены их модификации и замены без отклонения от сущности и объема изобретения. Соответ-

ственно, следует понимать, что настоящее изобретение описано с помощью иллюстраций, а не ограничений.

Следует признать, что различные компоненты или технологии могут обеспечивать определенные необходимые или полезные функциональные возможности или признаки. Соответственно эти функции и признаки, которые могут потребоваться для поддержки прилагаемой формулы изобретения и ее вариаций, признаются как неотъемлемо включенные в качестве части идей настоящего изобретения и части раскрытого изобретения.

Хотя изобретение было описано со ссылкой на приведенные в качестве примера варианты реализации изобретения, следует понимать, что могут быть сделаны различные изменения и их эквиваленты могут быть заменены на их элементы без отхода от объема изобретения. Кроме того, многие модификации будут оценены для адаптации конкретного инструмента, ситуации или материала к идеям данного изобретения без отхода от его основного объема. Следовательно, предполагают, что изобретение не будет ограничено конкретным вариантом реализации изобретения, раскрытым в качестве наилучшего способа, предусмотренного для реализации настоящего изобретения, а что изобретение будет включать все варианты реализации изобретения, входящие в объем прилагаемой формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для измерения ускорения, содержащее

опорный объемный резонатор (41), содержащий оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность (43) и вторую неподвижную отражающую поверхность (44), расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности (43);

измеряющий объемный резонатор (42), содержащий оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность (45) и подвижную отражающую поверхность (46), расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности (45), причем подвижная отражающая поверхность (46) выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения;

контрольный объем (50), содержащий опорный объемный резонатор (41) и измеряющий объемный резонатор (42) и выполненный с возможностью поддерживать одну и ту же среду для опорных и измеряющих объемных резонаторов;

источник оптического излучения, выполненный с возможностью освещения опорного объемного резонатора (41) и измеряющего объемного резонатора (42);

контроллер, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды;

фотодатчик, выполненный с возможностью обнаружения света, излучаемого опорным объемным резонатором (41) и измеряющим объемным резонатором (42);

датчик интерферометра, выполненный с возможностью измерения с использованием света, обнаруживаемого фотодатчиком, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности (43) по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности (44) в опорном объемном резонаторе (41) и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности (45) по отношению к подвижной отражающей поверхности (46) в измеряющем объемном резонаторе (42); и

процессор, выполненный с возможностью расчета ускорения с использованием каждого из опорных смещений и измеряющих смещений.

2. Устройство по п.1, дополнительно содержащее опорный датчик, выполненный с возможностью определения параметра окружающей среды контрольного объема (50), при этом процессор дополнительно выполнен с возможностью использования измеренного параметра окружающей среды для вычисления ускорения.

3. Устройство по п.1, дополнительно содержащее корпус опорного объемного резонатора (41), выполненный с возможностью размещения опорного объемного резонатора (41).

4. Устройство по п.1, дополнительно содержащее корпус измеряющего объемного резонатора (42), выполненный с возможностью размещения измеряющего объемного резонатора (42).

5. Устройство по п.4, дополнительно содержащее пружинное устройство (47), соединяющее подвижную отражающую поверхность (46) с корпусом измеряющего объемного резонатора (42).

6. Устройство по п.1, дополнительно содержащее контроллер (54) регулировки длины волны, выполненный с возможностью изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения.

7. Устройство по п.1, дополнительно содержащее оптическую среду, расположенную в пределах отражающих поверхностей внутри опорного объемного резонатора (41) и измеряющего объемного резонатора (42), причем оптическая среда является одной и той же внутри каждого из опорного объемного резонатора (41) и измеряющего объемного резонатора (42).

8. Устройство по п.7, дополнительно содержащее контроллер регулировки показателя преломления,

выполненный с возможностью изменения показателя преломления оптической среды.

9. Устройство по п.8, отличающееся тем, что контроллер регулировки показателя преломления выполнен с возможностью изменения давления оптической среды для изменения показателя преломления оптической среды.

10. Устройство по п.1, дополнительно содержащее носитель (5), на котором расположены опорный объемный резонатор (41) и измеряющий объемный резонатор (42), причем носитель (5) выполнен с возможностью перемещения через ствол скважины (2), проникающий вглубь земли (3).

11. Устройство по п.1, дополнительно содержащее газовый элемент (53), выполненный с возможностью обеспечения источника оптического излучения опорной длиной волны света.

12. Устройство по п.1, отличающееся тем, что ускорение является гравитационным ускорением.

13. Устройство по п.1, отличающееся тем, что процессор дополнительно выполнен с возможностью вычисления соотношения расчетной длины измеряющего объемного резонатора (42) к расчетной длине опорного объемного резонатора (41) и минимизации дисперсии всех соотношений для каждой развернутой длины волны и/или показателя преломления.

14. Способ измерения ускорения, включающий

использование опорного объемного резонатора (41), содержащего оптическую среду и первую неподвижную отражающую поверхность (43) и вторую неподвижную отражающую поверхность (444), расположенную на расстоянии $d_{\text{ОТРАЖ}}$ от первой неподвижной отражающей поверхности (43);

использование измеряющего объемного резонатора (42), содержащего оптическую среду и неподвижную отражающую поверхность (45) и подвижную отражающую поверхность (46), расположенную на расстоянии $d_{\text{ИЗМЕР}}$ от неподвижной отражающей поверхности (45), причем подвижная отражающая поверхность (46) выполнена с возможностью смещения при воздействии силы ускорения;

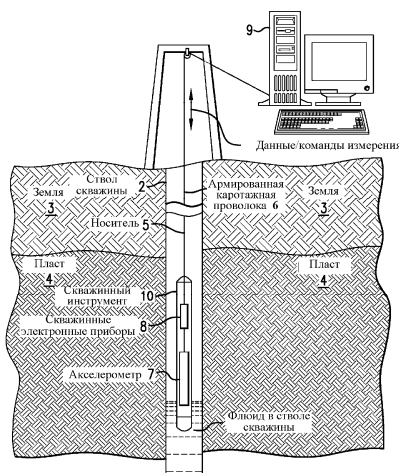
освещение опорного объемного резонатора (41) и измеряющего объемного резонатора (42) источником оптического излучения, который выполнен с возможностью излучения света на одной или более длинах волн;

изменение длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды с помощью контроллера;

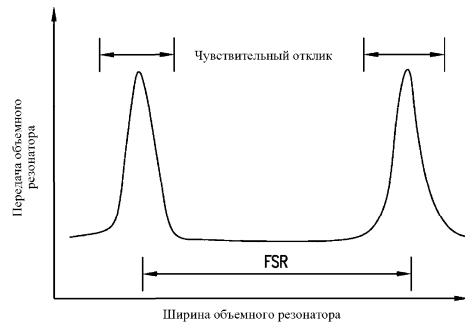
обнаружение света, излучаемого опорным объемным резонатором (41) и измеряющим объемным резонатором (42) с использованием фотодатчика;

измерение с помощью датчика интерферометра с использованием света, обнаруженного фотодатчиком, для каждого изменения длины волны света, излучаемого источником оптического излучения, и/или показателя преломления оптической среды: а) опорного смещения первой неподвижной отражающей поверхности (43) по отношению ко второй неподвижной отражающей поверхности (44) в опорном объемном резонаторе (41) и б) измерительного смещения неподвижной отражающей поверхности (45) по отношению к подвижной отражающей поверхности (46) в измеряющем объемном резонаторе (42); и

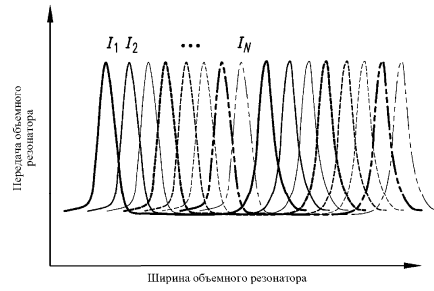
расчет ускорения процессором с использованием каждого из опорных смещений и измерительных смещений.



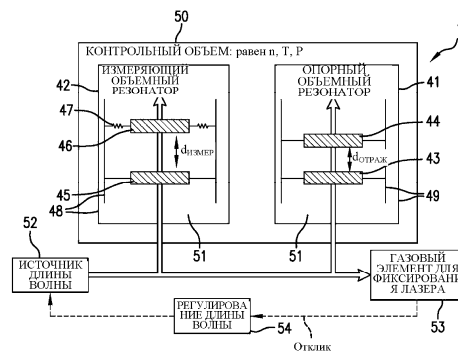
Фиг. 1



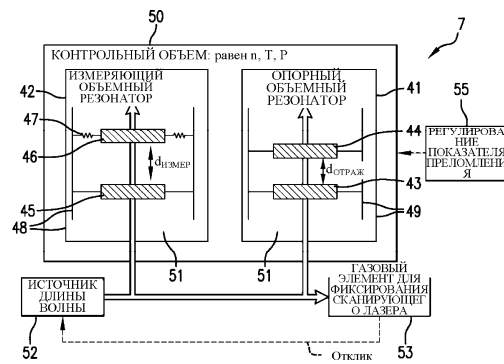
Фиг. 2



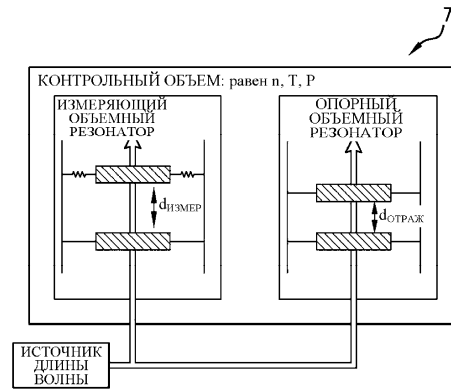
Фиг. 3



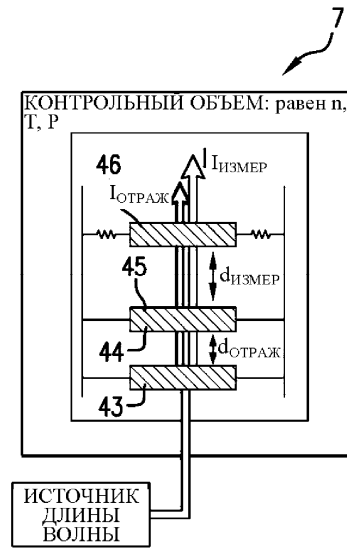
Фиг. 4А



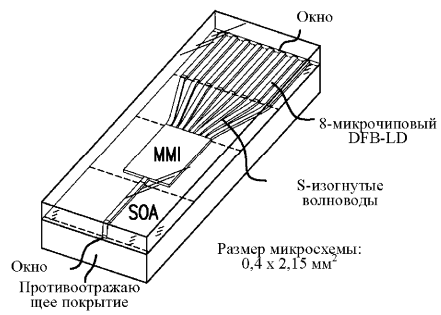
Фиг. 4В



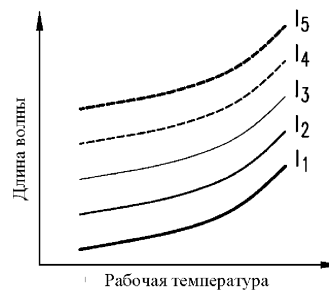
Фиг. 5А



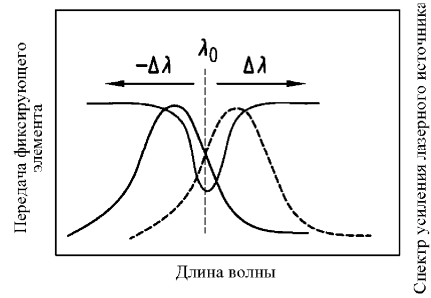
Фиг. 5В



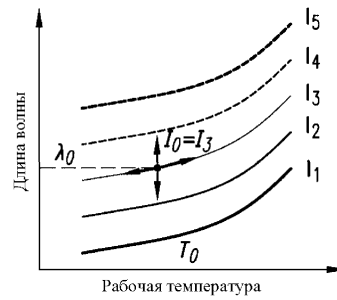
Фиг. 6А



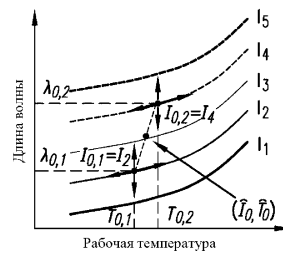
Фиг. 6В



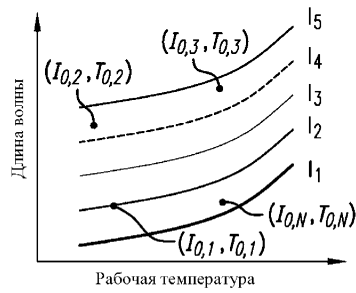
Фиг. 7



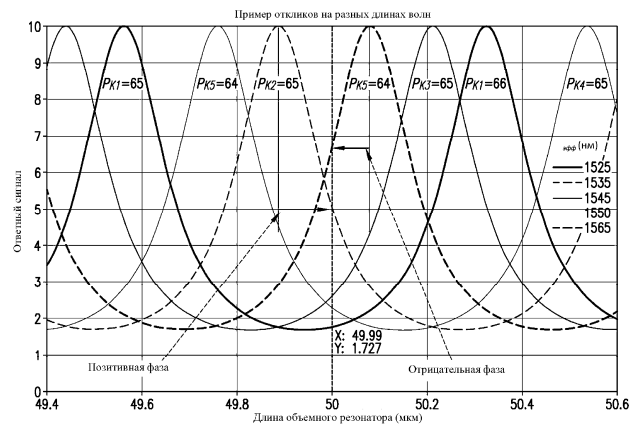
Фиг. 8А



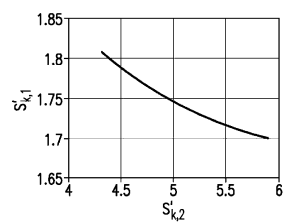
Фиг. 8В



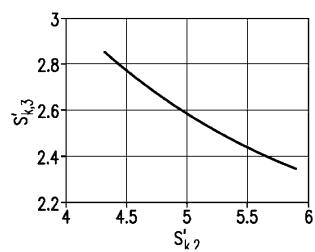
Фиг. 8С



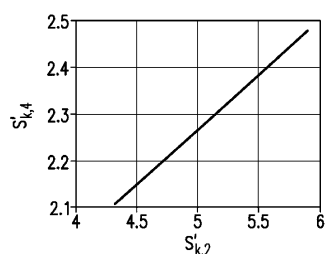
Фиг. 9



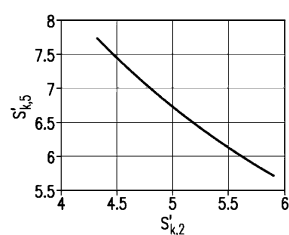
Фиг. 10А



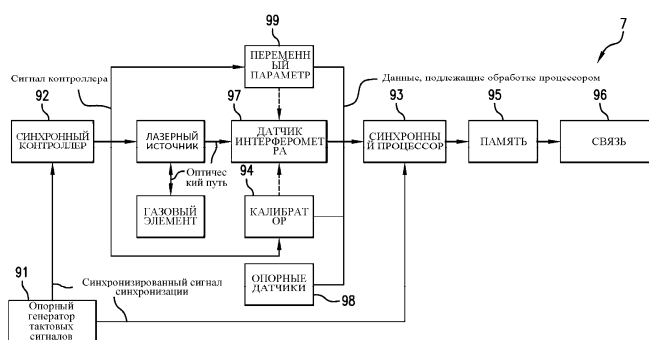
Фиг. 10В



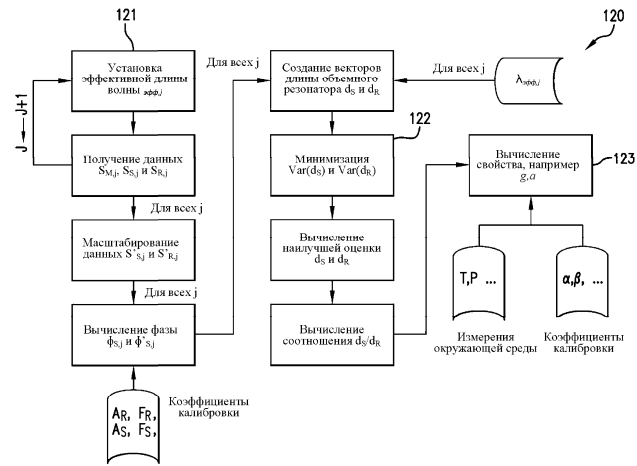
Фиг. 10С



Фиг. 10D



Фиг. 11



Фиг. 12

