

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037490**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.04.02

(51) Int. Cl. **G01V 1/38** (2006.01)

(21) Номер заявки
201591332

(22) Дата подачи заявки
2013.02.28

(54) СПОСОБ МОРСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

(43) **2016.04.29**

(56) US-A1-2011017543

(86) PCT/US2013/028141

US-B1-7257049

(87) WO 2014/133509 2014.09.04

US-A1-2012147699

US-A1-2004136266

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БИПИ КОРПОРЕЙШН НОРД
АМЕРИКА ИНК. (US)**

Lasse Amundsen ET AL.: "GEO Expro Marine Seismic Sources Part I", Geo ExPro, vol. 7, no. 1-2010, 28 February 2010 (2010-02-28), pages 32-34, XP055099080, London, Retrieved from the Internet: URL:[http://www.geoexpro.com/article/Marine Seismic Sources Part I/5db4dd34.aspx](http://www.geoexpro.com/article/Marine_Seismic_Sources_Part_I/5db4dd34.aspx) [retrieved on 2014-01-29], page 33, column 2, line 14-24

(72) Изобретатель:
**Харпер Марк, Деллингер Джозеф
Энтони (US)**

WO-A2-2012004587

WO-A2-2010082126

(74) Представитель:
Гизатуллина Е.М. (RU)

(57) В изобретении предлагается способ сейсмической разведки, в котором используют расположение морских источников, при котором каждый источник расположен под водой на глубине, достаточно небольшой для того, чтобы провал, вызываемый обусловленной поверхностью волной-спутником, приходился на частоту, которая больше или равна максимальной излучаемой частоте, представляющей интерес. Если морской сейсмический источник характеризуется отношением ширины полосы частот сигнала к максимальной частоте, составляющим менее 0,5, то существует возможность поместить его на большей глубине, на которой вызываемые волной-спутником провалы приходятся либо ниже, либо выше его полосы частот, не попадая в нее. Кроме того, путем расположения двух или более источников на различных глубинах для одинаковой частоты могут быть заполнены любые нежелательные провалы в диаграмме излучения, вызванные более глубоким буксированием.

B1

037490

**037490
B1**

Изобретение относится, в общем, к области сейсмической разведки и, в частности к способам сбора сейсмических и других сигналов, являющихся представительными в отношении земных недр, для целей сейсмической разведки и/или наблюдения.

Предшествующий уровень техники настоящего изобретения

Сейсмическая разведка представляет собой попытку изобразить или картировать земные недра путем послышки звуковой энергии вглубь земной поверхности и регистрации эхосигналов, возвращающихся от слоев горных пород на глубине. Источниками проходящей вниз звуковой энергии могут быть, например, взрывы или сейсмические вибраторы на суше или пневматические источники сейсмических сигналов на море. При сейсмической разведке источник энергии располагают в разных местах у поверхности Земли над интересующей геологической структурой. Каждый раз при активировании источника он создает сейсмический сигнал, который распространяется вглубь Земли. Эхосигналы, возникшие в результате сейсмического сигнала, регистрируют во множестве пунктов на поверхности Земли. Затем несколько сочетаний источников/регистрации (приема) объединяют для создания почти непрерывного профиля земных недр, который может простираться на много миль. При двумерной (2D) сейсмической разведке пункты регистрации (приема) обычно располагают вдоль одной линии, а при трехмерной или объемной (3D) сейсмической разведке пункты регистрации (приема) распределяют по поверхности сеткой. Проще говоря, 2D сейсмический профиль можно рассматривать как дающий картину поперечного сечения (вертикальный срез) слоев земных недр в том виде, как они залегают непосредственно под пунктами регистрации (приема). 3D сейсмическая разведка дает "куб" или объем данных, то есть, по меньшей мере, концептуально, 3D картину земных недр, лежащих под площадью сейсмической разведки. Фактически как 2D, так и 3D сейсмическая разведка детально исследуют лишь некоторый объем земных недр, лежащий под площадью, охватываемой сейсмической разведкой. Наконец, четырехмерная (4D) (или повторяющаяся во времени) сейсмическая разведка это сейсмическая разведка, которая проводится над одной и той же площадью в два или более разных моментов времени. Очевидно, при сравнении последовательных изображений земных недр любые наблюдаемые изменения (принимая во внимание то, что учтены различия в форме импульсы источника, приемниках, регистраторах, условиях окружающего шума и т.д.) будут приписаны изменениям в земных недрах.

Результат сейсмической разведки состоит из очень большого числа отдельных сейсмических записей или сейсмограмм. Цифровые образцы на сейсмических трассах обычно получают с интервалами 0,002 с (2 миллисекунды или "мс"), хотя распространенными являются и интервалы дискретизации 4 и 1 мс. Стандартные значения длины трасс составляют 5-16 с, что соответствует 2500-8000 образцам при 2 мс интервале. Как правило, каждая трасса осуществляет регистрацию одной активации сейсмического источника, так что для каждого имеющегося сочетания источник-приемник существует одна трасса. При обычной 2D сейсмической разведке обычно будут несколько десятков тысяч сейсмограмм, а при 3D сейсмической разведке число отдельных сейсмограмм может достигать нескольких миллионов. В источнике *Seismic Data Processing*, Ozdogan Yilmaz, Society of Exploration Geophysicists, 1987, Chapter 1, pages 9-89, раскрывается общая информация, касающаяся обычной 2D-обработки, и этот документ ссылкой включается в настоящее описание. Общую базовую информацию, относящуюся к сбору и обработке 3D данных, можно найти в источнике Yilmaz, Chapter 6, pages 384-427, описание которого ссылкой включается в настоящее описание.

Сейсмические источники с регулируемой частотой представляют собой источники, которые являются настраиваемыми для генерирования множества различных форм импульса источника. К ним относятся источники свип-сигнала, которые испускают синусоидальный сигнал, амплитуда и частота которого могут независимо регулироваться. К примерам подобных источников относятся наземные и морские сейсмические вибраторы. Источники свип-сигнала могут быть лучше стандартных импульсных сейсмических источников для некоторых практических применений в области геофизики, например, чтобы минимизировать помехи для близлежащего оборудования путем минимизации пикового акустического давления, испускаемого источниками. Способность точного управления частотным спектром источника также является полезной, так как она позволяет так оптимизировать источник, чтобы он наиболее подходил для конкретной решаемой задачи отображения. Обычно морские сейсмические источники свип-сигнала размещают на глубине таким образом, чтобы спектральный провал с самой низкой ненулевой частотой, вносимый отражением волны-спутника, не возникал в пределах интересующей полосы частот. Например, источник с верхней частотой 100 Гц не будет расположен глубже приблизительно 7,5 м.

Хотя сейсмические источники с регулируемой частотой являются весьма полезными в определенных контекстах, они не лишены недостатков. Например, для того чтобы группа источников с регулируемой частотой соответствовала по выделяемой энергии группе пневматических источников, акустическое давление на передних поверхностях индивидуальных источников, скорее всего, будет очень высоким (более одного бара). Если группа источников расположена в воде на небольшой глубине (например, 7,5 м), во время сбора данных сейсмического исследования вблизи источников может возникнуть кавитация. Под термином "кавитация" следует понимать формирование каверн (пузырьков вакуума или пара низкого давления) в жидкости и последующее их разрушение. Разрушение генерирует ударную волну в результате схлопывания пузырьков и волну (волны) гидродара, воздействие которых будет восприниматься и регистрироваться гидрофонами, которые предназначены для сбора данных сейсмического ис-

следования. Возникающая в результате волна гидроудара вносит искажения и помехи в регистрируемый сейсмический сигнал, что усложняет получение четкого изображения земных недр.

Кавитация, возникающая во время морского сейсмического исследования, изменяет акустический выходной сигнал группы источников, делая его менее управляемым; создает широкополосный шум, который является нежелательным с точки зрения окружающей среды; и может вызвать повреждение самих источников. Одна технология, которая ранее применялась для минимизации кавитации, предусматривает распределение интересующей полосы частот среди множества источников, при этом каждый источник в группе буксирится на оптимальной глубине для его диапазона частот. Тем не менее, кавитация часто присутствует в случае наличия в группе высокочастотных источников, которые должны буксироваться ближе всего к поверхности (т.е. с наименьшей глубиной).

До настоящего времени, что хорошо известно в области сбора и обработки сейсмических данных, существует потребность в разработке системы и способа, которые обеспечивают снижение вероятности возникновения кавитации или полностью устраняют ее в группах морских сейсмических источников с регулируемой частотой, и которым не присущи известные недостатки. Соответственно, следует признать, как было признано авторами настоящего изобретения, что существует (и существует уже некоторое время) реальная необходимость в способе обработки сейсмических данных, который будет направлен на вышеупомянутые проблемы и решит их.

Последующее описание настоящего изобретения вместе с прилагаемыми фигурами не должны истолковываться как ограничивающие настоящее изобретение показанными и описанными примерами (или предпочтительными вариантами осуществления). Это является таковым, поскольку специалисты в области, к которой относится настоящее изобретение, смогут придумать новые формы настоящего изобретения в объеме прилагаемой формулы изобретения.

Краткое раскрытие настоящего изобретения

В соответствии с предпочтительным аспектом настоящего изобретения предлагается система и способ сбора сейсмических данных с использованием сейсмического источника с регулируемой частотой/группы сейсмических источников с регулируемой частотой.

Более конкретно, общеизвестно размещение морского сейсмического источника на глубине, достаточно небольшой для того, чтобы провал, вызываемый обусловленной поверхностью волной-спутником, приходился на частоту, которая больше или равна максимальной излучаемой частоте, которая представляет интерес. См., например, патент США № 7257049 "Method of seismic surveying, a marine vibrator arrangement, and a method of calculating the depths of seismic sources", Laws et al., 2007, раскрытие которого ссылкой полностью включено в настоящий документ, как если бы оно было изложено в этом месте. Если морской сейсмический источник характеризуется отношением ширины полосы частот сигнала к максимальной частоте, составляющим менее 0,5, то существует возможность поместить его на большей глубине, так что вызываемые волной-спутником провалы приходятся либо ниже, либо выше его полосы частот, не попадая в нее. Это может быть преимущественным при размещении источников с регулируемой частотой и, в частности, источников свип-сигнала, так как снижается риск возникновения кавитации.

При надлежащем выборе источников с ограниченной полосой частот глубины могут быть подобраны таким образом, чтобы они были приблизительно равны, что является преимущественным для буксирования. Путем расположения двух или более источников на различных глубинах для одинаковой частоты могут быть заполнены любые нежелательные нулевые провалы в диаграмме излучения, вызванные более глубоким буксированием.

Выше в общих чертах описаны более важные признаки изобретения, раскрытого в настоящем описании, чтобы можно было легче понять последующее подробное описание и можно было лучше оценить вклад авторов настоящего изобретения в уровень техники. В своем применении настоящее изобретение не ограничивается деталями конструкции и компоновками компонентов, изложенными в последующем описании или проиллюстрированными на фигурах. Напротив, настоящее изобретение может иметь и другие варианты осуществления и может осуществляться различными иными путями, конкретно не перечисленными в настоящем описании. Наконец, следует понимать, что фразеология и терминология, используемые в настоящем описании, служат лишь цели описания и не должны рассматриваться как ограничивающие объем настоящего изобретения, если в описании объем изобретения конкретно не ограничивается таким образом.

Краткое описание фигур

Другие цели и преимущества настоящего изобретения станут очевидными при прочтении последующего подробного описания со ссылками на фигуры, где

на фиг. 1 представлены типичные условия обработки данных согласно настоящему изобретению;

на фиг. 2 представлена последовательность обработки, которая подходит для использования с данными, полученными при помощи настоящего изобретения;

на фиг. 3 представлен график размещения полос частот волн-спутников в зависимости от глубины и частоты источника. Центральная линия каждой полосы частот волн-спутника указывает на сочетания частоты и глубины, при которых нисходящая энергия из источника максимально выигрывает от конструктивного суммирования с волной-спутником источника, отраженной от морской поверхности. Более

широкие полосы частот волн-спутников относительно центральных линий указывают на диапазон частот и глубин, в пределах которого нисходящая энергия из источника не будет чрезмерно затухать в результате суммирования с ее волной-спутником;

на фиг. 4 представлено изображение одной возможной конфигурации группы источников свип-сигнала;

на фиг. 5A-5D представлены двумерные диаграммы излучения для различных полос частот волн-спутников;

на фиг. 6 представлено изображение возможной группы источников свип-сигнала, в которой парные источники расположены на различных глубинах, чтобы увеличить эффективность большого удаления группы;

на фиг. 7 представлены изображения диаграмм излучения в шести точках на полосе частот волны-спутника для одного источника;

на фиг. 8 представлены изображения диаграмм излучения в шести точках на полосе частот волны-спутника для пары источников;

на фиг. 9 представлены конфигурации источников, подходящие для применения с настоящим изобретением.

Подробное раскрытие настоящего изобретения

Хотя настоящее изобретение может быть осуществлено во многих различных формах, на фигурах показаны и будут подробно описаны ниже некоторые конкретные варианты осуществления настоящего изобретения. Тем не менее, следует понимать, что настоящее раскрытие должно рассматриваться как пояснение принципов изобретения и не предназначено для ограничения изобретения конкретными описанными вариантами осуществления или алгоритмами.

На фиг. 1 представлены общая среда, в которой настоящее изобретение обычно будут использовать. На стадии 110 геологоразведчик проектирует сейсмические исследования для покрытия района земных недр, интересующего с экономической точки зрения. В связи с этой стадией обычно выбирают параметры полевых сейсморазведочных работ (например, места возбуждения и расположения приемников и интервалы между ними, расстояние между профилями, кратность и т.д.), хотя в полевых условиях идеальные параметры проектирования обычно немного (или существенно) изменяют с учетом реалистичности проведения сейсморазведки.

Сейсмические данные (т.е., сейсмические трассы) собирают на стадии 120 над объектом земных недр потенциальной экономической важности и после этого обычно посылают их в центр обработки 150, где сейсмотрассы будут обрабатывать с использованием различных алгоритмов, чтобы сделать их более подходящими для использования в геологоразведке. В некоторых случаях, возможно, что некоторую часть начальной обработки данных выполняют, когда данные еще в поле (не переданы), и такая практика становится все более распространенной и осуществимой, учитывая вычислительные возможности, доступные полевым партиям. Как правило, настоящее изобретение будет реализовано как часть стадии 120 сбора данных, хотя, по меньшей мере, экспериментальная схема расположения сейсмических источников, скорее всего, будет определена на стадии 110 проектирования.

В центре обработки сейсмические трассы, как правило, обрабатывают посредством многочисленных подготовительных процессов 130 для того, чтобы указанные трассы были готовы для применения геологоразведчиком. После этого обработанные трассы будут доступны для применения в настоящем изобретении и могут быть сохранены, например, на жестком диске, магнитной ленте, магнитно-оптическом диске, диске-DVD или других устройствах хранения данных большой емкости.

По меньшей мере часть настоящего изобретения будет наилучшим образом реализована в форме компьютерной программы 140, которую загружают в программируемый компьютер в центре обработки 150, где она будет доступна сейсмическому интерпретатору или процессору. Следует отметить, что центр обработки 150, подходящий для использования в настоящем изобретении, обычно включает в себя мэйнфреймы, сервера, автоматические рабочие места (АРМ) или сверхбольшие ЭВМ и, более обще, компьютер или сеть компьютеров, которые обеспечивают параллельные и массово параллельные вычисления, причем вычислительную нагрузку распределяют между двумя или более процессорами. Кроме того, как показано на фиг. 1, в предпочтительной компоновке некоторый вид модели 160 оцифрованной зоны интереса может оговариваться пользователем и предусматриваться в качестве входных данных в компьютерную программу обработки. В случае 3D сейсмического разреза модель 160 зоны интереса обычно будет содержать данные относительно горизонтального простираения и мощности (которые могут быть переменными и могли быть измерены в разное время, на разной глубине, при разной частоте и т.п.) объекта земных недр. Для настоящего изобретения точные средства, посредством которых эти зоны создают, регистрируют, оцифровывают, хранят и затем считывают при исполнении программы, не важны, и специалистам будет ясно, что это можно проделать некоторым числом способов.

Компьютерная программа 140, которая может быть пригодна для реализации некоторой части настоящего изобретения (например, программа моделирования), может быть передана в компьютер, то есть, для ее исполнения, при помощи гибкого диска, магнитного диска, магнитной ленты, магнитно-оптического диска, оптического диска, компакт-диска (CD-ROM), цифрового видеодиска (DVD), платы

ОЗУ, флэш-ОЗУ, карты ОЗУ, чипа ППЗУ или может быть загружена по сети. В типичных условиях обработки сейсморазведочных данных аспекты постобработки в соответствии с настоящим изобретением могут быть выполнены как часть большего комплекта модулей программного обеспечения, которые разработаны для считывания исходных сейсмических данных и выдачи обработанных сейсмических трасс. После процесса сбора, выполняемого согласно предлагаемым способам, полученные трассы могут быть, как правило, сохранены в подборки сейсмозаписей, суммированы и отображены на компьютерном мониторе 170 с высоким разрешением или в документальном виде как отпечатанный сейсмический разрез или карта 180. Затем интерпретатор сейсмических данных может использовать отображенные изображения в помощь себе при идентификации подземных особенностей, способствующих образованию, миграции или аккумуляции углеводородов.

Как отмечено выше, некоторые аспекты настоящего изобретения предпочтительно будут составлять часть стандартного графа обработки сейсмических данных, а также будут встроены в него, при этом общая схема стандартного графа представлена на фиг. 2.

Специалистам в данной области техники будет понятно, что стадии обработки, изображенные на этой фигуре, являются лишь широкими примерами видов процессов, которые могут быть выполнены в отношении подобных данных, при этом выбор и порядок стадий обработки, а также применяемые конкретные алгоритмы могут заметно изменяться в зависимости от индивидуального процессора сейсмических данных, источника сигнала (динамит, вибратор и т.п.), места проведения сейсморазведки (суша, море и т.п.) для сбора данных, осуществляющей обработку данных компании и т.п.

В качестве первой стадии, как в целом представлено на фиг. 2, двухмерную и трехмерную сейсмическую разведку проводят над конкретным объемом земных недр (стадия 210). Данные, собранные в полевых условиях, состоят из несуммированных сейсмических трасс (т.е. необъединенных), которые содержат цифровую информацию, которая характеризует объем земных недр, находящихся под районом, охватываемым сейсморазведкой. Общие способы, при помощи которых такие данные собирают и преобразовывают в форму, подходящую для использования процессорами и интерпретаторами сейсмических данных, хорошо известны специалистам в данной области техники.

Цель сейсмической разведки заключается в сборе группы пространственно связанных сейсмических трасс над объектом земных недр потенциальной экономической важности. Данные, собранные способами, раскрытыми в настоящем документе, могут состоять, лишь в качестве примера, из несуммированного 2-D сейсмического профиля, несуммированного 2-D сейсмического профиля, извлеченного из данных 3-D сейсмической разведки, или предпочтительно несуммированной 3-D части из данных 3-D сейсмической разведки. Раскрытое в настоящем документе изобретение является наиболее эффективным при использовании для сбора группы суммированных сейсмических трасс, которые характеризуются базовым пространственным расположением в отношении некоторой геологической особенности земных недр. Снова лишь в целях иллюстрации, последующее обсуждение будет выполняться в контексте трасс, включенных в состав данных 3-D сейсморазведки (после суммирования или до суммирования), хотя, предположительно, могут использоваться любые наборы пространственно связанных сейсмических трасс.

При проведении морской сейсморазведки такие данные, как правило, собирают при помощи морских сейсмических исследований с буксируемыми косоми. В стандартной компоновке сейсморазведочное судно тянет за собой несколько кабелей с гидрофонами (т.е. несколько так называемых сейсмических кос), перемещаясь над интересующей зоной земных недр. Как правило, каждая сейсмическая коса будет содержать несколько сотен гидрофонов, которые выполнены для обнаружения сейсмических сигналов, которые были отражены от подповерхностных горных пород и других гравитационных границ.

Сейсмический источник (который может буксироваться этим же судном и располагаться непосредственно за ним) активируют через периодические интервалы. Испускаемая источником энергия распространяется вниз через толщу воды и проникает в океанское дно, где она, в конце концов, сталкивается с подповерхностными горными породами, которые отразят часть нисходящей энергии обратно к приемникам. Регистрация сейсмических записей осуществляется гидрофонами, которые установлены на сейсмической косе, в течение короткого периода времени после активации источника (например, от 10 до 20 с) с эталонным интервалом (интервалом между пробами), который, как правило, выбирает оператор.

После сбора сейсмических данных (стадия 210) указанные сейсмические данные, как правило, передают в центр обработки, в котором указанные данные будут подвергнуты некоторым начальным или подготовительным стадиям обработки. Как представлено на фиг. 2, общая начальная стадия 215 предназначена для редактирования исходных сейсмических данных в порядке подготовки к последующей обработке (например, демультимплексирование, восстановление усиления, формирование формы сейсмического сигнала, удаление забракованных сейсмических трасс и т.п.). Это может сопровождаться определением геометрических характеристик сейсмологической разведки (стадия 220), а также сохранением количества возбуждений/приемников и положения на поверхности как части каждого заголовка сейсмической трассы. После определения геометрических характеристик обычно выполняют анализ скоростей и осуществляют коррекцию кинематических поправок для выполнения коррекции каждой трассы во времени для того, чтобы учесть временные задержки поступления сигналов, вызванные удалением.

После завершения начальной обработки до суммирования обычно выполняют кондиционирование сейсмического сигнала на несуммированных сейсмических трассах перед созданием суммированных (или объединенных) объемов данных (стадия 230). На фиг. 2 стадия 230 предусматривает типичную последовательность обработки - "Обработка сигналов/Кондиционирование/Отображение", но специалистам в данной области техники будет понятно, что многочисленные альтернативные процессы могут быть использованы вместо процессов, представленных на этой фигуре. В любом случае, конечная цель с точки зрения геологоразведчика заключается в создании суммированного объема сейсмических данных или, в случае двумерных данных, суммированного сейсмического профиля для использования в разведке углеводородов, залегающих в земных недрах.

Как дополнительно предложено на фиг. 2, любой цифровой образец в суммированном объеме сейсмических данных уникально идентифицирован тремя значениями (X; Y; ВРЕМЯ), при этом координаты X и Y представляют некоторое положение на земной поверхности, а координата времени определяет зарегистрированное время поступления в сейсмической трассе (стадия 240). В целях конкретики, предположим, что направление X соответствует направлению "вдоль профиля", а измерение Y соответствует направлению "поперек профиля", при этом термины "вдоль профиля" и "поперек профиля" хорошо известны в данной области техники. Хотя значение времени является предпочтительным и наиболее широко используемой единицей измерения для вертикальной оси, специалистам в данной области техники хорошо известно, что существует возможность преобразовать сейсмические трассы так, чтобы в них использовались одни единицы измерения для некоторой оси (например, единицы измерения времени) вместо других единиц (например, единиц измерения глубины) при помощи стандартных математических методов преобразования.

Геологоразведчик может осуществить начальное интерпретирование 250 полученного в результате суммированного объема данных, при этом он обнаруживает и идентифицирует основные отражающие горизонты и разломы, где они имеют место в наборе данных. Это может сопровождаться дополнительным улучшением 260 качества суммированных или несуммированных сейсмических данных и/или генерированием атрибутов (стадия 270) из них. Нередко геологоразведчик будет пересматривать свое начальное интерпретирование в свете дополнительной информации, полученной в результате стадий улучшения качества данных и генерирования атрибутов (стадия 280). На конечной стадии геологоразведчик будет, как правило, использовать информацию, полученную из сейсмических данных, совместно с другими видами данных (такими как магниторазведка, гравиметрическая разведка, данные спутника для сбора информации о природных ресурсах Земли (LANDSAT), региональные геологические исследования, каротажные диаграммы, анализы керна и т.п.) для определения местоположения структурных или стратиграфических особенностей, способствующих образованию, миграции или аккумуляции углеводородов (например, стадия генерирования 290 перспективных участков).

В соответствии с первым вариантом осуществления настоящего изобретения предлагается способ морского сбора сейсмических данных, который позволяет буксировать источник свип-сигнала достаточного глубоко для того, чтобы предотвратить кавитацию, и одновременно устранять вызываемый волной-спутником провал, который обычно создает проблемы при осуществлении морских сейсмических разведок с глубокой буксировкой источников.

Рассмотрим для разъяснения следующий пример, в морской среде восходящие волны, испускаемые источником, отражаются от поверхности океана и регистрируются погруженными приемниками. Это нежелательное вступление отраженной волны именуют вступлением волны-спутника. Вступление волны-спутника характеризуется относительно небольшим запаздыванием относительно нисходящей первичной волны источника и, вместо того, чтобы появляться в качестве отдельного (и отделяемого) вступления волны в записи сейсмических данных, перекрывается с однократно отраженными волнами. Получаемый в результате смешанный сигнал характеризуется провалами в амплитудном спектре на частоте, которая зависит от глубины размещения источника. Разумеется, если глубина размещения источника изменяется во время разведки (что может происходить, например, при наличии поверхностных волн), провалы будут иметь тенденцию изменяться по частоте во времени. Оптимальная глубина расположения источника обычно является компромиссом между перемещением вызываемого волной-спутником провала за пределы сейсмического диапазона частот и устранением воздействия приповерхностных волн. Таким образом, управление глубиной расположения источника является важным при проведении морских разведок.

Вызванные волной-спутником провалы вызывают разделение спектра излученного вниз звука на полосы, разделенные равно разнесенными частотами, на которых энергия излученного вниз звука равна нулю или сильно рассеяна. Частоты режекции (провалов) обычно вычисляют при помощи следующей формулы:

$$f(n, d) = \frac{n * c}{2 * d},$$

где c - скорость звука в воде (обычно 1500 м/с), d - глубина расположения источника, n - положительное целое число или ноль. Для целей настоящего раскрытия полоса частот между f(0, d) и f(1, d) будет именоваться первой полосой частот волны-спутника, полоса частот между f(1, d) и f(2, d) будет име-

новаться второй полосой частот волны-спутника и т.д. Следовательно, например, источник, который расположен на глубине 50 м, находится в первой полосе частот волны-спутника от 0 до 15 Гц, второй полосе частот волны-спутника от 15 до 30 Гц и третьей полосы частот волны-спутника от 30 до 45 Гц.

На фиг. 3 представлены полосы частот волн-спутников в зависимости от глубины и частоты. Горизонтальные линии 301 и 302 представляют два стандартных широкополосных источника, которые расположены соответственно на глубинах 15 и 19 м. Жирной черной линией "Полоса частот волны-спутника 1" 310 показана наименьшая оптимальная глубина буксировки в зависимости от частоты. На этой оптимальной глубине буксировки прямая нисходящая волна, испускаемая источником, и волна-спутник совпадают по фазе, и амплитуда сигнала источника плюс волна-спутник ("коэффициент усиления исходного сигнала") достигает своей максимальной величины, равной 2. Эта кривая отмечает центр полосы частот волны-спутника 1. Встречающийся провал для более высоких частот или более высоких значений глубины изображен пунктирной линией 320. Нисходящая энергия источника с этой частотой и глубиной гасится волной-спутником, так как фаза волны-спутника на 180° отличается от фазы источника. Иначе говоря, коэффициент усиления исходного сигнала равен 0. Эта частота режекции отмечает границу между смежными полосами частот волн-спутников.

На практике желательно избегать сближения с провалом. Конечная ширина полосы вблизи первого провала на фиг. 3 показывает границы, при которых коэффициент усиления исходного сигнала меньше 0,5. Это "зона провала" для минимально допустимого коэффициента усиления исходного сигнала, составляющего 0,5. Следует отметить, что также существует нулевой провал на нулевой глубине для всех частот или на нулевой частоте для всех глубин. Кривая 330 показывает минимальную частоту и глубину, на которых коэффициент усиления исходного сигнала составляет приблизительно 0,5, представляя верхнюю границу зоны нулевого провала.

В идеальном варианте сейсмический источник должен быть расположен на такой глубине d , чтобы ни одна из частот режекции $f(n, d)$ не находилась в диапазоне частот, в котором желательно излучение нисходящих волн источником. Таким образом, например, на фиг. 3, если использовали только близповерхностный широкополосный источник 301, он имел бы пригодный для работы диапазон частот приблизительно от 5 до 45 Гц. Стратегия по устранению этого ограничения заключается в наличии широкополосных источников, расположенных на двух различных глубинах, чтобы их зоны провала не перекрывались для любой частоты, как показано на примере широкополосных источников 301 и 302 на фиг. 3. Следует отметить, что при использовании двух источников должен существовать некоторый путь разделения их сигналов, чтобы они могли быть обработаны отдельно, а затем объединены. Существует множество возможных путей для достижения этого. См., например, заявку на выдачу патента США № 2010/0008184 "Method for acquiring and processing marine seismic data to extract and constructively use the up-going and down-going wave-fields emitted by the source(s)", Hegna and Parks, 2010, раскрытие которой ссылкой полностью включено в настоящий документ, как если бы оно полностью было изложено в этом месте.

Настоящее изобретение достигает этой цели новым путем, а именно путем использования источников свип-сигнала с индивидуальными полосами частот, которые не являются идентичными, например группы источников, в которой по меньшей мере один из источников генерирует сейсмический сигнал на относительно высокой частоте и по меньшей мере один из источников генерирует сейсмический сигнал на относительно низкой частоте.

В соответствии с одним вариантом осуществления более высокочастотные источники помещают в более высокие полосы частот волн-спутников и, следовательно, располагают на больших глубинах для того, чтобы избежать кавитации. Любой источник может быть помещен в любую полосу частот волны-спутника, которая, по меньшей мере, приблизительно отвечает двум следующим критериям: полоса должна быть достаточно широкой для того, чтобы включать весь диапазон частот, которые желательно или предположительно будет излучать источник, и глубина расположения источника должна быть достаточной для того, чтобы устранить возникновение кавитации. Чем больше ширина полосы частот источника, тем большее ограничение возможных глубин буксирования по первому критерию.

Исключительно в иллюстративных целях математическая сторона вопроса будет упрощена путем рассмотрения случая с минимальным коэффициентом усиления исходного сигнала, составляющим 0. Рассмотрим фиг. 3, источник, испускающий волны на частоте 20 Гц, находится в пределах первой полосы частот волны-спутника от поверхности до глубины 37,5 м, второй полосы частот волны-спутника от 37,5 до 75 м и третьей полосы частот волны-спутника от 75 до 112,5 м. Аналогично, источник, испускающий волны на частоте 30 Гц, находится в пределах первой полосы частот волны-спутника от поверхности до глубины 25 м, второй полосы частот волны-спутника от 25 до 50 м и третьей полосы частот волны-спутника от 50 до 75 м. Теперь рассмотрим источник свип-сигнала, который излучает волны в диапазоне 20-30 Гц. Он должен оставаться в пределах одной и той же полосы частот волны-спутника для всех частот от 20 до 30 Гц для того, чтобы не иметь провала в своей ширине полосы частот. Сравнив диапазоны глубин полос частот волны-спутника для 20 и 30 Гц, мы увидим, что этот источник полностью лежит в пределах первой полосы частот волны-спутника для глубин буксирования от поверхности до глубины 25 м, а также полностью лежит в пределах второй полосы волны-спутника от 37,5 до 50 м.

Источник, который излучает только волны с частотами 20-30 Гц, соответствует третьей полосе частот волны-спутника только на глубине буксирования 75 м. Для более реалистичного минимального коэффициента усиления исходного сигнала, составляющего 0,25 или 0,5, третья полоса частот волны-спутника не будет использоваться. Тем не менее, если уменьшить ширину полосы частот источника, то третья полоса частот расширится и станет пригодной для использования.

Чем меньше ширина полосы частот, тем больше количество полос частот волны-спутника может быть использовано. Таким образом, сложность применения одного широкополосного источника можно увидеть в следующем: для устранения провалов источник необходимо буксировать на такой достаточно малой глубине, чтобы весь его диапазон частот лежал в пределах первой полосы частот волны-спутника. Для некоторых типов источников это глубина является недостаточной большой, чтобы устранить возникновение кавитации.

Если ни одна из полос частот волны-спутника не отвечает обоим критериям (достаточная ширина для размещения диапазона частот, достаточная глубина для устранения возникновения кавитации) для данного источника, то согласно некоторым вариантам осуществления этот источник будет заменен двумя более узкополосными источниками, и критерии будут повторно применены к каждому из источников. Если группа состоит из источников, характеризующихся равной шириной полосы частот с неперекрывающимися полосами (за исключением, возможно, небольшой переходной зоны между соседними полосами частот), то более высокочастотные источники могут функционировать в более высоких полосах частот волны-спутника, в результате чего указанные источники могут быть расположены на равных или приблизительно равных глубинах.

На фиг. 4 представлен графический пример того, как это может быть выполнено. Следует отметить, что гиперболы, представленные на фиг. 3, стали прямыми линиями в результате откладывания частоты и глубины на графике с логарифмическим масштабом на обеих осях. Такое отображение позволяет гораздо легче визуализировать методику. В этом примере минимальный приемлемый коэффициент усиления исходного сигнала составляет 0,25, в результате чего зоны провалов будут несколько более узкими по сравнению с примером, изображенными на фиг. 3. Источник 401 буксируют на глубине 37,75 м, при этом указанный источник охватывает полосу частот волны спутника 1. Этот источник недоступен для источника 402, буксируемого на глубине 40,9 м в полосе частот волны-спутника 2, при частоте 19,3 Гц. Источник 402, в свою очередь, недоступен для источника 403, буксируемого на глубине 42,6 м в полосе частот волны-спутника 3, при частоте 36,4 Гц, и так далее до источника 406, находящегося в полосе частот волны-спутника 6, частота которого простирается почти до 100 Гц. В приведенной ниже табл. 1 представлен список диапазонов частот и глубин всех шести источников. Указанная группа источников охватывает без промежутков диапазон частот от 10 до 100 Гц. Для равнения стандартный широкополосный источник, охватывающий диапазон частот от 10 до 100 Гц, необходимо буксировать на глубине не более 7,5 м - глубине первого провала на 100 Гц.

Таблица 1

Источник	Полоса частот волны-спутника	Верхняя частота (Гц)	Нижняя частота (Гц)	Глубина (м)
406	6	100	84,5604	45,2968
405	5	84,5604	68,8725	44,5797
404	4	68,8725	52,8686	43,6993
403	3	52,8686	36,4322	42,5523
402	2	36,4322	19,3289	40,8885
401	1	19,3289	10,0	37,7509

Предшествующий анализ относится к вертикально распространяющимся волнам, что является хорошим приближением при расположении источников и приемников на небольшом расстоянии друг от друга, т.е. для так называемого "сбора сейсмических данных с небольшим удалением". Для записей при более значительных удалениях (более нормы) мы должны также рассмотреть невертикальное распространение, что дополнительно усложняет проектирование сбора сейсмических данных.

Источники, расположенные стандартно (в первой полосе волны-спутника), излучают максимальное количество акустической энергии вниз (при угле падения 90° или угле 0° от вертикали), которая плавно падает со снижением угла падения до нулевой амплитуды для энергии, перемещающейся горизонтально (угол падения 0° градусов или угол 90° от вертикали). Напротив, источник, расположенный в n-й полосе частот волны-спутника, характеризуется более сложной диаграммой излучения, при этом n-1 углов падения с нулевой амплитудой (без учета горизонтали) разделены n долями с большими амплитудами. На фиг. 5 представлены диаграммы излучения для источников в центрах полос частот волны-спутника 1-4, на которых представлены провалы для невертикального распространения, которые возникают для более глубоких полос частот волны-спутника.

В случае некоторых практических применений эта более сложная диаграмма излучения может не вызывать никаких сложностей. Например, более высокие частоты затухают относительно быстро с уве-

личением расстояния и, следовательно, при относительно высоких частотах только энергия, характеризующаяся по существу вертикальным направлением распространения, может вызывать интерес, в этом случае провалы при более значительных удалениях на этих частотах не будут иметь значение. Для некоторых алгоритмов, таких как инверсия с учетом формы импульса, указанные провалы могут не вызвать сложностей при условии, что они надлежащим образом учтены на стадии моделирования алгоритма. Провалы в диаграмме излучения являются лишь еще одной характеристикой источника, которую учитывает указанная инверсия.

Если диаграмма излучения является неприемлемой для данного диапазона частот, можно получить эти частоты при помощи источников на двух (или более) различных глубинах, выбранных таким образом, чтобы по меньшей мере один источник адекватно испускал каждую требуемую частоту при каждом требуемом угле падения. Следует отметить, что источники на различных глубинах могут разделить частоты среди полос одинаково или по-разному. Простейшее решение заключается в сборе данных в два (или более) захода, при этом во время каждого захода источники будут находиться на различных глубинах.

Альтернативно, источники на различных глубинах можно отличить друг от друга во время сбора сейсмических данных (например, по времени, расположению, форме импульсы источника или схеме возбуждения). Требуемая диаграмма излучения (или диаграммы излучения) могут быть синтезированы цифровым путем в компьютере как часть предварительной обработки сейсмических данных с использованием технологий, предложенных, например, в документе WO 2012/078966 A2, "Distance- and frequency-separated swept-frequency seismic sources", Dellinger and Abma, 2010, в котором источники отличаются по частоте и расположению, или в документе US 2010008184, "Method for acquiring and processing marine seismic data to extract and constructively use the up-going and down-going wave-fields emitted by the source(s)", Hegna and Parks, 2010, в котором источники отличаются по временной схеме инициирования, раскрытия которых ссылкой полностью включены в настоящий документ, как если бы они были изложены в этом месте. Источники свип-сигнала также могут быть отличены друг от друга при помощи направления свип-сигнала и длительности свип-сигнала. Источники с формами колебаний, управление которыми может быть выполнено с высокой точностью, например, подводные громкоговорители, могут быть отличены друг от друга посредством их возбуждения с ортогональной псевдослучайной последовательностью.

На фиг. 6 представлен пример группы из шести источников, охватывающих диапазон 1-80 Гц, так что не существует провалов для углов от вертикали до 60°, при этом все источники буксируют на глубинах от 40 до 60 м и минимальный коэффициент усиления исходного сигнала для всех частот и углов падения в пределах этих ограничений составляет 0,5. В табл. 2 пронумерованы шесть источников в этой группе.

Таблица 2

Источник	Полоса частот волны-спутника	Верхняя частота (Гц)	Нижняя частота (Гц)	Глубина (м)
645	4-6	83,08	43,24	49,30
640	4-6	83,08	43,24	53,44
635	2-3	43,24	16	43,10
630	2-3	43,24	16	50,65
620	1	16	4	40
610	1	4	1	60

На фиг. 6 источники 610 и 620 находятся в пределах первой (стандартной) полосы частот волны-спутника. Следует отметить, что разделение первой полосы частот волны-спутника между двумя источниками позволит покрыть более широкий диапазон частот в пределах первой полосы частот волны-спутника. Согласно стандартной стратегии эту тенденцию следует продолжить для более высоких частот, размещая источники на все более мелкой глубине при следовании по первой полосе частот волны-спутника к более высоким частотам. Однако на более высоких частотах, в случае неимпульсных источников, возникла бы проблема, связанная с появлением нежелательной кавитации. Вместо этого в настоящем раскрытии было принято решение поместить источник 630 с частотой 16 Гц во вторую полосу волны-спутника, в результате чего этот источник будет размещен на большей глубине, а не на меньшей глубине.

Источник 630 спарен со вторым источником 635. Здесь отношение значений глубин между ними выбрано таким образом, чтобы источник 635 располагался на менее глубокой границе зоны провала, вызываемого волной-спутником, между полосами частот волны-спутника 1 и 2, а источник 630 располагался на более глубокой границе этой зоны провала, вызываемого волной-спутником. Это является минимальным разделением по глубине, обеспечивающим покрытие на каждой частоте по ширине полосы частот этих источников (обозначено позицией 660 на фиг. 6). Следует отметить, что если два источника по-

крывают некоторую частоту, то граничные значения глубины источников будут менее ограничены; необходимо лишь убедиться в том, что один или другой источник надлежащим образом покрывает каждую частоту. Ограничено лишь минимальное удаление по глубине (выраженное как отношение глубин) между двумя источниками с одинаковой частотой.

Для неперпендикулярного распространения глубину источника эффективно умножают на косинус угла от вертикали. На графике с логарифмическим масштабом на обеих осях, подобном графику на фиг. 6, умножение на постоянный коэффициент масштабирования глубины соответствует постоянному вертикальному смещению. Косинус 60° равняется 0,5, следовательно, для распространения под углом 60° от вертикали глубины источников эффективно уменьшаются в два раза. Указанное смещение изображено при помощи пунктирных линий 611, 621, 631, 636, 641 и 646, которые соответствуют сплошным линиям 610, 620, 630, 635, 640 и 645, но для распространения под углом 60° от вертикали. Следует отметить, что минимальное отношение 660 глубин, которое охватывает зону провала между полосами частот волны-спутника 1 и 2, остается неизменным после смещения, т.е. на фиг. 6 значение вертикального разделения между источниками 630 и 635 (660) остается таким же, как вертикальное разделение между источниками 631 и 636 (также 660). Это является минимальным разделением; отметим, что могут быть использованы и большие значения.

Источники 630 и 635 недоступны для источников 640 и 645 при 43,24 Гц. Эти источники разнесены на некоторое расстояние (отмеченное позицией 670 на фиг. 6) по глубине таким образом, чтобы охватывать зону провала между полосами частот волны спутника 2 и 3, которая является самой широкой зоной провала из всех зон провала, которые должны быть охвачены этими источниками по своему диапазону частот и для углов распространения между вертикалью и 60° .

На фиг. 6 представлена методика проектирования группы источников, охватывающих желаемый диапазон частот, глубин, минимальных коэффициентов усиления исходного сигнала и углов распространения. Существует множество возможных путей выполнения этой задачи, и специалистам в данной области техники очевидно как эти принципы могут быть применены к другим спецификациям. Главное отметить зоны провалов, которые должны быть охвачены внутри диапазона частот и значений углов падения для каждого предлагаемого источника. Самая широкая из них определяет минимальное отношение глубин между источниками. Диапазоны глубин источников регулируют путем выбора того, как распределить их среди полос частот волны-спутника, а также необходимостью расположения каждого из источников достаточно глубоко под водой для предотвращения кавитации.

Хотя в этом примере источники функционируют в парах, охватывающих идентичные диапазоны частот (т.е. 630 и 635, 640 и 645), это не является обязательным для настоящего способа. Напротив, менее и более глубоко расположенные источники могут по-разному разделять частоты.

В зависимости от требуемого диапазона углов падения и частот, а также типов используемых источников, часто также представляется возможным сконструировать группу источников, которая непосредственно генерирует в полевых условиях желаемую диаграмму излучения. На фиг. 7 представлены полярные диаграммы для одного источника во второй полосе частот волны-спутника. Полярные диаграммы соответствуют различным величинам произведения kd по полосе частот волны-спутника (здесь " kd " означает произведение волнового числа k и значения глубины d , которое имеет диапазон от $(n-1)\pi$ до $n\pi$ по полосе частот волны-спутника n). Полярная диаграмма имеет провал (нуль) в вертикальном направлении при наименьшем kd ($kd=\pi$), что соответствует провалу между полосами частот волны-спутника 1 и 2. При увеличении kd этот провал разделяется на два провала по обе стороны вертикали. С повышением значения kd они отходят от вертикали, заканчивая на $\pm 60^\circ$ при самом высоком значении kd ($kd=2\pi$), когда новый провал возникает по вертикали, что соответствует провалу между полосами частот волн-спутников 2 и 3. В этом примере коэффициент усиления исходного сигнала варьирует между 0 (в области провала) и 2 (для наилучшего конструктивного суммирования).

На фиг. 8 представлено соответствующее изображение со вторым источником на двух третьих глубины первого источника и с фазовым сдвигом 90° относительно первого источника. Таким образом, в этом примере предполагается, что имеется два источника, фазами которых можно управлять. Это сочетание имеет диаграмму излучения, которая не содержит провалов на протяжении ограниченной полосы частот, покрываемой источниками (за исключением горизонтального направления, где провал является неизбежным). Здесь коэффициент усиления исходного сигнала (относительно одиночного источника) варьирует приблизительно между 1,5 и 2,7. Следует отметить, что в этом случае диаграмма излучения фактически шире, по сравнению с одиночным источником в первой полосе частот волны спутника. Следует отметить, что второй источник может также располагаться глубже первого источника, а не наоборот, как в этом примере.

Источники 402 и 412 на фиг. 4 демонстрируют конфигурацию, представленную на фиг. 8 для пары источников в полосе частот волны-спутника 2. Следует отметить, что глубина второго источника (412), кратная $2/3$ глубины первого источника (402), смещает зону провала ровно на половину ширины полосы частот указанного источника. Группа источников, изображенная на фиг. 4, может быть таким же образом усилена одиночным дополнительным источником, если желательно избежать провалов для неперпендикуляр-

ного распространения для частот до 36 Гц, но провалы при большом удалении для более высоких частот могут допускаться (поэтому имеется только один источник для этих частот).

Если существует возможность управления относительными фазами между источниками 402 и 403 в местах их соединения, ширина полосы частот источника 402 может быть увеличена (например, 422) и проходить через зону провала, чтобы ослабить влияние этого провала для диапазона углов почти вертикального распространения. Если отсутствует возможность управлять относительными фазами, то вместо этого в зоне перекрытия частот могут быть применены технологии для разделения источников, которые хорошо известны специалистам в данной области техники. Эта методика может также быть применена также в местах соединения источников 403 и 404 и источников 404 и 405 и т.д. Хотя это не позволит устранить провалы при больших удалениях, это позволит устранить провалы для почти вертикального распространения сигнала, который, вероятно, будет сигналом, представляющим интерес, в случае высокочастотных источников.

Предыдущие примеры служат для иллюстрации методик проектирования группы источников с управляемой частотой. Далее представлена информация, которая будет полезной для каждого возможного источника:

i) Максимальная амплитуда (может быть функцией временного интервала, по которому выполняется суммирование);

ii) Минимальная и максимальная применимая частота;

iii) Минимальная и максимальная рабочая глубина для каждой частоты;

iv) Возможность управления фазой источника и

v) Способность источника генерировать гармоники.

Для решаемой проблемы отображения будет полезна следующая информация:

i) Желаемые минимальная и максимальная частоты;

ii) Минимальный требуемый угол распространения без провалов (может быть функцией частоты);

iii) Минимальный интервал между местами возбуждений, необходимый на каждой частоте (при сочетании со скоростью буксировки это дает временной интервал возбуждений на этой частоте); и

iv) Необходимая полная амплитуда как функция частоты (суммированная по интервалу между местами возбуждений).

Затем, в соответствии с одним примером, желаемый частотный спектр разделяют на три режима:

i) Низкие частоты, при которых источники могут быть помещены в первую полосу частот волны-спутника, следуя стандартной практике.

ii) Промежуточные частоты, при которых требуются более высокие полосы частот волны-спутника, чтобы избежать возникновения кавитации, и требуется энергия для больших удалений.

iii) Высокие частоты, при которых требуются более высокие полосы частот волны-спутника, чтобы избежать кавитации, и требуется только энергия для небольшого удаления.

Затем источники, выбранные из имеющихся в наличии, могут быть распределены среди этих трех режимов. Источники должны быть способны производить требуемую амплитуду, суммированную по требуемому интервалу возбуждений, который зависит от требуемого минимального интервала между местами возбуждений на этой частоте, деленного на скорость буксировки. Если выбранные источники генерируют гармоники, то это факт также следует принять во внимание.

В случае низкочастотных режимов для каждой частоты, как правило, будет необходим только один источник. В большинстве случаев источники должны быть расположены так, чтобы находиться приблизительно по центру полосы частот волны-спутника, где эффективность является оптимальной. В случае высокочастотного режима опять только один источник, как правило, будет необходим для каждой частоты, возможно с некоторым перекрытием частот возле вызываемого волной-спутником провала, чтобы устранить зону провала для диапазона углов возле вертикального (а не только исключительно вертикального). В обоих случаях особое внимание должно быть уделено границам полосы частот волны-спутника.

В случае режима с промежуточными частотами следует разместить источники на двух различных глубинах для каждой частоты. Отношение глубин обычно должно быть достаточным для того, чтобы охватить наиболее широкий вызываемый волной-спутником провал, который лежит в пределах желаемого диапазона удаления для этой частоты. Если фазы источника являются регулируемыми, то может быть желательным получить желаемый ответ антенны непосредственно в полевых условиях. В ином случае технологии разделения источников могут быть применены для разделения сигналов из источников на двух различных глубинах и желаемого ответа или ответов антенны, синтезированных во время обработки на компьютере. Следует отметить, что в этом режиме диапазоны частот источника могут охватывать границы полос частот волны-спутника, так как на каждой частоте имеются источники на двух различных глубинах, не более чем один из которых будет находиться в зоне провала, вызываемого волной-спутником, на каждой частоте.

Технологии разделения источников, как правило, будут применены для предотвращения конфликта между источниками со смежными, перекрывающимися или совпадающими диапазонами частот, при этом могут быть применены технологии, предложенные, например, в документе WO 2012/078966 A2,

"Distance- and frequency-separated swept-frequency seismic sources", Dellinger and Abma, 2010, в котором отличают источники по частоте и расположению.

На фиг. 9 представлена приведенная в качестве примера иллюстрация того, как настоящее изобретение может быть применено на практике. Согласно одной компоновке сейсморазведочное судно 910 будет буксировать одну или несколько сейсмических кос 930, перемещаясь по поверхности океана 920 над представляющим исследовательский интерес объектом земных недр 926. Каждая сейсмическая коса 930 будет содержать несколько сейсмических приемников 932 (т.е. гидрофонов) в соответствии с обычной практикой. Следует отметить, что хотя на фиг. 9 представлены сейсмические косы 930, буксируемые судном, которое также буксирует сейсмические источники (рассмотренные ниже), на практике источники будут, как правило, буксироваться другим судном в соответствии с обычной практикой.

Дополнительные приемники 935 могут быть расположены на дне 925 океана или, в зависимости от природы разведки, могут быть использованы только располагаемые на дне океана приемники 935 или только буксируемые сейсмические косы 930.

Кроме того, согласно одному варианту осуществления настоящего изобретения по меньшей мере два различных типа источников будут буксироваться сейсморазведочным судном 910. Как обсуждалось ранее, предпочтительно, судно будет буксировать один или несколько низкочастотных источников 951 в сочетании с некоторым количеством источников 961 и 962, 971 и 972 и 981 с более высокой, постепенно увеличивающейся частотой. Исключительно в иллюстративных целях относительные размеры источников, изображенных на фиг. 9, отличаются для того, чтобы отразить в общих чертах их среднюю частоту. В любом случае это не должно быть истолковано в качестве требования, что на практике относительный и абсолютный размеры источников будут ограничены подобным образом.

Хотя источники изображены на фиг. 9 вертикально друг над другом, комбинированная диаграмма излучения может быть дополнительно модифицирована путем удаления второго источника в горизонтальном направлении от первого источника, что может быть использовано для получения, в случае необходимости, асимметричной диаграммы излучения.

На практике, как известно специалистам в данной области техники, может быть желательно совместное использование двух или более источников синхронизированным образом, чтобы они генерировали идентичные сигналы и совместно функционировали в качестве одного, более мощного источника.

В качестве дополнительных пояснений, специалистам в данной области техники хорошо известно, что поверхность воды по существу является отражающей границей, которая отражает давление с изменением полярности (т.е. поскольку давление на поверхности равно нулю, восходящие волны плюс нисходящие волны должны давать здесь в сумме нуль, и, следовательно, восходящие и нисходящие волны должны быть равны, но иметь противоположное направление).

Как следствие, если "d" является глубиной источника, настоящую ситуацию можно представить в качестве гомогенной среды с анти-источником на расстоянии "2d" над фактическим источником. В этом случае провал создается, когда 2d является кратным длине волны, при этом он удваивается, когда 2d является полуволной, кратным длине волны. Длина волны равна скорости звука в воде, например, около 1500 м/с, умножить на период (т.е. расстояние = скорость × время), при этом период равен 1/F, где F является частотой, измеряемой в Герцах (Гц).

Таким образом, провал будет создан, когда $k \times 1500/F = 2d$, где "k" является целым числом. То есть, когда $d = k \times 750/F$. Например, для 8 Гц первый провал будет на 94 м. При 4 Гц первый провал будет на 187 м.

Для конструктивного суммирования глубина буксирования должна быть выбрана так, чтобы $d = (k + 1/2) \times 750/F$. Таким образом, при 8 Гц первый пик будет на 47 м, а при 4 Гц пик будет на 94 м. При 2 Гц пик будет на 188 м, а при 1 Гц пик будет возникать на 375 м.

Если желательно оптимизировать амплитуды по всему диапазону свипирования, глубина, которая помещает пик конструктивного суммирования на приблизительно % максимальной частоты свипа, будет приемлемой. Если пик был бы помещен в середине полосы, провал ожидался бы в верхнем конце, что будет нежелательно. Следовательно, согласно некоторым вариантам осуществления может быть желательно брать среднюю величину между единицей и $1/2$ пиковой частоты. Таким образом, для 8 Гц это будет соответствовать глубине буксирования, составляющей приблизительно 60 м.

Проблема с низкими частотами заключается в уходе от провала на $k=0$, т.е. для достаточно низких частот источник будет необходимо расположить "слишком близко к поверхности". Для того чтобы увидеть, как амплитуда варьирует в сторону от провала на $d=0$, прибавим синусоидальные колебания от источника и антиисточника:

$$\sin\left(\frac{2\pi(x+d)F}{1500}\right) - \sin\left(\frac{2\pi(x-d)F}{1500}\right) = 2 \cos\left(\frac{F\pi x}{750}\right) \sin\left(\frac{dF\pi}{750}\right)$$

Таким образом, изменение амплитуды по глубине источника d равно

$$\sin\left(\frac{dF\pi}{750}\right)$$

Выполним аппроксимацию с допущением малости d, т.е. $\sin(d) = d$, а $\pi/750$ равно приблизительно

0,004, следовательно, амплитуда будет приблизительно равна

$$dF * 0,4\% .$$

Это будет хорошей аппроксимацией для глубин, значение которых небольшое по сравнению с длиной волны, т.е. на небольших глубинах при частоте 1 Гц существует усиление 0,4% по амплитуде на каждый метр удаления источника от открытой поверхности. При 2 Гц усиление составляет 0,8%, при 8 Гц усиление составляет 3,2% и т.д.

Приведенная выше математика легко обобщается для неперпендикулярного распространения. В этом случае имеет значение только составляющая перемещения между источником и зеркально отображающимся антиисточником параллельно направлению распространения. Это пропорционально изменяет эффективную глубину d источника путем умножения на косинус угла между направлением распространения и вертикалью. Если угол составляет 90° градусов, то косинус 90° равен нулю и, следовательно, существует провал для всех частот для горизонтального распространения. При 60° от вертикали эффективная глубина сокращается в два раза, поскольку косинус 60° равен 0,5.

Важная идея, которая используется в настоящем изобретении, но которая не была надлежащим образом распознана в известном уровне техники, состоит в том, как использовать более глубокие пики. Ранее разработчики сейсмической разведки использовали только первый (т.е. наименее глубокий) пик для неимпульсных источников. Например, из уровня техники известно варьирование глубины источника свип-сигнала для поддержания его на оптимальной глубине на первом пике волны-спутника, даже когда частота изменяется. См. например, патент США № 7257049, "Method of seismic surveying, a marine vibrator arrangement, and a method of calculating the depths of seismic sources", Laws et al., 2007, в котором также предлагается располагать источники свип-сигнала на двух или более глубинах, но отсутствуют попытки использовать тот факт, что различные источники могут покрывать различные диапазоны частот. Все источники качаются в пределах всего диапазона частот и, как следствие, они все расположены на относительно небольшой глубине (15 м или менее).

Авторы настоящего изобретения обнаружили, что если доступна ограниченная ширина полосы частот (что, в сущности, всегда имеет место для источников свип-сигнала), то представляется возможным осуществить буксирование на большей глубине, поскольку заданная глубина может быть в пределах полосы частот волны-спутника для всего диапазона частот источника с ограниченной шириной полосы частот.

Хотя настоящее изобретение описано и проиллюстрировано в настоящем документе на примере некоторых конкретных предпочтительных вариантов осуществления со ссылками на прилагаемые фигуры, специалисты могут внести различные изменения и дальнейшие модификации помимо показанных или предложенных в настоящем документе в пределах сути настоящего изобретения, объем которого определен прилагаемой формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ сбора сейсмических данных, включающий
 - определение первой ширины полосы частот первого сейсмического источника, где указанный первый сейсмический источник представляет собой источник свип-сигнала;
 - определение глубины первого источника, используя по меньшей мере часть указанной первой ширины полосы частот указанного первого сейсмического источника так, чтобы по существу вся указанная ширина полосы частот находилась между первым вызываемым волной-спутником провалом и вторым вызываемым волной-спутником провалом, таким образом создавая план съемки, причем указанная глубина первого источника составляет 25 м или более, при этом коэффициент усиления исходного сигнала первого источника равен нулю в первом вызываемом волной-спутником провале и втором вызываемом волной-спутником провале;
 - определение глубины второго сейсмического источника, причем определение глубины второго источника представляет собой определение глубины источника, которая больше глубины первого источника; причем указанный первый сейсмический источник соответствует низкочастотному источнику, указанный второй сейсмический источник соответствует высокочастотному источнику, указанный низкочастотный источник работает на частоте, которая ниже, чем частота высокочастотного источника, и указанный высокочастотный сейсмический источник функционирует в более высокой полосе частот волны-спутника по сравнению с низкочастотным сейсмическим источником;
 - сбор данных, составляющих первую сейсмическую трассу, путем активации указанного первого сейсмического источника на указанной глубине первого источника в соответствии с указанным планом съемки; и
 - сбор данных, составляющих вторую сейсмическую трассу, путем активации указанного второго сейсмического источника на указанной глубине второго источника в соответствии с указанным планом съемки.
2. Способ по п.1, дополнительно включающий
 - определение второй ширины полосы частот указанного второго сейсмического источника, причем

указанный второй сейсмический источник представляет собой источник свип-сигнала, где указанная вторая ширина полосы частот отличается от указанной первой ширины полосы частот;

при этом определение глубины указанного второго источника включает использование по меньшей мере части указанной второй ширины полосы частот указанного второго сейсмического источника так, чтобы по существу вся указанная вторая ширина полосы частот находилась между вторым вызываемым волной-спутником провалом и третьим вызываемым волной-спутником провалом, таким образом создавая план съемки с двумя источниками, причем указанная глубина второго источника составляет более 25 м, при этом указанная глубина второго источника представляет собой глубину, отличную от глубины первого источника; и

сбор данных, составляющих по меньшей мере одну сейсмическую трассу, путем активации указанного первого сейсмического источника и указанного второго сейсмического источника в соответствии с указанным планом съемки с двумя источниками.

3. Способ по п.2, причем дополнительные источники добавляют по той же методике для создания плана съемки с множеством источников.

4. Способ по п.1, в котором каждый из указанного первого вызываемого волной-спутником провала и указанного второго вызываемого волной-спутником провала может быть любым из провалов, которые возникают через равные интервалы частоты за исключением вызываемого волной-спутником провала на нулевой частоте.

5. Способ морской сейсмической разведки, включающий стадии:

определение минимального коэффициента усиления исходного сигнала, при этом минимальный коэффициент усиления исходного сигнала характеризует ширину каждой зоны провалов поблизости каждого вызванного волной-спутником провала, причем коэффициент усиления исходного сигнала сейсмического источника равен нулю в каждом вызываемом волной-спутником провале;

определение диапазона требуемых частот сбора данных;

определение диапазона требуемых удалений/углов для каждой частоты в этом диапазоне;

разделение указанного выше диапазона частот на три режима, при этом один или несколько режимов выборочно используют в практическом применении, причем указанные режимы включают:

1) частоты, для которых источники могут быть расположены в пределах первой полосы частот волны-спутника на глубине, достаточной для того, чтобы не возникла кавитация, что позволяет осуществлять "стандартный" сбор данных;

2) частоты, для которых первая полоса частот волны-спутника не подходит для применения из-за недостаточно большой глубины, что требует применения полос частот волны-спутника, соответствующих более высоким частотам и, следовательно, большим глубинам, и для которых зоны провалов, вызванных волной-спутником, находятся в пределах диапазона необходимых удалений/углов для частот в этом диапазоне;

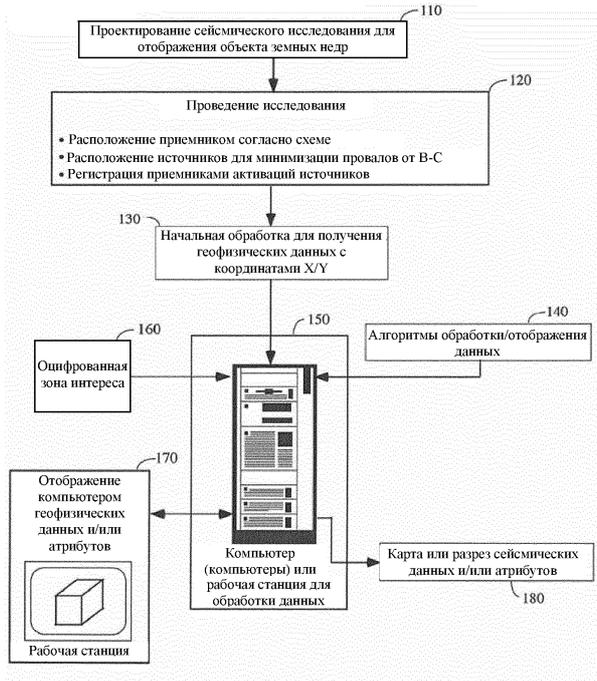
3) частоты, для которых первая полоса частот волны-спутника не подходит для применения из-за недостаточно большой глубины, что требует применения полос частот волны-спутника, соответствующих более высоким частотам и, следовательно, большим глубинам, и для которых зоны провалов отсутствуют в пределах диапазона необходимых удалений/углов для частот в этом диапазоне;

применение способа по пп.1-3 для охвата диапазона частот, соответствующих режиму 3; и

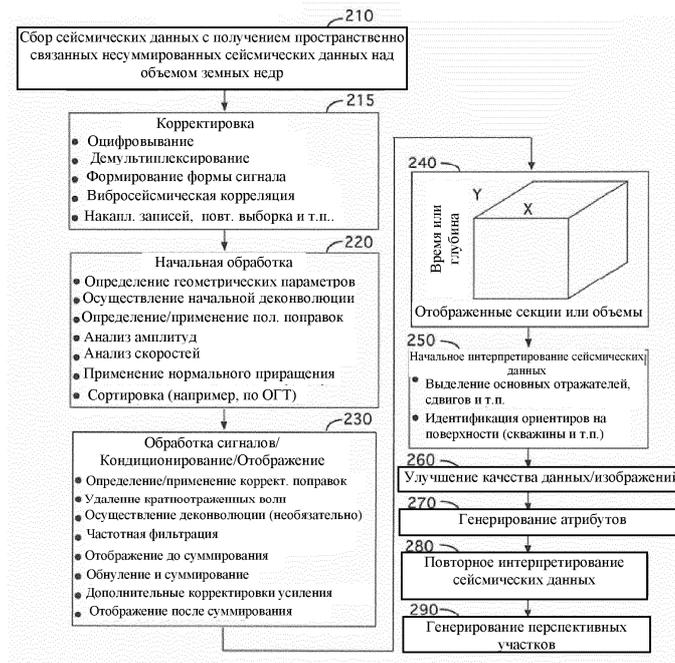
размещение, в случае частот, соответствующих режиму 2, источников на двух или более различных глубинах, чтобы все полярные диаграммы двух или более источников одновременно не содержали нули в пределах желаемого диапазона углов с центром на нисходящей вертикали, которые определены для любой частоты в пределах диапазона частот, охваченного этими источниками, и режима 2, при этом высокочастотные источники размещены в более высоких полосах частот волн-спутников по сравнению с низкочастотными источниками.

6. Способ по п.5, причем глубины двух источников разделяют половиной ширины полосы частот волны-спутника, что позволяет двум работающим одновременно источникам создавать комбинированную полярную диаграмму в полевых условиях, которая не содержит нулей в пределах желаемого диапазона частот и углов.

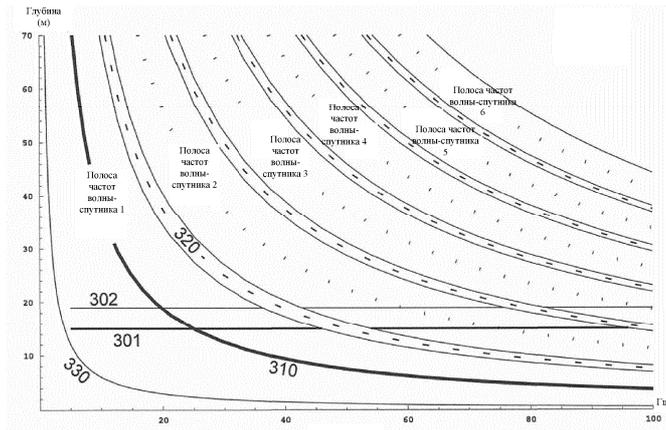
7. Способ по п.5, причем диапазоны частот источников в пределах или рядом с зоной провала, вызываемого волной-спутником, для почти вертикальных углов частично перекрываются, так что частоты в пределах зоны провала, вызываемого волной-спутником, для почти вертикальных углов покрываются двумя источниками на различных глубинах, при этом глубины отличаются в достаточной степени, чтобы один источник всегда находился за пределами зоны провала, вызываемого волной-спутником, когда другой источник находится в пределах указанной зоны для почти вертикальных углов.



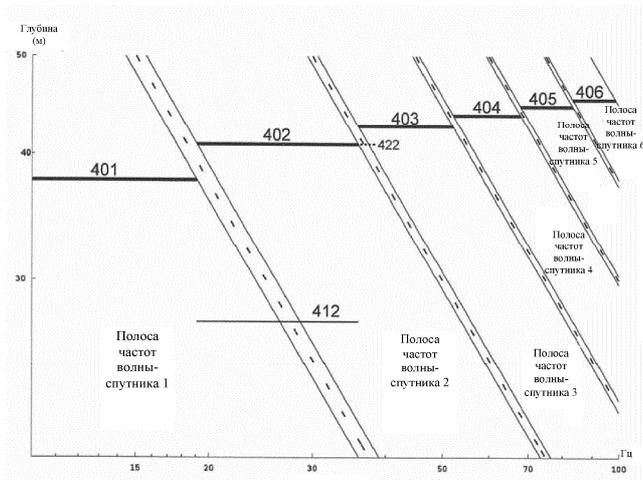
Фиг. 1



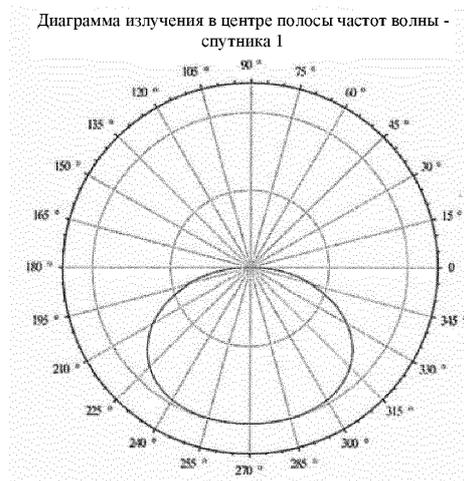
Фиг. 2



Фиг. 3

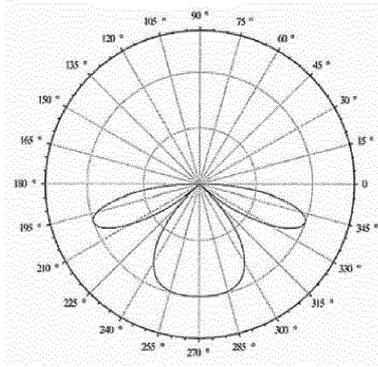


Фиг. 4



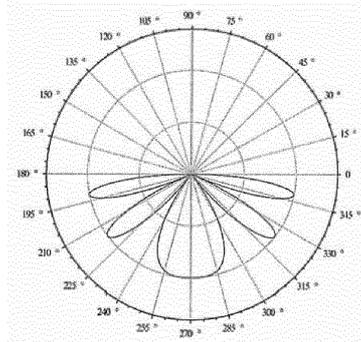
Фиг. 5А

Диаграмма излучения в центре полосы частот волны-спутника 2



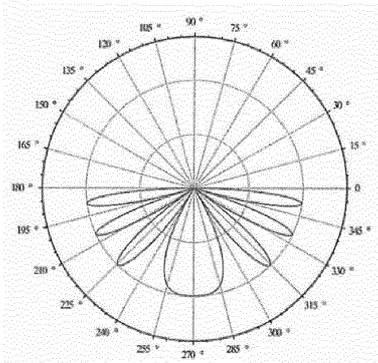
Фиг. 5В

Диаграмма излучения в центре полосы частот волны-спутника 3

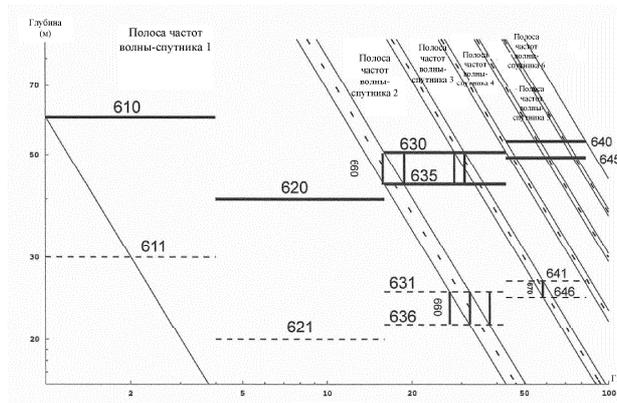


Фиг. 5С

Диаграмма излучения в центре полосы частот волны-спутника 4

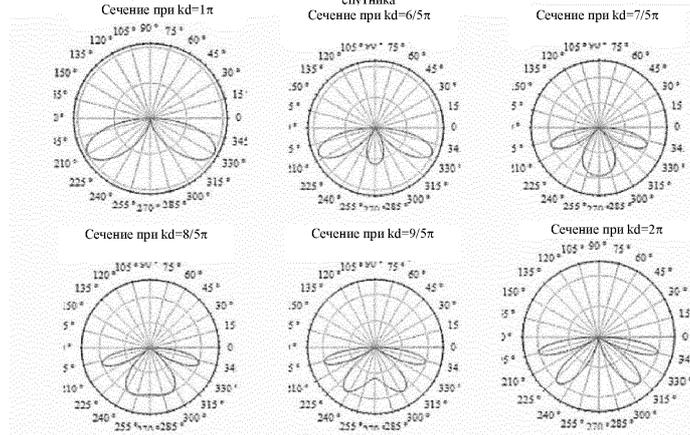


Фиг. 5D



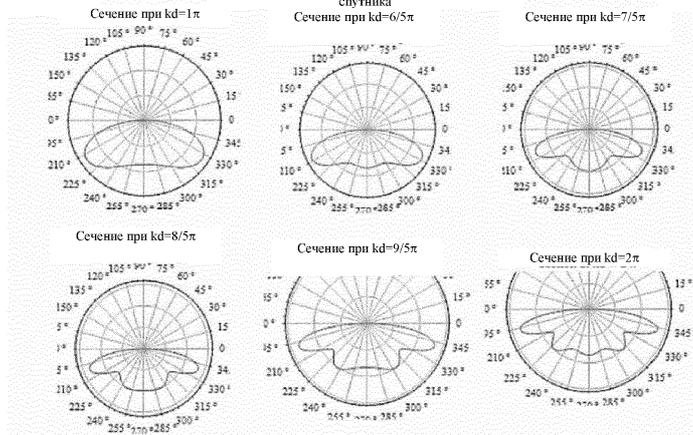
Фиг. 6

Сечения в шести точках по полосе частот волны-спутника

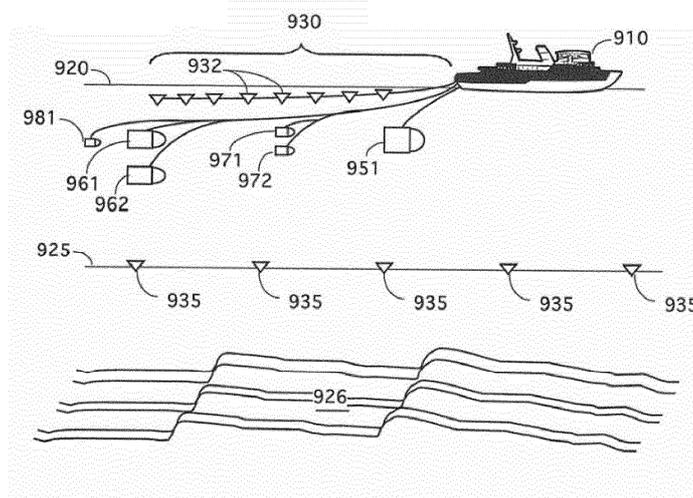


Фиг. 7

Сечения в шести точках по полосе частот волны-спутника



Фиг. 8



Фиг. 9