

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(11) 029036

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2018.01.31

(51) Int. Cl. G01V 1/16 (2006.01)
G01V 13/00 (2006.01)

(21) Номер заявки
201500222

(22) Дата подачи заявки
2013.07.30

(54) СИСТЕМА ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ МОРСКОЙ ДОННОЙ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

(31) 20120915; 61/683,721

(56) US-A1-20050285645

(32) 2012.08.16

US-A1-20080049550

(33) NO; US

US-A1-20060187886

(43) 2015.10.30

US-A1-20050177310

(86) PCT/NO2013/000041

US-A1-20090080290

(87) WO 2014/027892 2014.02.20

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
МАГСЕЙС АС (NO)

(72) Изобретатель:

Гатеман Ян Б. (NO), Гатеман Нильс П.
(SE)

(74) Представитель:

Емельянова В.А., Вашук Т.В.,
Королева С.В. (BY)

(57) Изобретение касается донной сейсмической станции (100), включающей по крайней мере один сейсмический датчик со встроенной электроникой, первичный осциллятор (106) для измерения времени прохождения сигналов датчиков, эталонный осциллятор (104), память, источник питания, силовой переключатель (102) для включения и выключения эталонного осциллятора, а также процессор (112) для оцифровки сигналов датчиков и хранения их в памяти, калибровки частоты первичного осциллятора (106) по частоте эталонного осциллятора (104) и включения и выключения эталонного осциллятора.

B1

029036

029036

B1

Изобретение относится к области морской сейсмической разведки. В частности, оно касается регистрации морских сейсмических данных при помощи донных сейсмических станций, а также способа сохранения энергии без ущерба для предварительно установленных требований к точности изысканий.

Уровень техники

В основе методов морской сейсморазведки лежит использование сейсмического источника, передающего сейсмический сигнал, при этом приемное устройство измеряет амплитуды и время пробега сейсмических сигналов, возвращенных (отраженных/преломленных) от геологических границ раздела под дном моря. Поверхности раздела между пластами различаются по упругим свойствам и называются сейсмическими отражателями. Возвращаемые сейсмические сигналы регистрируются сейсмическими датчиками, размещаемыми на морском дне или на уровне моря.

Наиболее широко в морской сейсморазведке применяются две технологии регистрации возвращаемых сейсмических сигналов. Одна из них заключается в использовании гидрофонных кос, буксируемых за судном. В случае применения этой технологии регистрируются только продольные волны (Р-волны), так как поперечные волны (S-волны) не распространяются в толще воды. Другая технология состоит в постановке на дне моря донных сейсмических станций, содержащих гидрофоны и геофоны. В этом случае можно регистрировать как Р-волны, так и S-волны и, таким образом, получать более ценную информацию, обрабатывать ее и использовать для картирования рельефа дна.

В последние годы существенные усилия были направлены на улучшение результатов сейсмических исследований путем сбора сейсмических сигналов непосредственно на морском дне вместо их регистрации с помощью уже привычных гидрофонов, буксируемых судном.

Далее следует описание известных способов регистрации морских сейсмических данных с использованием сейсмических датчиков, размещаемых на морском дне. В настоящее время в основном применяются два метода сбора сейсмической информации при помощи сейсмических датчиков.

Первый способ состоит в раскладке на морском дне донного кабеля с интегрированными сейсмическими датчиками и электрическими и/или оптическими проводами, идущими от сейсмических датчиков к поверхности моря, где ведется регистрация сейсмических данных. Сейсмические сигналы генерируются сейсмическим источником, размещаемом на и буксируемом судном-источником. Во время регистрации данных донный кабель обычно крепится к судну-регистратору или судну-раскладчику. В последние несколько лет применяется несколько иной подход, когда вместо отдельного судна-раскладчика используется регистрирующий буй, который обеспечивает донный кабель электрической энергией, генерируемой от дизельного генератора или от аккумуляторных батарей, размещенных в буе. Все зарегистрированные данные или часть этих данных затем передаются от буя на судно-источник сейсмических сигналов или на судно-раскладчик донных кабелей по радиосвязи.

Второй используемый способ заключается в постановке на морское дно и подъеме с морского дна автономных донных сейсмических станций с регистрацией сейсмических данных при помощи судна с дистанционным управлением либо путем простого опускания донных сейсмических станций на дно в свободном падении. В последнем случае подъем донных сейсмических станций производится с судна по сигналу, приводящему в действие механизм в каждой из этих станций, который активирует устройство обеспечения их всплытия или отделяет их от якоря-груза для осуществления их медленного самовсплытия на поверхность акватории. Один из вариантов использования автономных донных сейсмических станций по этому способу предусматривает их закрепление на гибком тросе, спуск донных сейсмических станций на воду путем разматывания троса и опускание их на дно. После завершения регистрации производится подъем донных сейсмических станций путем сматывания троса.

В соответствии с этим способом судно должно произвести постановку донных сейсмических станций и после регистрации сейсмических станций осуществить их подъем для повторного использования. В связи с изменчивостью обстановки на море и в силу различных погодных условий это не всегда возможно оптимально спланировать. Стандартная программа регистрации сейсмических данных предусматривает размещение донных сейсмических станций под водой на длительный срок, который может составлять от нескольких дней до нескольких недель или месяцев. В течение этого срока осцилляторы донных сейсмических станций могут дрейфовать и, таким образом, вызывать временную погрешность в выборке сейсмических данных, значение которой может изменяться, например, под воздействием температурных колебаний или гравитационных сил.

Более того, автономные донные сейсмические станции должны будут работать в течение столь длительного срока без дополнительной подзарядки аккумуляторных батарей. Поэтому такие донные сейсмические станции должны быть весьма энергоэффективными.

При поиске морских месторождений нефти и газа точность регистрации, производимых донными сейсмическими станциями и составляющими их узлами, имеет первостепенное значение. Если донные сейсмические станции или составляющие их узлы будут вести регистрацию с ошибками, то значительная часть имеющихся залежей углеводородов не будет точно картирована.

Одним из основных факторов, влияющих на точность регистрации, является дрейф частоты. Дрейф - это скорость, при которой осциллятор донной сейсмической станции приобретает или теряет частоту относительно установленной частоты. Все осцилляторы испытывают изменения частоты, однако скоп-

рость ее изменения у всех разная. Дрейф частоты одного осциллятора вызывает изменение частоты всех осцилляторов донных сейсмических станций, что приводит к временным погрешностям. Точность частоты осциллятора представляет собой задержку по времени от установленной целевой частоты. Стабильность частоты осциллятора - это разброс измеряемой осциллятором частоты относительно его рабочей частоты в промежуток времени.

Одним из существенных факторов, влияющих на дрейф частоты, а, значит, точность регистрации, является температурный коэффициент, показывающий изменение частоты осциллятора относительно изменения температуры. Осциллятор донной сейсмической станции вырабатывает сигнал, частота которого одна, когда осциллятор установлен на теплой палубе судна-источника, и другая, когда осциллятор погружен в холодную воду. Дрейф частоты осциллятора негативно влияет на точность регистрации. Кроме дрейфа частоты, вызываемого изменениями температуры, на осцилляторы могут оказывать влияние другие факторы окружающей среды, в частности вибрации, гравитационные силы, перебои в подаче энергии и/или тому подобные факторы. Старение кварцевого резонатора является еще одним фактором, влияющим на выходную частоту. Причиной старения кварцевых осцилляторов могут быть различные электромеханические явления. Долгосрочная стабильность частоты обычно выражается количеством частей на миллион (ppm). Величина 15 ppm означает, что за интервал в 1 мс период осциллятора изменяется на 15 нс. Краткосрочная стабильность частоты является функцией шумовых сигналов в осцилляторе и представляет собой фазовую модуляцию выхода осциллятора. Краткосрочная стабильность во временной области определяется как джиттер, но зависит, однако, от интервала измерения.

Сравнение осцилляторов различных типов показано на фиг. 10.

Осцилляторам необходимо некоторое время после запуска, чтобы достичь необходимой стабильности выходной частоты. В зависимости от различных требований к точности и стабильности, а также к цене, разработаны разные типы осцилляторов. В результате компенсации температурной зависимости созданы осцилляторы на основе различных методов контроля температуры: "ТСХО" - кварцевые осцилляторы с температурной компенсацией, имеющие в своей схеме цепь компенсации температуры; "ОС-ХО" - терmostатированные кварцевые осцилляторы, снабженные термостатом для контроля температуры кварца.

Размещение донных сейсмических станций на морском дне является трудоемкой и дорогостоящей процедурой. Регистрация данных может быть ограничена погодными условиями. В результате может ощущаться нехватка энергии для работы всей электроники, включая осцилляторы. Более того, одни типы осцилляторов могут давать дрейф частоты вследствие температурных и тому подобных воздействий, а другие типы осцилляторов могут потреблять столько энергии, что это будет вызывать сокращение времени работы электронного оборудования. Недостатком могут также быть физические габариты существующих осцилляторов и необходимых блоков аккумуляторных батарей. Если применяется морской донный кабель, содержащий электрические проводники, то на борту судна необходимо иметь источник энергии. Однако на электрические зажимы и контакты может попадать вода и, таким образом, влиять на эксплуатационные свойства кабеля. Более того, длина донного кабеля не должна быть слишком большой, так как в противном случае будет происходить падение передаваемого напряжения до неприемлемого значения (донный кабель может достигать в длину несколько километров).

В патенте США № 4281403 раскрыта децентрализованная система регистрации сейсмических данных, в соответствии с которой в качестве регистраторов используются независимые регистрирующие устройства, располагаемые на удалении от центральной станции. Эти устройства включают автономный счетчик времени и средство программирования множества циклов регистрации через желаемые интервалы в синхронизации с сейсмическими взрывами, которые возбуждаются с центральной станции. Значение счетчика местного времени каждого дистанционного регистрирующего устройства сравнивается с текущим значением счетчика времени задающего генератора частоты центральной станции. Значение аккумулированного местного времени, считываемое со счетчиков времени соответствующих дистанционных регистрирующих устройств, и значение аккумулированного времени со счетчика времени задающего генератора частоты регистрируются отдельно в специальных файлах данных на носителе для архивного хранения в каждом из дистанционных регистрирующих устройств. Разность значений аккумулированного местного времени и задающего генератора частоты может затем линейно распределяться по всем файлам зарегистрированных данных каждого дистанционного устройства, синхронизируя их, таким образом, с задающим генератором частоты и друг с другом.

В заявке США № 2005/0246137 показаны способ и система регистрации сейсмических данных без применения компонентов проводной телеметрии, радиотелеметрии или радио инициализации. В заявке раскрыто применение множества независимых беспроводных устройств регистрации сейсмических данных, которые могут функционировать как сенсорные рекордеры данных и/или рекордеры источника события. Каждое устройство регистрации сейсмических данных регистрирует независимый поток сейсмических данных в течение отрезка времени, например, в виде зависимости от времени смещения. Для этих устройств регистрации данных не требуется ведение радиосвязи с другими устройствами регистрации данных, а также прямая синхронизация с другими устройствами-приемниками или с источником старто-вого времени.

В заявке США № 2009/0080290 раскрыта донная система регистрации сейсмических данных с использованием общей внешней распределенной временной базы синхронизации работы системы. Система реализует способ коррекции таймера местного времени на основании нестационарного доступа к общему внешнему генератору эталонной частоты. Способ позволяет корректировать таймер местного времени с помощью управляемого напряжением осциллятора для учета вызываемых условиями окружающей среды временных погрешностей. Дополнительно изобретение предоставляет более стабильный способ коррекции дрейфа таймера местного времени.

В заявке США № 2010/0034053 раскрыт способ сбора сейсмических данных путем регистрации сейсмических данных с помощью множества автономных устройств сбора сейсмических данных, где каждое такое устройство включает кварцевый осциллятор температурной компенсации с цифровым управлением. В соответствии с данным способом формируемые на основе собственных колебаний осцилляторов временные сигналы сопряжены с сигналами множества кварцевых осцилляторов температурной компенсации с цифровым управлением и величина коррекции времени определяется путем использования временных сигналов на основе собственных колебаний осцилляторов первого и второго автономного устройства сбора сейсмических данных.

В патенте США № 7254093 раскрыт блок или контейнер сбора сейсмических данных, помещаемый в водонепроницаемый корпус. В корпус могут включаться другие функциональные элементы, в том числе генератор частоты, работающий в режиме часов, источник питания, механизм управления и регистратор сейсмических данных. В частности, морские донные сейсмоприемники (OBS-системы) с использованием донных сейсмических регистраторов (SSR-типа) обычно включают один или несколько геофонов и/или гидрофонов, источник питания, регистратор сейсмических данных, кварцевый генератор синхронимпульсов, схему управления и, если используются геофоны в карданном подвесе и регистрируются по-перечные волны, то компасы или карданные шарниры.

В патенте США № 7558157 показано, что для получения безошибочных и точных данных от сети независимых датчиков/донных сейсмических станций или массива датчиков каждая донная сейсмическая станция включает атомный генератор частоты. Кроме того, центральный сейсмоприемник/процессор также включает атомный генератор частоты. Каждая донная сейсмическая станция передает псевдослучайный код метки времени. Процессор сравнивает этот псевдослучайный код метки времени со своим собственным псевдослучайным кодом метки времени. Установка атомного генератора частоты внутри процессора позволяет улучшить коррекцию и/или калибровку данных по сравнению с обычным GPS-приемником, не имеющим собственного атомного генератора частоты.

В патенте США № 8050140 показаны автономные морские донные сейсмоконтейнеры, выполненные в низкопрофильном корпусе. Контейнер может включать в себя инерциальную навигационную систему для определения его местоположения на дне моря и рубидиевый таймер для измерения времени. Иной таймер, находящийся под действием гравитационных сил и температурных колебаний, может вызывать дрейф частоты осциллятора, приводя, таким образом, к погрешностям в сейсмических данных. Использование рубидиевого таймера, который менее чувствителен к изменениям температуры или воздействию гравитационных сил, а также позиционированию устройства на морском дне, обеспечивает точную регистрацию сейсмических данных.

(Carleton University, Systems and Computer Engineering, Technical Report SCE-08-12, November 2008: "Frequency Accuracy & Stability Dependencies of Crystal Oscillators" by: Hui Zhou, Charles Nicholls, Thomas Kunz, Howard Schwartz Cardinal Components Inc. Applications Brief No. A.N. 1006: "Clock Oscillator Stability").

К этому следует добавить, что улучшенные и более надежные донные сейсмические станции и сети или массивы таких станций могли бы оставаться под водой в течение более длительного времени и требовали бы меньше ухода. Это позволило бы обеспечить большую гибкость в работе, а также сократить расходы.

Главные проблемы в работе большинства систем донных сейсмических станций заключаются в необходимости обеспечения более низкого энергопотребления, а также в должном решении задачи дрейфа частоты. Эти проблемы ограничивают применение донных сейсмических станций районами, где исследования с помощью сейсмоприемных кос невозможны, например, вблизи эксплуатационных платформ или на больших глубинах.

Указанные эксплуатационные проблемы затрудняют применение донных сейсмических станций.

Описанные выше способы регистрации сейсмических данных не позволяют надлежащим образом решить задачу обеспечения длительных сейсмических исследований. Эффективность представленных систем слишком низкая, что приводит к получению недостоверных результатов разведки.

Раскрытие изобретения

Изобретение призвано исправить или, по крайней мере, смягчить остроту проблем предшествующего уровня техники.

В первом аспекте данное изобретение относится к донной сейсмической станции, включающей первичный осциллятор и эталонный осциллятор, процессор для контроля калибровки частоты первичного осциллятора с помощью значения частоты калибровки на основании значения частоты эталонного

осциллятора, при этом указанный процессор рассчитывает значение частоты калибровки в повторяющемся режиме.

Эталонный осциллятор (ЭО) может быть атомным генератором частоты или термостатированным кварцевым осциллятором (ОСХО). По данному изобретению ЭО может генерировать ту же частоту выхода, что и первичный осциллятор, который может быть кварцевым осциллятором с температурной компенсацией (ТСХО) или иным осциллятором данного качества. Частота выхода может использоваться в связи с аналого-цифровым преобразователем. Как правило, атомный генератор частоты или ОСХО потребляет больше энергии, чем ТСХО, но и является более стабильным даже в условиях изменяющихся температур окружающей среды и/или воздействия гравитационных сил. В соответствии с данным изобретением может использоваться ЭО, потребляющий только 100 мВ или менее энергии. ТСХО, использующийся в качестве первичного осциллятора по данному изобретению, может потреблять только 8-12 мВ или менее энергии, но может приводить к неточностям в показаниях частоты, а, значит, неточной выборке сейсмических данных. В целом, чем точнее осциллятор, тем больше энергии он потребляет. Согласно настоящему изобретению в донной сейсмической станции используется ЭО вместе с ТСХО с целью обеспечения высокой точности регистрируемых сейсмических данных на морском дне с оптимальной энергоэффективностью при среднем потреблении энергии 20-50 мВ или менее.

В втором аспекте настоящее изобретение касается способа калибровки частоты первичного осциллятора, который заключается в расчете значения частоты калибровки этого осциллятора по частоте эталонного осциллятора, при этом расчет значения частоты калибровки осуществляется в повторяющемся режиме через предварительно заданные интервалы времени.

В третьем аспекте настоящее изобретение касается способа калибровки дрейфа частоты первичного осциллятора. Способ состоит в расчете значения калибровки частоты первичного осциллятора по частоте эталонного осциллятора, калибровке частоты первичного осциллятора путем использования указанного значения калибровки частоты, при этом расчет значения калибровки частоты осуществляется в повторяющемся режиме через предварительно заданные интервалы времени, а старт-стопные сигналы направляются в эталонный осциллятор более длинными или более короткими циклами предварительно заданных интервалов времени в зависимости от требований к точности воспроизведения времени во всей системе.

Согласно одному из вариантов осуществления изобретения система регистрации сейсмических данных включает множество автономных донных сейсмических станций, в которой по крайней мере одна автономная донная сейсмическая станция содержит первичный осциллятор и эталонный осциллятор, генерирующий эталонную частоту, температурный датчик для измерения температуры окружающей среды, инерциальный датчик для измерения параметров движения осциллятора, память для хранения зарегистрированных цифровых сейсмических данных, сгенерированных с помощью гидрофона(ов) и/или геофона(ов), а также источник питания, снабжающий систему электрической энергии, при этом процессор производит расчет коэффициента калибровки входа температурного датчика, инерциального датчика, а также датчика эталонной частоты, а также рассчитывает и калибрует первичный осциллятор на основании указанного коэффициента калибровки в повторяющемся режиме через предварительно заданные интервалы времени, обеспечивая тем самым высокую точность регистрации данных с оптимальной энергоэффективностью.

В соответствии с еще одним вариантом осуществления изобретения компьютерное устройство включает регистрирующий блок и калибровочный модуль. Калибровочный модуль выполняет команды компьютерного устройства. Команды имеют следующую логику: получение информации о состоянии окружающей среды от датчиков мониторинга окружающей среды и определение заданной программы, сравнение частоты первичного осциллятора с частотой эталонного осциллятора, расчет коэффициента калибровки на основании сравнения полученных результатов, при этом конфигурация компьютерного устройства обеспечивает калибровку частоты первичного осциллятора на основании коэффициента калибровки в повторяющемся режиме через предварительно заданные интервалы времени, обеспечивая тем самым высокую точность регистрации данных с оптимальной энергоэффективностью.

В одном из аспектов изобретения эталонный осциллятор работает непрерывно как во время постановки донных сейсмических станций, так и во время их подъема. Этalonный осциллятор останавливается только после того, как донная сейсмическая станция установилась неподвижно относительно морского дна и температурный датчик показывает, что внешняя и/или внутренняя температура стабилизировалась. Калибровка и синхронизация эталонного осциллятора производится по генератору эталонной частоты на борту судна до его постановки на дно. Если необходимо, калибровка эталонного осциллятора по генератору эталонной частоты может производиться после подъема донных сейсмических станций. Этalonный осциллятор может быть атомным или иным высококачественным осциллятором.

В соответствии с еще одним вариантом осуществления изобретения менее энергоемкий первичный осциллятор размещается снаружи эталонного осциллятора. После предварительно заданного периода времени происходит включение эталонного осциллятора и осуществляется регулировка/коррекция или калибровка частоты первичного осциллятора по частоте эталонного осциллятора. С течением времени у первичного осциллятора может возникать ощутимый дрейф частоты, но поскольку коррекция или калиб-

ровка его частоты происходит в постоянном режиме, то через какое-то время она стабилизируется, чем обеспечивается точность регистрируемых сейсмических данных. Эталонный осциллятор может получать энергию от источника питания посредством силового переключателя. Источник питания может быть внутренней аккумуляторной батареей или внешней силовой установкой. Осцилляторное устройство по данному изобретению работает с высокой энергоэффективностью, которая обеспечивается интеллектуальным включением и выключением эталонного осциллятора.

Если внешний или внутренний датчик регистрирует какие-либо движения донной сейсмической станции или изменения ее внешней или внутренней температуры между двумя заданными точками калибровки, то в процессор закладывается возможность выполнения дополнительной калибровки. На основании формулы, определяемой параметрами исследований, система может также реализовывать синхронную работу эталонного и первичного осциллятора с целью проверки изменений частоты между нормально распределенными точками проверки.

Если разность между частотами эталонного осциллятора и первичного осциллятора приближается к неприемлемой, либо на следующей точке калибровки регистрируется та же или большая величина изменения, тогда оба осциллятора будут работать параллельно до тех пор, пока не будет достигнута приемлемая точность регистрации.

Если результаты проверки калибровки показывают, что нет необходимости в частых проверках калибровки, то интервал проверок калибровки может увеличиваться по предварительно заданной программе. В противном случае и в случае, когда сдвиг во времени или по частоте превышает допустимую величину, продолжительность интервалов калибровки увеличивается.

По одному из аспектов изобретения контроль частоты для синхронизации частоты первичного осциллятора с частотой эталонного осциллятора осуществляется беспроводной донной сейсмической станцией. Указанная донная сейсмическая станция включает средство измерения частотной погрешности для определения погрешности между частотами первичного осциллятора и эталонного осциллятора. Средство для расчета коэффициента калибровки в составе средства измерения частотной погрешности выполняется на основе входных данных эталонного осциллятора с возможностью генерирования аналогового сигнала контроля, направляемого в первичный осциллятор в повторяющемся режиме.

Согласно еще одному аспекту изобретения эталонный осциллятор работает в непрерывном режиме во время постановки донной сейсмической станции и останавливается только после того, как донная сейсмическая станция установилась неподвижно относительно морского дна и температурный датчик показывает, что внешняя и/или внутренняя температура стабилизировались. Донная сейсмическая станция получает команды при помощи беспроводной точки доступа и может связываться с центральным генератором эталонной частоты.

В соответствии с еще одним аспектом изобретения эталонный осциллятор может работать в непрерывном режиме во время подъема донных сейсмических станций со дна моря. При этом на первичный осциллятор могут воздействовать движения донных сейсмических станций и/или изменения температуры.

Согласно еще одному аспекту изобретения расчет и калибровка значений частоты калибровки программируются на борту контрольного судна и рассчитываются с помощью ЭВМ, исходя из глубины дна, скорости распространения звука в воде, условий на морском дне, и в зависимости от ожидаемых возможных задержек в регистрации сейсмических данных или в иных случаях производственной необходимости.

Настоящее изобретение помогает преодолеть недостатки существующих систем, так как описанное выше использование эталонного осциллятора вместе с первичным осциллятором обеспечивает более точное картирование, а донные сейсмические станции могут дольше оставаться под водой после постановки на дно. Новые подводные сейсмические датчики для донных сейсмических станций позволяют точно определять время калибровки методом адаптивной калибровки с использованием при расчете предыдущих данных.

Предлагаемое новое устройство пригодно для проведения OBS-исследований на любой глубине. В отличие от существующих систем его применение позволит значительно снизить затраты на регистрацию сейсмических данных.

Краткое описание чертежей

Ниже с помощью чертежей поясняются примеры осуществления настоящего изобретения.

Фиг. 1 - блок-схема донного сейсмического устройства по одному из вариантов осуществления изобретения;

фиг. 2 - блок-схема системы регистрации сейсмических данных, включающей множество донных сейсмических станций варианта осуществления изобретения;

фиг. 3 - пример регистрации сейсмических данных с помощью множества донных сейсмических станций, установленных на морском дне, и судна, буксирующего сейсмический источник для генерирования сейсмических сигналов, согласно одному из вариантов осуществления изобретения;

фиг. 4-6 - иллюстрация способа сохранения энергии путем чередования донных сейсмических станций в запрограммированной последовательности использования эталонного осциллятора через определен-

ленный промежуток времени;

фиг. 7 - иллюстрация способа регистрации сейсмических данных с размещением одной или нескольких низкоэнергетических донных сейсмических станций, включающих только первичный осциллятор, между донными сейсмическими станциями, включающими первичный осциллятор и эталонный осциллятор;

фиг. 8а и б - примеры коррекции;

фиг. 9а и б - примеры дрейфа частот осциллятора;

фиг. 10 - сравнение различных осцилляторов согласно документам Carlton University, ноябрь 2008;

фиг. 11 - альтернативная блок-схема донного сейсмического устройства согласно одному из вариантов осуществления изобретения.

Подробное описание изобретения

Ниже следуют примеры осуществления изобретения со ссылкой на чертежи. Одним и тем же или сходным элементам чертежей или описания изобретения соответствуют одинаковые ссылочные номера.

На фиг. 1 показана блок-схема донного сейсмического устройства. Она представляет общее описание автономной донной сейсмической станции 100, включающей первичный осциллятор 106, эталонный осциллятор 104 и компьютерную среду, в которой могут реализовываться варианты осуществления изобретения.

Различные варианты осуществления изобретения могут реализовываться посредством отдельной ЭВМ, центральной ЭВМ или посредством их комбинаций, состоящих из рабочих станций с серверами. Программные модули включают подпрограммы, управляющие программы, объекты, компоненты и структуры данных для выполнения задач, обработки данных, регистрации и вывода информации на дисплей.

Варианты осуществления изобретения могут реализовываться посредством различных конфигураций системы, которые отдельно от или в сочетании с донными сейсмическими станциями или автономной донной сейсмической станцией могут включать ручные устройства, мультипроцессорные системы, бытовую электронику на основе мультипроцессоров или программируемые приборы бытовой электроники, сетевые ЭВМ, мини-ЭВМ, центральные ЭВМ и т.п. Варианты осуществления могут обеспечивать выполнение задач внутри операционной системы и в распределенных компьютерных средах, которые включают устройства дистанционной обработки данных, соединенные между собой коммуникационными линиями. Программные модули, процессоры, работающие в распределенных компьютерных средах, могут размещаться в различных местах памяти, как внутри/рядом, так на удалении от донных сейсмических станций.

Донная сейсмическая станция 100 может иметь один или множество датчиков, таких как геофоны, гидрофоны или акселерометры со встроенной электроникой, например процессорами, аппаратными средствами фильтрации, оцифровки регистрируемых данных, хранения данных и обеспечения энергией. Здесь это представлено блоком под номером 118.

Донная сейсмическая станция 100 дополнительно включает силовой переключатель 102 для включения и выключения эталонного осциллятора, если необходимо. Питание донной сейсмической станции 100 обеспечивается от источника питания. Кроме того, донная сейсмическая станция 100 включает процессор 112, соединенный с внутренней памятью системы, передающей процессору команды. Память системы может присоединяться к системной шине, которая обеспечивает оперативную связь различных узлов системы с процессором 112 или между собой. Системная шина может быть любой из нескольких типов силовых шин, использующих любую из множества общезвестных архитектур шин. Для калибровки частоты в компьютерную среду встраивается также отдельный специальный аналого-цифровой преобразователь 110.

Хотя на фиг. 1 показан один процессор 112, возможна реализация с отдельным центральным процессорным устройством (CPU) и/или процессором цифровой обработки сигналов (DSP), а также с обоими процессорами или множеством процессорных устройств. В качестве процессорного устройства могут использоваться устройства семейства FPGA или ASIC, либо сходные устройства. Автономная донная сейсмическая станция 100 может быть отдельным устройством, разветвленной системой устройств, либо может работать как отдельное вычислительное устройство/устройство регистрации данных.

Основная память может быть физической памятью любого типа. Она может быть постоянным запоминающим устройством (ROM) базовой системы ввода/вывода (BIOS), содержащим основные подпрограммы облегчения передачи информации между узлами внутри автономной донной сейсмической станции 100, например, во время ее запуска. Кроме того, основная память автономной донной сейсмической станции 100 может быть памятью с произвольным доступом (RAM), содержащей операционную систему "ОС", прикладную программу и сейсмические данные.

К процессору 112 могут присоединяться различные устройства ввода/вывода данных через внутренний/внешний интерфейс.

Донная сейсмическая станция 100 может также включать один или несколько датчиков для мониторинга узлов и условий окружающей среды. Одним из типов таких датчиков может быть инерциальный датчик 114, реагирующий на любое перемещение или относительное движение донной сейсмической

станции 100 на морском дне, будь то наклон, вращение или переворачивание. Одним из датчиков условий окружающей среды может быть температурный датчик 116, выдающий значения температуры морской среды в виде сигналов на процессор 112, размещенный в донной сейсмической станции 100.

Если отдельный ТСХО, использующийся как первичный осциллятор 106, имеет изменяющийся временной дрейф, то каждый такой временной дрейф первичного осциллятора 106 как может, так и не может быть достаточно постоянным, в результате чего передаваемые в файлы сейсмические данные могут оказаться весьма неточными. Такие неточности можно избежать путем использования эталонного осциллятора 104, который через предварительно заданные интервалы и/или адаптивно определяет значение калибровки частоты для калибровки частоты первичного осциллятора 106. Эталонный осциллятор может быть атомного типа или иным высококачественным осциллятором.

По одному из вариантов осуществления изобретения некоторые отдельно размещаемые осцилляторы могут состоять из двух взаимодействующих друг с другом осцилляторов.

Основная единица измерения времени, секунда, определяется как "промежуток времени, равный 9192631770 периодам перехода в атоме цезия". Таким образом, генератор частоты можно определить как устройство, рассчитывающее число циклов или периодов колебаний осциллятора от начала отсчета времени. При подсчете числа периодов колебаний осциллятора может вноситься временная погрешность в случае изменения/дрейфа первичной частоты по времени. Поскольку донная сейсмическая станция регистрирует выборки сейсмических данных, то дрейф частоты может приводить к погрешностям регистрируемой и затем обрабатываемой сейсмической информации. Осцилляторы, имеющиеся для донных сейсмических станций, будут иметь дрейф частоты, вызываемый их структурой и/или условиями окружающей среды. И поскольку более точные осцилляторы потребляют больше энергии, чем менее точные осцилляторы, то настоящее изобретение решает как проблему энергопотребления, так и проблему точности получаемых данных.

Эталонный генератор 104 генерирует сигнал в повторяющемся режиме через фиксированный или адаптивно рассчитанный период времени на основании набора предварительно заданных параметров 120 и передает этот сигнал на контроллер частоты 108 при помощи системной шины. Первичный осциллятор 106 также передает генерируемую им текущую частоту на контроллер частоты 108. Сигналы эталонного осциллятора 104 и процессора 112 сравниваются с частотой, получаемой от первичного осциллятора 106, и в специальный цифроаналоговый преобразователь 110 направляется цифровой сигнал для коррекции/калибровки. Преобразователь 110 направляет контрольный аналоговый сигнал в первичный осциллятор 106 для калибровки частоты первичного осциллятора 106. Значения погрешности частоты и калибровки могут храниться в памяти для каждой калибровочной точки с целью возможного использования при анализе обработки.

Эталонный осциллятор 104 может представлять собой атомный генератор частоты; чиповый атомный генератор частоты "АТ". АТ имеет тот же выход/частоту, что и ОСХО или ТСХО. Например, устройство АТ может функционировать как эталонный осциллятор с ТСХО-устройством или как первичный осциллятор 106 донной сейсмической станции 100 для обеспечения высокой точности регистрируемых сейсмических данных на морском дне с оптимальной энергоэффективностью.

Изобретение обеспечивает низкое потребление энергии, что сокращает затраты на приобретение аккумуляторных батарей, а также соответствующего периферийного оборудования, например оборудования для подзарядки, хранения и эксплуатации аккумуляторных батарей. Аккумуляторные батареи, используемые в донных сейсмических станциях 100, представляют главную статью затрат. Одновременно требуется все большее число донных сенсорных устройств для типичной сети регистрации сейсмических данных. Комбинирование более точного эталонного осциллятора с энергоэффективным, но менее точным, ТСХО, образует систему, которая потребляет меньше энергии аккумуляторных батарей.

Система по данному изобретению дает возможность сократить воздействия изменения окружающей среды.

На фиг. 2 показан пример осуществления системы 200 регистрации данных. Система 200 регистрации данных состоит из множества донных сейсмических станций 100, обозначенных как 100a, 100b, 100c, 100d, 100e, 100f и т.д., и центрального генератора эталонной частоты 202. Каждая донная сейсмическая станция 100 включает первичный осциллятор 106, эталонный осциллятор 104 и датчики, подобные инерциальному датчику 114 и температурному датчику 116, показанным на фиг. 1. Каждая такая донная сейсмическая станция 100 передает поток информационных сигналов на центральную ЭВМ с генератором эталонной частоты 202 по кабель-тросам, каналам беспроводной радиосвязи, интернет-протоколу TCP, либо иным проводным или беспроводным каналам передачи информации.

Донные сейсмические станции 100 являются автономными. Все они представляют собой комплектные устройства, снабженные геофоном, гидрофоном, блоками памяти, аппаратными средствами для оцифровки, первичным осциллятором и эталонным осциллятором, синхронизированным с центральными генератором эталонной частоты 202 на борту корабля или судна-источника, собирающего данные.

Центральный генератор эталонной частоты 202 может иметь центральный приемник данных и центральный процессор, который получает поток данных от донной сейсмической станции 100 и организует эти потоки данных по соответствующим показателям выборки. Использование АТ в составе этих донных

сейсмических станций 100 улучшает коррекцию и/или калибровку по сравнению с традиционными донными сейсмическими станциями, не содержащими АТ.

По настоящему изобретению в донных сейсмических станциях 100 АТ как эталонный осциллятор 104 применяется с первичным осциллятором 106. Использование АТ в каждой из донных сейсмических станций 100 позволяет упростить корреляцию между данными разных донных сейсмических станций 100 и центрального генератора эталонной частоты 202.

На фиг. 3 показано, каким образом происходит постановка донных сейсмических станций на дно и как осуществляется генерирование сейсмических сигналов с судна и их получение донными сейсмическими станциями. Технологическая схема морской сейсморазведки месторождений нефти предусматривает размещение на морском дне 306 сети геофизических датчиков или донных сейсмических станций 100 для обнаружения возможных мест залегания углеводородов. Донные сейсмические станции 100 могут сбрасываться с борта судна или укладываться на дно дистанционно управляемым судном. В одном аспекте изобретения донные сейсмические станции 100 могут размещаться как самостоятельные станции, либо как автономные донные сейсмические станции в донной сейсмической косе (OBS). Как правило, каждая из таких донных сейсмических станций включает гидрофон, один или несколько геофонов, регистрирующие устройства и блок памяти для хранения зарегистрированных данных.

Для генерирования сейсмического сигнала, например, с помощью традиционной совокупности пневмопушек, используется обычное судно-источник 302 сейсмических сигналов. Судно-источник 302 движется вдоль профиля, позволяющего пневматическому источнику производить взрывы с множества различных мест территории относительно расположения сети донных сейсмических станций 100. Часть сейсмических волн отражается от морского дна 306 и возвращается обратно к морской поверхности 304, а остающаяся часть сейсмических волн проникает вглубь морского дна 306 и проходит через геологические слои 308, например потенциальные нефтесодержащие породы 310. Затем сейсмические волны отражаются обратно до донных сейсмических станций 100 на морском дне 306, где они регистрируются. После завершения судном-источником 302 предварительно заданной программы геофизических исследований донные сейсмические станции 100 поднимаются. Так как скорость распространения сейсмических волн разная в разных материалах, то время их пробега обратно до донных сейсмических станций 100 будет также разным, в зависимости от материала, присутствующего в породе. В ходе обработки зарегистрированных данных на судне производится карта слоев осадочных пород морского дна 306 с нанесением возможного залегания углеводородов. Чем точнее будут данные, зарегистрированные донными сейсмическими станциями 100, тем лучше построенная карта будет отображать существование углеводородных залежей.

Донные сейсмические станции 100 могут образовывать специальный сеточный массив, располагаемый на дне моря с целью регистрации данных. Вследствие сложности расположения сетевых линий или постановки донных сейсмических станций 100, используется различное полевое оборудование в зависимости от глубины, температурных режимов и других геологических факторов и воздействий окружающей среды.

При морских сейсмических исследованиях применяются различные источники сейсмических сигналов, включая гидропушки, пневмопушки, электроискровые источники (спаркеры) и электродинамические источники (бумеры).

При регистрации сейсмических данных могут регистрироваться шумы окружающей среды. Поскольку регистрация сейсмических данных по данному изобретению происходит в автономном режиме, то такие шумы могут регистрироваться при помощи отдельной системы регистрации данных с передачей данных в режиме реального времени на одно из судов для проверки их качества. Предусматривается несколько вариантов регистрации шумов. Один из них заключается в регистрации данных с помощью короткой плавающей сейсмической косы, буксируемой за судном-источником 302. Как правило, в плавающие косы смонтированы гидрофоны, улавливающие шумы окружающей среды. Данные передаются в регистрирующую систему на борту судна-источника 302 по плавающей косе. Анализ данных может производиться на судне 302. Данные передаются по буксировочному трос-кабелю на регистрирующий буй, а затем по радио на одно из судов для анализа. Как альтернативный вариант, в буксировочный трос-кабель могут монтироваться гидрофоны, а геофоны отсутствовать.

На фиг. 4-6 показан способ, предусматривающий предварительно запрограммированную последовательность чередования донных сейсмических станций, когда эталонный осциллятор включен (на фиг. 4 станции 100a и 100f), а другие донные сейсмические станции контролируются первичными осцилляторами. Выборка показывает, что каждая пятая донная сейсмическая станция включена.

Еще одна предварительно запрограммированная последовательность расположения (фиг. 5) состоит в том, что донные сейсмические станции, контролируемые эталонным осциллятором, смешены к следующим на линии. Каждый пятый осциллятор все так же включен, но теперь представлена другая группа донных сейсмических станций (100b и 100g), где эталонные осцилляторы включены.

На фиг. 6 показана еще одна последовательность расположения донных сейсмических станций с включенными эталонными осцилляторами (100c и 100h). Согласно такому способу расположения донных сейсмических станций достигается еще большее сокращение потребления энергии, а точность полу-

ческих данных остается в установленных пределах. Поскольку наивысший уровень потребления энергии будет последовательно переходить от одной донной сейсмической станции к другой, при этом наиболее точные осцилляторы будут включены, то со временем потребление энергии всеми донными сейсмическими станциями станет одинаково низким. Коррекция дрейфа приборов донных сейсмических станций, работающих с менее точными осцилляторами, будет осуществляться во время следующей последовательности их расположения, когда эталонный осциллятор включен.

На фиг. 7 показан способ регистрации сейсморазведочных данных на морском дне, при котором одна или несколько низкоэнергетических донных сейсмических станций (i), включающих только первичный осциллятор, располагаются на морском дне (k) между донными сейсмическими станциями (j), включающими первичный осциллятор и эталонный осциллятор. Для регулировки сейсмических данных, регистрируемых промежуточными донными сейсмическими станциями (i), улучшение временной синхронизации сейсмических данных, записанных донными сейсмическими станциями (i), может достигаться в ходе их постсейсмической интерпретации путем анализа различных времен прибытия прямых или отраженных сейсмических сигналов (T1 и T2) в местах нахождения донных сейсмических станций (j).

На фиг. 8а показан первичный осциллятор с уходом частоты, как функции времени, с коррекцией до номинального значения f_0 .

На фиг. 8б представлен процесс коррекции, когда уход частоты компенсируется путем регулировки частоты ниже номинального значения с целью уменьшения расхождения от номинальной частоты f_0 .

На фиг. 9а представлен процесс коррекции частоты первичного осциллятора с вариациями параметров f_0 . Поскольку частота первичного осциллятора калибруется по частоте эталонного осциллятора, то при проверке значения этой частоты по генератору эталонной частоты на судне в конце сейсмических исследований может оказаться, что эталонный осциллятор также показывает уход частоты, равный $f_d = f_s - f_0$, как показано на фиг. 9б. Установленный на борту судна комплекс оборудования для обработки данных позволяет вносить исправления во все зарегистрированные данные по расчетной кривой сдвига частоты.

На фиг. 10 представлены сравнительные данные разных типов осцилляторов.

На фиг. 11 представлен альтернативный вариант блок-схемы, показанной на фиг. 1. На этом рисунке контроллер частоты 108 и цифроаналоговый преобразователь 110, представленные на фиг. 1, заменены контроллером частоты 130 со встроенной схемой фазовой автоподстройки частоты. Другие узлы на фиг. 11 соответствуют узлам на фиг. 1.

В варианте осуществления изобретения, который представлен на фиг. 11, эталонный осциллятор 104 генерирует синхронизирующий сигнал в повторяющемся режиме через фиксированный или адаптивно рассчитанный период времени на основании набора предварительно заданных параметров 120 и передает этот синхронизирующий сигнал на контроллер частоты 130. Первичный осциллятор 106 передает синхронизирующий сигнал на контроллер частоты 130 в непрерывном режиме. Синхронизирующие сигналы эталонного осциллятора 104 и первичного осциллятора 106 сравниваются внутри контроллера частоты 130, при этом осуществляется расчет значения коррекции и подается на схему фазовой автоподстройки частоты. Сигнал с выхода фазовой автоподстройки поступает на вход процессора 112.

Раскрыта в данном изобретении система регистрации сейсмических данных особенно подходит для OBS-технологии донных сейсмических исследований на любой глубине. Реализация настоящего изобретения позволит значительно сократить затраты на сбор сейсмических данных по сравнению с известным уровнем техники.

Настоящее изобретение ни в коей мере не ограничивается только раскрытыми вариантами осуществления. Наоборот, специалист, обладающий обычными знаниями в данной области, найдет много возможностей их усовершенствования, не отходя от основной идеи изобретения, определенной прилагаемой формулой изобретения. Более того, как представляется, некоторые основные новаторские принципы могут стать объектом самостоятельной патентной охраны (например, путем подачи выделенных заявок), не относящейся к области сейсморазведки. В частности, это касается калибровки осциллятора с целью сбережения энергии: частоты осциллятора, как определено, без ограничения какой-либо областью применения и/или способа калибровки ухода частоты, заключающегося в направлении старт-стопных сигналов в блок синхронизации (часы) эталонного осциллятора более длительными циклами предварительно заданных временных интервалов для точной фиксации моментов времени системы.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Донная сейсмическая станция, включающая по меньшей мере один сейсмический датчик со встроенной электроникой, первичный осциллятор, выполненный с возможностью измерения времени прохождения сигналов датчиков, память, источник питания, эталонный осциллятор, выполненный с возможностью получения питания от источника питания, силовой переключатель между источником питания и эталонным осциллятором, а также процессор, выполненный с возможностью контроля частотной калибровки первичного осциллятора путем использования величины частотной калибровки на основании частоты, обеспечиваемой эталонным осциллятором, а также с возможностью включения и выключения

эталонного осциллятора путем использования силового переключателя, при этом память связана с процессором и морская донная сейсмическая станция конструктивно выполнена для использования на дне океана, при этом эталонный осциллятор выключается по завершении частотной калибровки.

2. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что эталонный осциллятор размещается снаружи первичного осциллятора.

3. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что процессор калибрует частоту первичного осциллятора после временного интервала.

4. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что процессор выполнен с возможностью включения или выключения эталонного осциллятора по предварительно заданному алгоритму, направленному на оптимизацию энергопотребления относительно требований к точности всей системы.

5. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что она дополнительно включает по меньшей мере один датчик для мониторинга условий окружающей среды.

6. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что она дополнительно включает по меньшей мере один датчик для мониторинга движения донной сейсмической станции.

7. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что она дополнительно включает цифроаналоговый преобразователь, конфигурация и принцип действия которого позволяют получать цифровой сигнал и генерировать аналоговый сигнал для подачи на первичный осциллятор.

8. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что контроллер частоты, содержащий схему фазовой автоподстройки частоты, выполнен с возможностью калибровки частоты первичного осциллятора на основании частоты эталонного осциллятора, а также включение и выключение эталонного осциллятора.

9. Донная сейсмическая станция по п.1, отличающаяся тем, что она дополнительно включает внешнюю беспроводную точку доступа для связи с процессором.

10. Способ калибровки частоты осцилляции первичного осциллятора донной сейсмической станции по п.1, отличающийся тем, что указанный способ состоит из следующих шагов:

включения эталонного осциллятора с помощью силового переключателя, при этом эталонный осциллятор подключен к силовому переключателю и силовой переключатель подключен к источнику питания,

стабилизации частоты первичного осциллятора донной сейсмической станции, расположенной на дне океана, на основании частоты эталонного осциллятора,

расчета величины частотной калибровки для калибровки частоты первичного осциллятора, при этом конструкция первичного осциллятора позволяет измерять время прохождения сигналов датчиков,

регулировки частоты первичного осциллятора на основании величины частотной калибровки,

выключения эталонного осциллятора с использованием силового переключателя по завершении калибровки, а также

повторения указанных шагов после временного интервала.

11. Способ по п.10, отличающийся тем, что включение и выключение эталонного осциллятора осуществляется с помощью внешнего сигнала, поступающего на эталонный осциллятор.

12. Способ по п.11, отличающийся тем, что внешний сигнал передается от центральной станции контроля.

13. Способ по п.10, отличающийся тем, что временной интервал поступления старт-стопных сигналов на эталонный осциллятор предварительно задается при помощи алгоритма, направленного на оптимальное энергопотребление относительно требований к точности всей системы.

14. Способ по п.10, отличающийся тем, что временной интервал определяется на основании ожидаемого периода приостановки работ из-за неблагоприятных погодных условий.

15. Способ по п.10, отличающийся тем, что временной интервал определяется на основании информации, касающейся состояния окружающей и/или геологической среды в месте нахождения донной сейсмической станции.

16. Способ по п.10, отличающийся тем, что при постановке донной сейсмической станции на дно океана эталонный осциллятор включается во время указанной постановки и выключается после достижения донной сейсмической станцией дна и стабилизации внутренней и/или внешней температуры, измеряемой датчиками донной сейсмической станции.

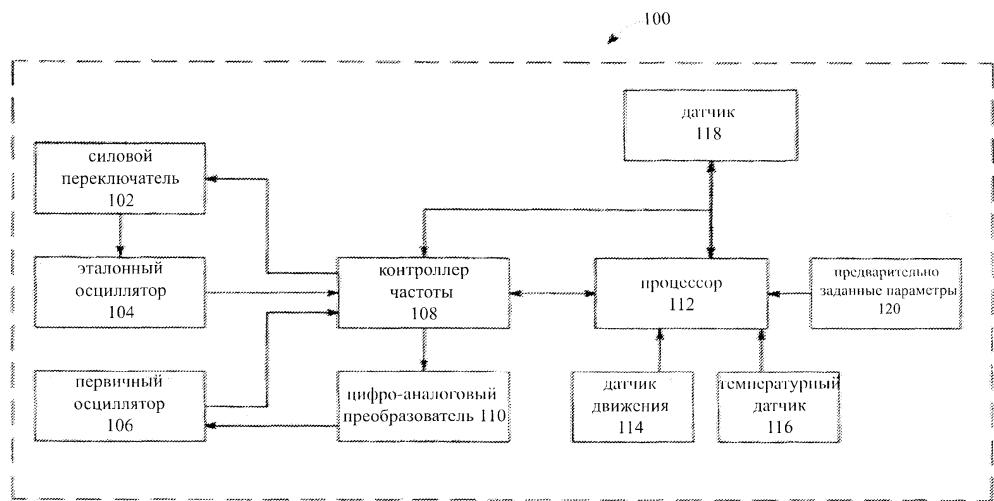
17. Способ по п.10, отличающийся тем, что во время подъема донной сейсмической станции со дна океана может включаться эталонный осциллятор.

18. Способ по п.10, отличающийся тем, что при обнаружении одним из датчиков донной сейсмической станции какого-либо движения донной сейсмической станции либо какого-либо изменения внутренней или внешней температуры выполняется калибровка частоты осцилляции первичного осциллятора.

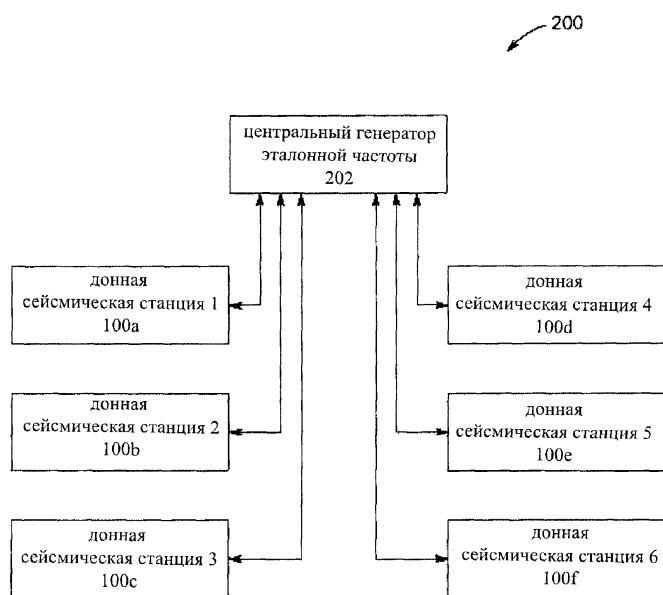
19. Способ по п.10, отличающийся тем, что в течение всего временного интервала или части временного интервала между калибровками первичного осциллятора первичный осциллятор и эталонный осциллятор работают синхронно, при этом регистрируется разность частот, на основании которой принимается решение либо продолжать синхронную работу первичного осциллятора и эталонного осцилля-

тора, либо сохранить, уменьшить или увеличить временной интервал между калибровками, либо выполнить калибровку.

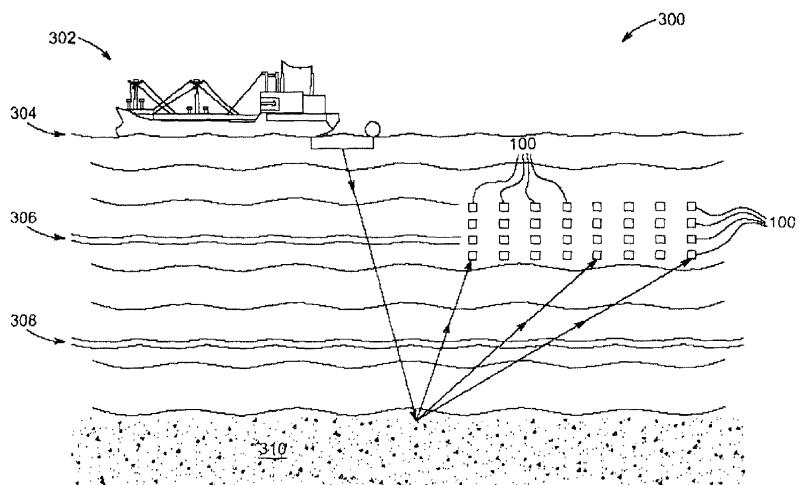
20. Способ по п.10, отличающийся тем, что донная сейсмическая станция является одной из массива донных сейсмических станций, устанавливаемых на морском дне, при этом каждая донная сейсмическая станция в массиве является одной из набора донных сейсмических станций, по меньшей мере, набора из двух таких станций, при этом эталонные осцилляторы донных сейсмических станций одного набора последовательно включаются, а эталонные осцилляторы донных сейсмических станций других наборов выключаются.



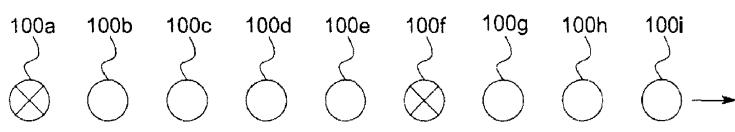
Фиг. 1



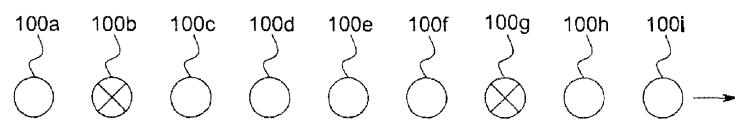
Фиг. 2



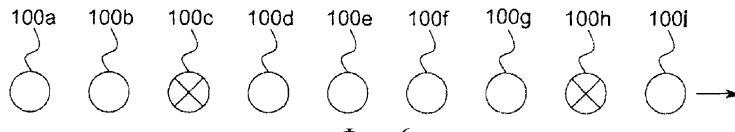
Фиг. 3



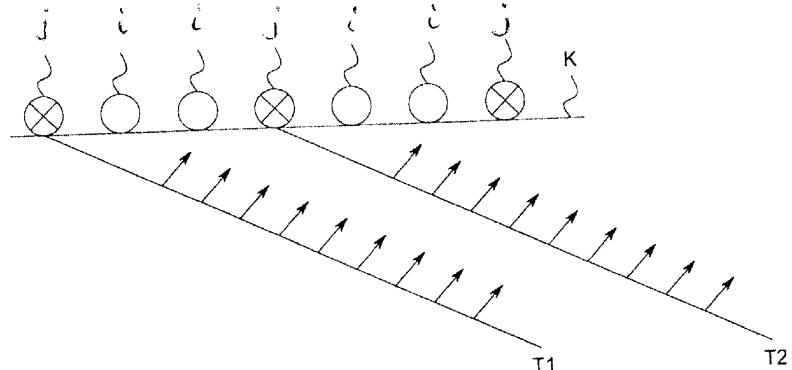
Фиг. 4



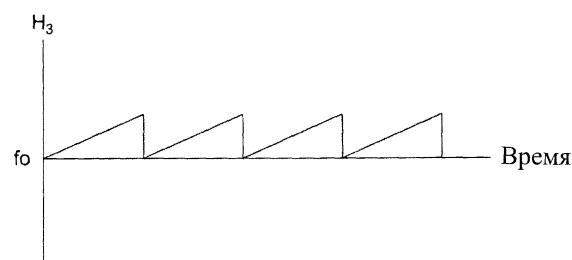
Фиг. 5



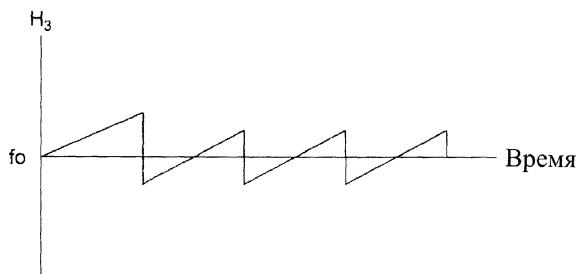
Фиг. 6



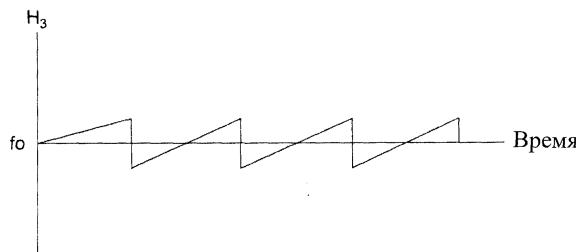
Фиг. 7



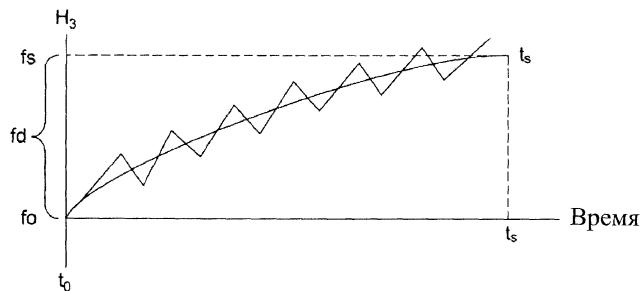
Фиг. 8а



Фиг. 8b



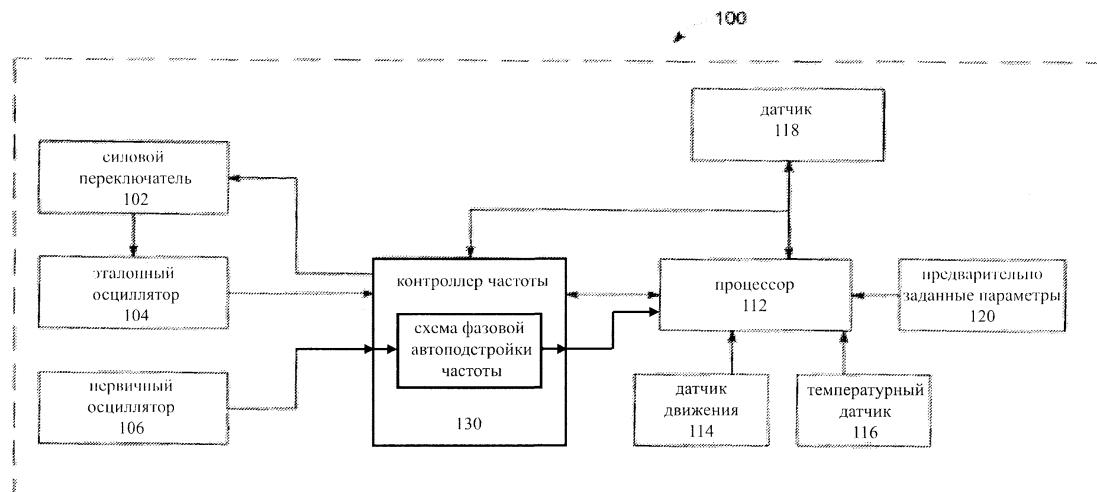
Фиг. 9a



Фиг. 9b

	Кварцевые Осцилляторы			Атомные Осцилляторы		
	TCXO	MCXO	OCXO	Рубидиевые	Рубидиевого атомного стандарта (RbXO)	Цезиевые
Точность (в год)	2×10^{-6}	5×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-10}	7×10^{-10}	2×10^{-11}
Старение/Год	5×10^{-7}	2×10^{-8}	5×10^{-9}	2×10^{-10}	2×10^{-10}	0
Температурная стабильность (интервал, °C)	5×10^{-7} (от -55 до +85)	3×10^{-8} (от -55 до +85)	1×10^{-9} (от -55 до +85)	3×10^{-10} (от -55 до +68)	5×10^{-10} (от -55 до +85)	2×10^{-11} (от -28 до +65)
Стабильность, $\sigma_y(t)$ ($t=1s$)	1×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-12}	3×10^{-12}	5×10^{-12}	5×10^{-11}
Габариты, см ³	10	30	20-200	200-800	1 000	6 000
Время прогрева (мин)	0.03 (до 1×10^{-6})	0.03 (до 2×10^{-8})	4 (до 1×10^{-8})	3 (до 5×10^{-10})	3 (до 5×10^{-10})	20 (до 2×10^{-11})
Потребляемая мощность (В) (при самой низкой температуре)	0.04	0.04	0.6	20	0.65	30
Цена (\$)	10 - 100	<1,000	200-2,000	2,000-8,000	<10,000	50,000

Фиг. 10



Фиг. 11

