

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038811**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.10.22

(21) Номер заявки
201890809

(22) Дата подачи заявки
2016.09.30

(51) Int. Cl. **G01V 1/02** (2006.01)
G01V 1/28 (2006.01)
G01V 3/08 (2006.01)
G01V 3/38 (2006.01)

(54) СПОСОБ И СИСТЕМА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

(31) **1517387.5**

(32) **2015.10.01**

(33) **GB**

(43) **2018.08.31**

(86) **PCT/NO2016/050197**

(87) **WO 2017/179988 2017.10.19**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ЭКВИНОР ЭНЕРДЖИ АС (NO)

(72) Изобретатель:
**Амундсен Лассе (NO), Робертссон
Йохан Олоф Андерс (CH)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) WO-A1-2014161044
US-A1-20100004868
WO-A1-2015028411
US-A1-20120314536
US-A1-2014286125
US-A1-2014278119

(57) Предложен способ формирования геофизических данных с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, включающий в себя этапы, на которых создают геофизическое волновое поле с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом сигнатуру геофизического волнового поля изменяют по периодической схеме с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает в себя этап, на котором изменяют: момент времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или полярность сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или фазу сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или амплитуду сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом периодическая схема представляет собой такую, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют, и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где по меньшей мере некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются. Также предложены соответствующая система и компьютерный машиночитаемый носитель, содержащий машиночитаемые инструкции, для осуществления такого способа.

038811 B1

038811 B1

Настоящее изобретение относится к способу и системе для формирования геофизических данных.

При формировании геофизических данных обычно с помощью источника создают геофизическое волновое поле. Примерами известных источников являются одиночные воздушные пушки и группы воздушных пушек, одиночные вибраторы и группы вибраторов, гидропушки, взрывчатое вещество и электрические и магнитные источники. После этого на месте, удаленном от источника, геофизическую энергию регистрируют на приемнике. Геофизические данные, регистрируемые на приемнике, обычно содержат часть данных из геофизического волнового поля, создаваемого источником, и также могут содержать геофизические данные, не исходящие от источника (например, помеху, интерференцию и/или геофизическую энергию от другого активного или пассивного источника). Желательно знать, какая часть (части) геофизических данных, регистрируемых на приемнике, исходит от источника. В предшествующем уровне техники делались попытки осуществить это при использовании источников со случайным временным дитерингом или с помощью кодированных источников при использовании ортогональных последовательностей.

В документе US 2014/0278119 описывается способ, в котором фазы частотных свип-сигналов изменяют от взрыва к взрыву.

Однако изобретатели разработали усовершенствованные способ и систему для формирования геофизических данных.

В одном из аспектов изобретения предложен способ формирования геофизических данных с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, включающий в себя этапы, на которых создают геофизическое волновое поле с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки,

при этом сигнатуру геофизического волнового поля изменяют по периодической схеме с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает в себя этап, на котором изменяют

момент времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или

полярность сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

фазу сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

амплитуду сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки,

при этом периодическая схема представляет собой такую, что когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере, некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются.

В одном из вариантов предложен способ, дополнительно включающий в себя этапы, на которых регистрируют геофизическую энергию для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и

преобразуют геофизические данные из первой области в другую область.

В одном из вариантов предложен способ, дополнительно включающий в себя этапы, на которых отделяют геофизические данные, возникающие из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области,

и предпочтительно преобразовывают отделенные геофизические данные обратно в область, в которой геофизические данные регистрировали.

В одном из вариантов предложен способ, дополнительно включающий в себя этапы, на которых регистрируют геофизическую энергию для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и

отделяют геофизические данные, возникающие из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области,

причем этап отделения предпочтительно содержит фильтрацию зарегистрированных данных.

В одном из вариантов предложен способ, дополнительно включающий в себя этапы, на которых подготавливают отделенные данные для удаления картины переменной сигнатуры из зарегистрированных геофизических данных,

причем этап подготовки предпочтительно выполняют в другой области или в области, в которой геофизические данные регистрировали.

В одном из вариантов предложен способ, дополнительно включающий в себя этапы, на которых осуществляют регуляризацию отделенных данных.

В одном из вариантов предложен способ, в котором периодическая схема является такой, что после

преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую область первая часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одной воздушной пушкой, сдвигается относительно второй части зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одной воздушной пушкой, а способ включает в себя этапы, на которых

идентифицируют первую часть; и

обрабатывают данные для вычисления сигнала полных данных на сдвинутом месте нахождения первой части при использовании идентифицированной первой части, причем сигнал полных данных представляет собой данные, которые будучи сдвинутыми на сдвинутое место, имеют все данные, возникающие из создаваемого геофизического волнового поля, сдвинутые на сдвинутое место; и/или

обрабатывают данные для удаления второй части данных при использовании идентифицированной первой части.

В одном из вариантов предложен способ, в котором создают множество геофизических волновых полей с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг,

причем переменный временной дитеринг предпочтительно является таким, что каждое второе геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере одной воздушной пушкой, инициируется с постоянной задержкой T во времени.

В одном из вариантов предложен способ, в котором создают множество геофизических волновых полей с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом сигнатуру изменяют посредством изменения полярности,

причем переменная полярность предпочтительно является такой, что каждое второе геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере одной воздушной пушкой, имеет противоположную полярность.

В одном из вариантов предложен способ, включающий в себя выбор переменной сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки такой, чтобы после регистрации геофизической энергии, содержащей созданное геофизическое волновое поле и другой сигнал, и преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую подходящую область, причем зарегистрированные геофизические данные, возникающие из созданного геофизического волнового поля, были сдвинуты от зарегистрированных геофизических данных, возникающих из другого сигнала,

причем другой сигнал предпочтительно возникает от помехи, интерференции или одного или более других источников.

В одном из вариантов предложен способ, в котором по меньшей мере два источника используют для одновременного создания геофизических волновых полей, при этом первый источник имеет переменную сигнатуру на периодической схеме, а второй источник не имеет переменной сигнатуры на периодической схеме или имеет другую переменную сигнатуру в соответствии с периодической схемой, и/или

способ включает в себя выбор такой переменной сигнатуры или сигнатур, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть продольной волны из геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части поперечной волны из геофизических данных, и/или

геофизическое волновое поле, энергия и/или данные являются сейсмическим волновым полем, энергией и/или данными или геофизическое волновое поле, энергия и/или данные являются электромагнитным волновым полем управляемого источника, энергией и/или данными, и/или

преобразование может быть преобразованием Фурье, преобразованием Tau-P или преобразованием Радона, и/или

геофизические данные представляют собой двумерные или трехмерные геофизические данные.

В одном из вариантов предложен способ, включающий в себя выбор такой переменной сигнатуры, чтобы после регистрации регистрируемых геофизических данных и преобразования в другую область часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из созданного волнового поля, была, по меньшей мере, частично сдвинута от интерференционной части зарегистрированных геофизических данных.

В одном из вариантов предложен способ, в котором сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг, при этом интерференционная часть имеет доминирующую частоту, а способ включает в себя этап, на котором используют временной дитеринг, приблизительно такой, как половина или четверть периода доминирующей частоты.

В одном из вариантов предложен способ, включающий в себя выбор такой переменной сигнатуры, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть остаточной помехи от взрывного источника из зарегистрированных геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части геофизических данных, возникающих из созданного геофизического волнового поля.

В одном из вариантов предложен способ, в котором сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг, при этом часть остаточной помехи от взрывного источника имеет доминирующую частоту, а способ включает в себя этап, на котором используют временной дитеринг, приблизительно такой как половина или четверть периода доминирующей частоты остаточной помехи от взрывного источника, или

сигнатуру изменяют посредством изменения полярности, при этом часть остаточной помехи от взрывного источника имеет доминирующую частоту, а периодическая схема переменной полярности последовательно создаваемых геофизических волновых полей представляет собой второе создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую же полярность, что и первое создаваемое геофизическое волновое поле, третье создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее полярность, противоположную полярности второго создаваемого геофизического волнового поля, четвертое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую же полярность, что и третье создаваемое геофизическое волновое поле, пятое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее полярность, противоположную полярности четвертого создаваемого геофизического волнового поля, шестое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую полярность, что и пятое создаваемое геофизическое волновое поле (то есть +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1), и т.д.

В одном из вариантов предложен способ, в котором время между созданием последовательных геофизических волновых полей меньше, чем время, затрачиваемое для регистрации приемником энергии геофизического волнового поля, исходящей из каждого создаваемого геофизического волнового поля, при этом

способ предпочтительно включает в себя этап, на котором идентифицируют данные в заданной трассе, получаемой из геофизического волнового поля, созданного ранее, по времени инициирования заданной трассы и добавление этих идентифицированных данных к данным предшествующей трассы, получаемым из того же самого геофизического волнового поля.

В одном из вариантов предложен способ, включающий уменьшение длительности сигнала данных, исходящего по меньшей мере от одной воздушной пушки, в другой области, при этом

способ предпочтительно включает в себя удаление низкоскоростных волн из зарегистрированного волнового поля в случае, когда геофизическое волновое поле, энергия и/или данные являются сейсмическими волновым полем, энергией и/или данными.

В одном из вариантов предложен способ, используемый в способе моделирования, построения изображений или инверсии.

В одном из дополнительных аспектов предложена система для формирования геофизических данных, содержащая

по меньшей мере одну воздушную пушку для создания геофизического волнового поля с переменной сигнатурой, при этом по меньшей мере одна воздушная пушка выполнена с возможностью изменения сигнатуры геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и

использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает в себя изменение

момента времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или

полярности сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

фазы сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

амплитуды сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки,

при этом периодическая схема представляет собой такую, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере, некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются.

В одном из вариантов предложена система, содержащая

по меньшей мере один приемник для регистрации геофизической энергии для получения геофизических данных, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и

процессор для преобразования зарегистрированных геофизических данных из первой области в другую область, и/или

отделения геофизических данных, возникающих из геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут быть представлены в другой области,

причем процессор предпочтительно содержит фильтр для фильтрации регистрируемых данных.

В одном из вариантов предложена система, содержащая по меньшей мере два источника, каждый для создания геофизического волнового поля, при этом первый источник выполнен с возможностью изменения сигнатуры своего геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой, а второй источник выполнен с возможностью не изменения сигнатуры своего геофизического волнового

поля в соответствии с периодической схемой или выполнен с возможностью изменения сигнатуры своего геофизического волнового поля в соответствии с другой периодической схемой.

В одном из вариантов предложена система, выполненная с возможностью осуществления вышеописанного способа.

В одном из еще дополнительных аспектов предложен компьютерный машиночитаемый носитель, содержащий машиночитаемые инструкции, которые при выполнении на компьютере конфигурируются для

побуждения по меньшей мере одной воздушной пушки к созданию геофизического волнового поля с переменной сигнатурой,

при этом сигнатура изменяется в соответствии с периодической схемой с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и

использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает изменение

момента времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или

полярности сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

фазы сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

амплитуды сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки,

при этом периодическая схема представляет собой такую, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере, некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются,

причем компьютерный машиночитаемый носитель предпочтительно сконфигурирован для выполнения любого из вышеописанных способов.

Согласно первому аспекту изобретения предложен способ формирования геофизических данных с использованием по меньшей мере одного источника, при этом способ содержит создание геофизического волнового поля с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одного источника, при этом сигнатуру изменяют периодически.

Изобретатели обнаружили, что изменение сигнатуры создаваемого геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой может значительно повысить эффективность регистрации геофизических данных, эффективность геофизического моделирования, подавления интерференции, снижения помех, исключения волн-спутников и точность вычислений градиента на стороне источника. Эти усовершенствования рассмотрены более подробно ниже.

Как рассматривалось выше, геофизическое волновое поле обычно создают с помощью источника. Источник может создавать геофизическое волновое поле через промежутки времени, которые могут быть регулярными промежутками по пространству и/или во времени. Создание волнового поля обычно называют "взрывом". На приемнике регистрируют геофизическую энергию, энергию, содержащую создаваемое волновое поле. На приемнике обычно регистрируют геофизическую энергию в виде некоторого количества трасс, которые расположены последовательно во времени относительно друг друга. Приемник обычно иницируют вместе с источником, так что регистрация каждой трассы на приемнике начинается при возбуждении взрыва, например при возбуждении взрыва регистрируют новую трассу. Таким образом, на приемнике регистрируют трассу при каждом возбуждаемом взрыве. В ином случае может быть, что геофизическое волновое поле непрерывно создается источником и что данные непрерывно регистрируют на приемнике. В этом случае создаваемое волновое поле и принимаемые данные могут быть разделены на временные сегменты. Эти сегменты также могут быть названы взрывами и эквивалентно могут трактоваться как дискретные взрывы.

Обычно используют множество приемников на различных местах. На этих приемниках обычно регистрируют геофизическое волновое поле в области время-пространство.

Изобретатели обнаружили, что если не использовать периодическую схему сигнатур, но если зарегистрированные геофизические данные преобразовывать в другую область (такую как частота-волновое число), то, по существу, все данные будут располагаться только в части пространства этой области, то есть будут существовать части пространства этой области, в которых данные, по существу, отсутствуют. Например, когда периодическую схему сигнатур не используют и зарегистрированные данные преобразуют в область частота-волновое число, все данные попадают в пределы сигнального конуса, центрированного вокруг волнового числа $k=0$. На всех местах в области вне сигнального конуса и до волнового числа k_N Найквиста геофизические данные отсутствуют. Ниже это описывается более подробно с обращением к фиг. 1.

Изобретатели поняли, что можно перемещать, по меньшей мере, некоторые данные от конкретного источника, регистрируемые на приемнике, на другое место в другой области, и в таком случае можно использовать большее пространство в другой области.

Кроме того, изобретатели поняли, что это может позволить применять многочисленные совместно

используемые источники таким образом, например, чтобы данные от каждого источника имели свое место в другой области. Поскольку данные от каждого источника могут иметь свое место в другой области, можно знать, какие данные приходят от какого источника, и можно выделять данные от каждого источника. Это позволит иметь большую плотность выборки данных от каждого источника и, следовательно, более высокую эффективность. Точно так же изобретатели поняли, что, когда данные от каждого источника имеют свое место в другой области, то регистрируемые данные можно непосредственно фильтровать в области, в которой их регистрируют (например, в области время-пространство или частота-пространство), чтобы извлекать или исключать данные от каждого источника.

Кроме того, изобретатели поняли, что подобные принципы можно также использовать для перемещения сигнала данных в другую область, на место, находящееся на расстоянии от данных, зарегистрированных от источника помех и/или интерференции, или, что эквивалентно, для перемещения помех и/или интерференции на расстояние от сигнала данных. После этого данные от источника помехи и/или интерференции можно использовать или удалять. Эквивалентно, данные можно фильтровать в первой области (то есть в области, в которой их регистрируют), чтобы удалять помехи и/или интерференцию.

Кроме того, можно получать многочисленные другие выгоды и преимущества, связанные с возможностью перемещения данных в другую область.

Изобретатели обнаружили, что при использовании периодической переменной сигнатуры для создаваемого геофизического волнового поля данные, регистрируемые из этого волнового поля, при преобразовании в подходящую область будут сдвинуты от ожидаемого места. Этот принцип обнаружили изобретатели и на его основании возникли многочисленные преимущества и стали возможными применения, рассмотренные выше и рассматриваемые подробно ниже.

Таким образом, периодическая схема может быть такой, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую подходящую область, по меньшей мере, некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место, которое отличается от места, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющих переменную сигнатуру, не используются. Место, на котором, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющих переменную сигнатуру, не используются, может быть местом, на котором, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, не имеющих переменной сигнатуры, используются. При использовании сейсмического волнового поля и при преобразовании в область частота-волновое число это место может быть сигнальным конусом, центрированным вокруг $k=0$.

В способе используется детерминированное изменение сигнатуры источника, так что, когда создаваемое геофизическое волновое поле регистрируют и преобразуют в подходящую область, место нахождения по меньшей мере части зарегистрированных геофизических данных сдвигается в этой области. Сигнатура может изменяться как повторяющаяся картина. Изменение сигнатуры может быть детерминированным, периодическим.

Периодическое изменение сигнатуры может быть периодическим изменением сигнатуры последовательно создаваемых волновых полей (например, от взрыва к взрыву). Поэтому сигнатура каждого создаваемого волнового поля может не изменяться относительно самой себя (то есть каждое создаваемое волновое поле может иметь только одну сигнатуру), но сигнатура каждого волнового поля может изменяться относительно сигнатур других волновых полей, образуемых на различных местах и/или в различные моменты времени.

Подходящей областью является любая область, в которой проявляется сдвиг места нахождения геофизических данных. Например, геофизические данные можно регистрировать в области время-пространство. Другой областью может быть область частота-волновое число или область Tau-P .

Сдвиг может быть сдвигом по оси в измененной области.

Способ может содержать регистрацию геофизической энергии для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника; при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одном источнике; и преобразование геофизических данных в другую область. Другая область может быть такой областью, в которой, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных сдвигаются на место, которое отличается от места в другой области, на котором, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются. В данном случае, по меньшей мере, некоторые из регистрируемых геофизических данных могут быть всеми регистрируемыми геофизическими данными или частью их, возникающей из распространяющегося волнового поля, создаваемого источником.

На приемнике можно регистрировать энергию в области пространство-время.

Преобразование может быть любым преобразованием, пригодным для преобразования данных в подходящую область. Преобразование может быть пространственным преобразованием. Преобразование может быть преобразованием Фурье. Преобразование может быть преобразованием Радона. Преобразование может быть преобразованием Tau-P .

В соответствующей области сдвиг места нахождения данных вследствие периодической схемы сигнатуры может быть сдвигом в измерении, которое является пространственным измерением. В области частота-волновое число сдвиг может быть k_N/n , например k_N , $k_N/2$, $k_N/3$ и т.д., где k_N - волновое число

Найквиста.

По меньшей мере один приемник может находиться на расстоянии по меньшей мере от одного источника.

Может иметься множество приемников, разнесенных в основном по направлению линий приема.

По меньшей мере один источник можно перемещать между различными местами создания последовательных взрывов. Источник можно перемещать с постоянной скоростью, а взрывы можно создавать через постоянные промежутки времени с тем, чтобы было одинаковое расстояние между местами взрывов. Однако может случиться, что вследствие, например, факторов окружающей среды (таких как ветры, морские течения и т.д.) источник не может быть перемещен с постоянной скоростью. В этом случае волновые поля все же можно создавать с постоянным пространственным разнесением посредством соответствующего изменения времени между последовательными взрывами. Источник можно перемещать линейно, чтобы места взрывов находились на прямой линии. Источник можно перемещать так, чтобы образовывалась, по существу, равномерная сетка мест взрывов.

Способ может содержать отделение геофизических данных, возникающих из образуемого геофизического волнового поля от источника, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области. Это может быть сделано, например, обнулением других геофизических данных. Другие геофизические данные могут быть от других источников, или интерференции, или помехи. После этого отделенные геофизические данные, полученные из созданного геофизического волнового поля, можно преобразовать обратно в область, в которой они регистрировались (например, в область время-пространство). Тем самым может быть получен массив геофизических данных, соответствующий (каждому) источнику. Этот массив данных можно подготавливать (например, математически) для удаления вариации, наложенной на него переменной сигнатурой. Например, полярность соответствующих трасс можно изменить или время различных возбуждений можно изменить. Этой подготовкой массив геофизических данных, соответствующий по меньшей мере одному источнику, приводят к обычной форме (то есть как если бы он был образован без всякой переменной сигнатуры источника), но с осуществлением успешного разделения/отделения от других сигналов геофизической энергии, которые могут присутствовать.

Способ может содержать регистрацию геофизической энергии для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одном источнике; и отделение геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одном источнике, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области.

Этап отделения может содержать фильтрацию регистрируемых данных. Эта фильтрация может происходить в области, в которой геофизическую энергию регистрируют. Эта фильтрация может происходить в области пространство-время или области пространство-частота. Поэтому может отсутствовать необходимость в преобразовании регистрируемых данных в измененную область. Применяемый фильтр может быть пространственным фильтром, например пространственно-временным фильтром или пространственно-частотным фильтром. Фильтр может быть выбран/создан/моделирован на основании знания того, что переменная сигнатура создает сдвиг в измененной области. Например, специалист в данной области техники может понять, что, если данные должны сдвигаться в пространстве волновых чисел, то пространственный фильтр может быть применен в пространственной области для отделения части данных, которые должны сдвигаться, если все данные были преобразованы в пространство волновых чисел. Фильтр можно проектировать так, чтобы он обладал свойствами отделения/извлечения/подавления, эквивалентными свойствам этапов преобразования, отделения и повторного преобразования, рассмотренных выше (например, им можно отделять те же самые данные, что и методом отделения, но без необходимости в этапе преобразования данных).

Например, можно спроектировать фильтр, который может осуществлять преобразование, при котором будет эффективно извлекаться заданный сигнал (например, сигнал, который должен сдвигаться в измененной области). В таком случае можно осуществлять конволюцию данных в области регистрации при использовании этого фильтра для вывода искомым данных в область регистрации. Ключевая особенность заключается в том, что фильтрацией данных в области регистрации можно успешно осуществлять отделение заданных данных, если использовать подходящий фильтр. Такой фильтр можно спроектировать при понимании теории и знании переменной сигнатуры источника. Таким образом, отделение может быть достигнуто конволюцией пространственно-временных или пространственно-частотных данных с выходным сигналом пространственно-временного или пространственно-частотного фильтра. Фильтр можно рассчитать так, чтобы он извлекал или подавлял часть пространства измененной области (например, пространства частота-волновое число). Такой фильтр может не быть ограничен областью пространство-время или пространство-частота; точнее, он может быть применен в любой области, в которой регистрируют данные.

Кроме того, эти отделенные данные можно подготавливать.

Подготовка может происходить в области, в которой геофизические данные регистрируют. Обра-

ботка может происходить в области пространство-время или пространство-частота.

Периодическая схема может быть такой, что после преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую область первая часть зарегистрированных геофизических данных будет сдвигаться на место, которое отличается от места в другой области, где первая часть геофизических данных, имеющих переменную сигнатуру, не используется (то есть на сдвинутом месте), а вторая часть зарегистрированных геофизических данных будет находиться на месте, которое является таким же, как место в другой области, где вторая часть геофизических данных, имеющих переменную сигнатуру, не используется (то есть на не сдвинутом месте). Иначе, периодическая схема может быть такой, что после преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую подходящую область первая часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одним источником, будет сдвинута относительно второй части зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одним источником. Это отличается от изложенного в документе US 2014/0278119, где сдвигаются все данные, получаемые от одного источника.

Вторая часть может быть остальной частью зарегистрированных данных, то есть зарегистрированные данные могут состоять из первой и второй частей. В ином случае могут иметься другие части, сдвинутые относительно как первой, так и второй частей.

Таким образом, следует понимать, что геофизические данные, возникающие из создаваемого геофизического волнового поля, могут быть разделены на две (или большее количество) различных частей, которые сдвигаются на различные места в измененной области. Некоторые из данных, получаемых от источника (вторая часть), обнаруживаются на одном месте, и некоторые из данных, получаемых от источника (первая часть) обнаруживаются на месте, сдвинутом относительно места второй части. Таким образом, можно понять, что как первая, так и вторая части являются неполными относительно сигнала полных данных, для которого при приеме на одном месте переменная сигнатура не используется. В настоящей заявке мультипликативный эффект от этих недостающих частей данных называется "волнами-спутниками" в каждой части данных. Эти "волны-спутники" могут считаться функциями, при умножении которых на сигнал полных данных образуются различным образом сдвинутые части сигнала полных данных. Каждая часть данных имеет связанную с ней "волну-спутника", а "волна-спутник", связанная с каждой частью данных, может отличаться от волны-спутника (волн-спутников), связанной с другой частью (частями), то есть "волна-спутник", связанная с первой частью ("первая волна-спутник"), обычно отличается от "волны-спутника", связанной с второй частью ("второй волны-спутник"). Однако сумма всех волн-спутников должна быть равна, по существу, 1 (единице), поскольку при разделении данных на первую и вторую части отсутствуют потери или появления энергии/данных, то есть, по существу, данные не теряются и не образуются, только некоторые сдвигаются относительно остальных. Таким образом, иначе говоря, первая часть данных может быть равна полным данным, умноженным на первую "волну-спутник" (сдвинутую на первое место), а вторая часть данных может быть равна полным данным, умноженным на вторую "волну-спутник". Первая волна-спутник с добавлением второй волны-спутника может быть равна 1 (единице), когда полные данные разделяют только на две части.

Изобретатели разработали способ восстановления этих частично сдвинутых данных, чтобы получить полностью сдвинутые данные. Кроме того, изобретатели разработали способ удаления второй части (например, несдвинутой части) данных. Следует понимать, что после выполнения этих двух этапов будут эффективно проявляться данные, имеющие полный сдвиг. Эти два этапа можно выполнять численно/математически. Подробности этих этапов изложены ниже.

Когда данные подвергаются частичному сдвигу вследствие наличия периодически изменяющейся сигнатуры, сдвинутые данные можно ясно видеть и идентифицировать в измененной области (поскольку они сдвинуты на расстояние от остатка данных). Однако несдвинутая часть данных, возникающих из создаваемого волнового поля, может не быть ясно идентифицирована, поскольку на несдвинутых местах могут быть данные от других источников. Таким образом, только сдвинутую часть можно надежно идентифицировать.

Однако, поскольку сдвинутая часть известна, "волну-спутник" можно удалять из сдвинутой части. Как упоминалось выше, термин "волна-спутник" относится к мультипликативному эффекту недостающих частей данных в сдвинутой части (недостающая часть относится к несдвинутой части). Следовательно, "удалением волны-спутника" называется удаление волны-спутника посредством заполнения недостающей части сдвинутых данных на сдвинутом месте, то есть эффективное исключение недостающей части из данных на сдвинутом месте.

В противоположность этому, поскольку в документе US 2014/0278119 описывается сдвиг всех данных от одного источника, то в соответствии с документом US 2014/0278119 частичный сдвиг данных отсутствует. Изобретатели разработали способ, который позволяет сдвигать все данные от одного источника, даже если изменение сигнатуры источника является таким, что только первая часть данных от источника должна сдвигаться: вторую (или оставшуюся часть) сдвигают или обеспечивают сдвиг посредством вычисления его на основании первой части. В свою очередь, этот способ позволяет использовать намного более примитивные изменения сигнатуры (такие изменения, которые создают только частичный

сдвиг данных, такие как временной дитеринг, изменения амплитуды), а не намного более точные изменения фазы, как в документе US 2014/0278119. Использование более примитивных изменений сигнатуры предпочтительно, поскольку они легче управляются и позволяют использовать более дешевые, более традиционные источники, такие как воздушные пушки. По существу, изобретатели фактически разработали способ, который работает в случае изменения сигнатуры, при котором сдвигается только часть данных от источника, из которого вытекает намного более простой, более робастный и менее затратный способ регистрации сейсмических данных по сравнению со способом из US 2014/0278119.

Теория, лежащая в основе способа, раскрытого в документе US 2014/0278119, вытекает из хорошо известного свойства сдвига преобразования Фурье. Для использования этого свойства сдвига требуется точная и конкретная модуляция сигнатуры источника. Изобретатели продвинулись относительно US 2014/0278119 в том, что они разработали способ, для которого нет необходимости иметь такие точные и конкретные модулирующие функции, которые предписываются свойством сдвига. Прежде всего, изобретатели разработали новый способ (основанный на новом уравнении, которое изобретатели вывели), который позволяет осуществлять (по меньшей мере) частичный сдвиг данных даже при менее точной и менее конкретной модуляции сигнатуры источника. Любые несдвинутые данные могут быть найдены на основании новой полученной теории и затем эффективно сдвинуты к полностью сдвинутым данным, но без необходимости в точной и конкретной модуляции сигнатуры источника. Это позволяет использовать более дешевые, более простые, более традиционные морские источники (такие как воздушные пушки), чтобы получать те же самые преимущества, как в случае использования морских вибросейсмических источников, описанных в US 2014/0278119 (например, при регистрации данных от совместно используемых источников). Предложенный способ может содержать этапы идентификации первой части и обработки данных для вычисления сигнала полных данных на сдвинутом месте нахождения первой части при использовании идентифицированной первой части. В документе US 2014/0278119 отсутствуют такие этапы, поскольку данные от заданного источника необходимо полностью сдвигать. Термин "сигнал полных данных" в этой заявке предполагается означать данные, которые будучи сдвинутыми на сдвинутое место, имеют сигнатуру, измененную в соответствии с такой картиной, что, по существу, все данные, возникающие из создаваемого волнового поля, эффективно сдвигаются на сдвинутое место первой части (посредством сочетания фактического сдвига данных и математического/численного сдвига данных).

Вычисление сигнала полных данных на сдвинутом месте нахождения первой части при использовании идентифицированной первой части (то есть "удаление волны-спутника" из первой части) может быть осуществлено благодаря деконволюции первой части. Деконволюцию выполняют при знании ожидаемого сдвига первой части (например, ожидаемой сдвинутой части и ожидаемой несдвинутой части) для заданной картины сигнатуры источника, которую можно получить на основании теории. Деконволюцию первой части можно выполнять, чтобы находить сигнал полных данных на первом сдвинутом месте при использовании функции/уравнения, полученной на основании теории. Деконволюцию первой части можно выполнять с первой волной-спутником, с первой волной-спутником, полученной на основании теории (поскольку первая часть равна первой волне-спутнику, умноженной на полные данные, и если первая часть известна и первая волна-спутник получена на основании теории, полные данные можно восстанавливать посредством деконволюции).

Кроме того, в качестве альтернативы деконволюции можно вычислять вторую часть, поскольку первая часть известна (поскольку она идентифицирована). Вычислять можно при знании ожидаемого сдвига данных для заданной картины сигнатуры источника. Ее можно получать на основании теории. После вычисления первой части ее можно добавлять к первой части в соответствующем первом сдвинутом месте. Этим также достигается заданное удаление волны-спутника.

Деконволюция является предпочтительной, поскольку она осуществляется за один этап и не требуется явный этап вычисления несдвинутой части данных. Однако этими двумя способами достигается один и тот же результат "удаления волны-спутника" из первой части данных.

Кроме того, после идентификации первой части способ может содержать обработку данных для удаления второй части данных при использовании идентифицированной первой части.

Это можно эффективно осуществлять вычислением второй части на основании первой части. Это можно делать вычислением сигнала полных данных при использовании первой части (то есть, как рассмотрено выше, "удалением волны-спутника" из первой части) и затем вычислением второй части на основании полных данных (то есть "восстановлением волны-спутника" в полных данных при использовании функции волны-спутника соответствующей второй части). Эту операцию можно представить как "восстановление волны-спутника" в первой части, из которой волна-спутник была удалена, так что в первой части с "восстановленной волной-спутником и удаленной волной-спутником" имеются только данные, соответствующие данным второй части. Это можно осуществлять конволюцией сигнала полных данных на первом сдвинутом месте. Конволюцию выполняют при знании ожидаемого сдвига первой части относительно второй части (например, ожидаемой сдвинутой части и ожидаемой несдвинутой части) для заданной картины сигнатуры источника, которую можно получать на основании теории. Можно выполнять конволюцию полных данных (найденных при удалении волны-спутника из первой части) с второй волной-спутником, с второй волной-спутником, полученной на основании теории (поскольку

вторая часть равна второй волне-спутнику, умноженной на полные данные, если полные данные известны, и вторая волна-спутник может быть получена на основании теории, вторая часть может быть найдена посредством конволюции).

Кроме того, в качестве альтернативы конволюции можно вычислять вторую часть, поскольку сдвинутая часть известна (поскольку она идентифицирована). Это вычисление может быть выполнено при знании ожидаемого сдвига для первой части при заданной картине сигнатуры. Она может быть получена на основании теории.

Независимо от того, каким образом находится вычисленная вторая часть, "восстановлением волны-спутника" в первой части или "удалением волны-спутника" из нее, или непосредственным вычислением на основании первой части, после вычисления второй части ее можно вычесть из зарегистрированных данных на месте второй части (которое может быть несдвинутым местом).

В особенно предпочтительном варианте осуществления численное/математическое пополнение сигнала полных данных на первом сдвинутом месте и удаление второй части данных с второго места может осуществляться одновременно или в течение одного этапа при использовании, например, общего фильтра.

Результирующий эффект от удаления волны-спутника и восстановления волны-спутника заключается в том, что вторая часть (несдвинутая часть) данных может обнаруживаться как эффективно сдвинутая на сдвинутое место. Он может достигаться способом обработки данных, рассмотренным выше.

В ином случае результирующий эффект от удаления волны-спутника и восстановления волны-спутника может достигаться проектированием подходящего фильтра. При использовании такого фильтра (рассмотренного выше) можно исключать необходимость в преобразовании данных в другую область.

Периодически изменяющуюся сигнатуру можно моделировать как математическую функцию, которой модулируют создаваемое геофизическое волновое поле и регистрируемые геофизические данные.

Например, когда сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг (см. ниже), так, чтобы время инициирования каждого второго создаваемого волнового поля от источника задерживалось или опережалось в соответствии с временным дитерингом T , модулирующая функция может иметь вид

$$g(n) = \frac{1}{2}[1 + e^{i\omega T}] + \frac{1}{2}[1 - e^{i\omega T}](- 1)^n, \quad (1)$$

где n - номер трассы. Если модулирующую функцию $g(n)$ применяют к обычным (то есть без временного дитеринга) данным $f(n)$ и берут произведение с преобразованием Фурье, результатом является

$$F(f(n)g(n)) = \frac{1}{2} [1 + e^{i\omega T}] F(e^{ik}) + \frac{1}{2} [1 - e^{i\omega T}] F(e^{i(k-\pi)}) , \quad (2)$$

где

$$F(e^{ik}) = F(f(n)) \quad \text{и} \quad F(e^{i(k-\pi)}) = F(f(n))(-1)^n$$

Как следует из уравнения 2, член $F(e^{ik})$ центрирован вокруг $k=0$ и является несдвинутой частью. Член $F(e^{i(k-\pi)})$ центрирован вокруг $k=k_N$ и является сдвинутой частью. Как упоминалось выше, сдвинутую часть можно идентифицировать и измерять по зарегистрированным и преобразованным данным, но может быть трудно измерять несдвинутую часть. Однако недостающие части сдвинутых данных можно восполнять (то есть "волны-спутники" в сдвинутой части можно удалять) при использовании уравнения 2 (или любой другой модели для иной картины сигнатуры источника) посредством деконволюции. Например, используя уравнение 2, полные данные можно вычислять по первой (сдвинутой) части данных,

первая часть = $\frac{1}{2} [1 - e^{i\omega T}] * \text{полные данные}$,
поскольку

В ином случае несдвинутая часть может быть эффективно вычислена при использовании уравнения 2 (или любой другой модели для иной картины сигнатуры источника), поскольку сдвинутая часть известна. После вычисления несдвинутой части ее можно добавить к сдвинутой части данных на сдвинутом месте. Эти данные фактически будут выглядеть как полностью сдвинутые данные. Кроме того, вычисленную несдвинутую часть можно исключить из зарегистрированных данных на несдвинутом месте для удаления несдвинутой части из измеренных данных, например, посредством "восстановления волны-спутника" в сдвинутой части с "удаленной волной-спутником", чтобы получить данные, соответствующие только "волнам-спутникам" в первой части, вычитания сдвинутых данных с "восстановленной после удаления волной-спутником" из несдвинутых данных. Например, используя уравнение 2, вторую (несдвинутую) часть можно вычислить с использованием полных данных (получаемых "удалением волны-спутника" из первой части), поскольку

$$\text{вторая часть} = \frac{1}{2} [1 + e^{i\omega T}] * \text{полные данные}.$$

Из сдвинутой части можно удалить волну-спутник, используя математическое моделирование (например, используя уравнение 2), поскольку сдвинутая часть и полные данные известны из преобразованных данных.

После удаления волны-спутника и/или восстановления волны-спутника (полностью) сдвинутые данные можно отделить и обработать, как это описано выше.

Однако необязательно удалять волну-спутник/восстанавливать волну-спутник в данных для полу-

чения полезных данных. Например, одна сдвинутая часть может быть отделена обнулением остающейся части (которая включает в себя несдвинутую часть) или сама сдвинутая часть может быть обнулена с отделением от несдвинутой части и от любых других зарегистрированных данных от других источников энергии. Можно отделять или удалять только сдвинутые данные (как рассматривается ниже, некоторые из данных могут быть сдвинутыми и некоторые из данных могут быть несдвинутыми). Например, при удалении только сдвинутых данных (то есть сдвинутых данных с не удаленной волной-спутником) может быть достигнуто ослабление остаточной помехи от взрывного источника.

Сигнатура источника может быть любым признаком источника, который при периодическом изменении (например, от взрыва к взрыву) может создавать сдвиг мест нахождения некоторых из данных, преобразованных в подходящую область. Например, можно изменять момент времени, в который волновое поле создается источником, и/или полярность сигнала источника, и/или фазу сигнала источника, и/или амплитуду сигнала источника. Этим представлены четыре примера сигнатуры источника. Кроме того, могут быть другие признаки источника, которые можно периодически изменять, чтобы сдвигать данные. Например, когда источник является группой воздушных пушек, следующие параметры влияют на сигнатуру источника: количество пушек, геометрия пушек, глубина погружения, давление, синхронизация, скорость волны в воде, температура морской воды и состояние поверхности моря. Кроме того, сигнатуры вибраторов и групп вибраторов могут зависеть от количества вибраторов, геометрии, вида свип-сигнала, последовательности сигналов, синхронизации/задержки/опережения и полярности сигнала.

Как упоминалось выше, сигнатура может изменяться в соответствии с временным дитерингом. Обычно источник создает волновые поля в регулярно разнесенные моменты времени в регулярно разнесенных местах, когда источник перемещают. Кроме того, известно использование случайного дитеринга. Однако в предложенном способе можно использовать периодическую схему временного дитеринга (то есть когда временной дитеринг используется для реализации изобретения, он является периодическим). Его можно считать приближением дискретного временного дитеринга.

При временном дитеринге создаваемые волновые поля, которые обычно следует создавать в определенных моменты времени, вместо этого несколько задерживают или создают с опережением. Например, без временного дитеринга образуемое волновое поле может быть образовано, когда подвижный источник достигает определенного места в пространстве (известного, например, по данным глобальной системы определения местоположения). Когда источник достигает этого места, происходит инициирование источника и создается волновое поле. Временной дитеринг может быть в случае, когда источник не иницируется сразу после того, как источник достигает заданного места, вместо этого источник может иницироваться с небольшой задержкой во времени (или он может иницироваться с небольшим опережением перед достижением источником заданного места). В ином случае, без временного дитеринга источник может создавать волновые поля через равные промежутки времени. В этом случае временной дитеринг может существовать в случае, когда инициирование источника происходит с некоторой задержкой или с опережением во времени по сравнению с ожидаемым временем инициирования. Временной дитеринг можно считать детерминированной временной задержкой или опережением во времени инициирования источника по сравнению с ожидаемым временем инициирования.

В качестве примера использования периодического временного дитеринга каждый второй взрыв от источника можно инициировать с постоянной задержкой T во времени. Конечно можно использовать другие картины временного дитеринга, например, каждое третье создаваемое волновое поле, четвертое создаваемое волновое поле, n -е создаваемое волновое поле можно создавать с задержкой или опережением или другие создаваемые волновые поля можно создавать с различной величиной задержки или опережения. В ином случае в соответствии с картиной два последовательных взрыва можно производить без задержки во времени, затем два последовательных взрыва задерживают на постоянное время, два последовательных взрыва производят без задержки во времени и т.д. Все, что необходимо, так это, чтобы картина дитеринга была периодической для образования сдвига данных, преобразованных в подходящую область.

Время T дитеринга может иметь любую продолжительность, но предпочтительно, чтобы одно составляло до 10, 20, 30, 40, 50, 100 или 200 мс, предпочтительно, чтобы оно было от 10 до 40 мс, от 40 до 200 мс, предпочтительно, чтобы оно было больше чем 200 мс.

Предпочтительно, чтобы время T дитеринга было значительно меньше, чем время, необходимое для перемещения источника между соседними местами возбуждения. Это означает, что выбранное место возбуждения не сильно смещается вследствие использования временной задержки T . Предпочтительно, чтобы время T дитеринга было значительно меньше, чем время между создаваемыми волновыми полями, которое обычно может быть до 5, 10 или 20 с.

Предпочтительно выбирать время T дитеринга из условия исключения $n/2$ периода (доминирующей) частоты геофизического волнового поля. Это исключение должно быть по возможности сделано, поскольку, когда время T дитеринга составляет $n/2$ периода (доминирующей) частоты геофизического волнового поля, один из членов в уравнении 2 равен нулю, и это может создавать проблемы во время обработки данных (например, деление на нуль приводит к появлению особенностей).

Как упоминалось выше, фильтры в области регистрации (например, пространства-времени) могут

быть предусмотрены для прогнозирования, извлечения или подавления компонентов данных, представляющих интерес (например, от одного или нескольких источников).

Как упоминалось выше, использование временного дитеринга может приводить только к частичному сдвигу данных в измененной области. Теперь будет пояснено происхождение этого частичного сдвига.

Разберем случай, когда каждая вторая трасса имеет временной дитеринг T , сравнимый с дитерингом соседних трасс, при этом модулирующая функция, которая описывает, каким образом временной дитеринг изменяет обычные (то есть без задержки) данные $f(n)$, имеет вид

$$g(n) = \frac{1}{2}(-1)^n + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(-1)^n e^{i\omega T} + \frac{1}{2} e^{i\omega T}. \quad (3)$$

Уравнение 3 может быть записано более компактно как сумма двух модулирующих функций (одна из которых является постоянной относительно n). Оно будет таким же, как уравнение 1

$$g(n) = \frac{1}{2}[1 + e^{i\omega T}] + \frac{1}{2}[1 - e^{i\omega T}](-1)^n, \quad (4)$$

Наконец, после применения модулирующей функции $g(n)$ к обычным данным $f(n)$ и выполнения преобразования Фурье получается результат

$$F(f(n)g_2(n)) = \frac{1}{2}[1 + e^{i\omega T}]F(e^{ik}) + \frac{1}{2}[1 - e^{i\omega T}]F(e^{i(k-\pi)}). \quad (5)$$

Из уравнения 5 следует, что геофизические данные будут отображаться на два места. Часть данных будет оставаться в сигнальном конусе, центрированном вокруг $k=0$, и другая часть данных будет отображаться в сигнальный конус, центрированный вокруг волнового числа k_N Найквиста.

Как пояснялось выше, при знании одной из этих частей можно прогнозировать другую, используя уравнение 5 при "удалении волны-спутника" или "восстановлении волны-спутника" в данных. Конечно, на этом этапе можно использовать любое другое эквивалентное уравнение для иной картины временного дитеринга.

При использовании временного дитеринга остальные сигнатуры создаваемых волновых полей могут быть идентичными.

Хотя способ временного дитеринга был пояснен в терминах задержанного временного сдвига, следует понимать, что он точно эквивалентен созданию волновых полей с опережением при том же самом временном сдвиге (в зависимости от того, какие волновые поля считать несдвинутыми волновыми полями).

Временной дитеринг может быть предпочтительным изменением сигнатуры, поскольку его можно выполнять при использовании обычных источников (например, воздушных пушек), то есть нет необходимости в специальном или адаптированном источнике.

В качестве варианта или дополнительно сигнатуру можно изменять посредством изменения полярности создаваемого геофизического волнового поля. Полярность можно изменять от одного геофизического волнового поля к другому геофизическому волновому полю так, чтобы полярности последовательно чередовались. Это особенно полезно, когда предложенный способ используют при моделировании распространения геофизической волны, инверсии полной волновой формы или обратной миграции во временной области.

В качестве иллюстративного примера чередующаяся полярность может быть такой, при которой каждое второе создаваемое волновое поле имеет противоположную полярность (например, +1, -1, +1, -1 и т.д.).

В этом случае зарегистрированная сейсмограмма общего пункта приема будет иметь каждую вторую трассу с инвертированной полярностью. Это можно представить в виде нижеследующей модулирующей функции, примененной к массиву $f(n)$ обычных данных, когда все трассы имеют одну и ту же сигнатуру источника

$$g(n) = (-1)^n. \quad (6)$$

Уравнение 6 можно также записать в виде

$$g(n) = e^{i\pi n}. \quad (7)$$

Применяя функцию $g(n)$ из уравнения 7 в качестве модулирующей функции к данным $f(n)$ до выполнения (нормализованного) дискретного преобразования Фурье

$$F(f(n)) = F(e^{ik}),$$

можно получить

$$F(f(n)g_1(n)) = F(f(n)e^{i\pi n}) = F(e^{i(k-\pi)}). \quad (8)$$

Из уравнения 8 следует, что эта модулирующая функция из уравнения 6 приводит к сдвигу волнового числа к волновому числу k_N Найквиста.

Таким образом, можно понять, что при использовании инвертирования чередующейся полярности зарегистрированные данные после преобразования в подходящую область будут сдвинуты от места, на котором данные должны находиться, когда переменная сигнатура не используется.

В другом примере второе создаваемое геофизическое волновое поле имеет такую же полярность, какую имеет первое создаваемое геофизическое волновое поле, третье создаваемое геофизическое волновое поле может иметь полярность, противоположную полярности второго создаваемого геофизического волнового поля, четвертое создаваемое геофизическое волновое поле может иметь такую же полярность, какую имеет третье создаваемое геофизическое волновое поле, пятое создаваемое геофизическое волновое поле может иметь полярность, противоположную полярности четвертого создаваемого геофизического волнового поля, шестое создаваемое геофизическое волновое поле может иметь такую же полярность, какую имеет пятое создаваемое геофизическое волновое поле (то есть +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1). Это можно рассматривать как чередующуюся полярность пар геофизических волновых полей. Такая последовательность приводит к сдвигу данных на $\pm k_N/2$.

Можно использовать любую другую последовательность. Все, что необходимо, так это, чтобы картина полярности была периодической и создавался сдвиг данных при преобразовании их в подходящую область.

Когда полярность изменяют, оставшаяся часть сигнатуры создаваемых волновых полей может быть, по существу, идентичной.

Изменение полярности и временной дитеринг можно использовать совместно. Оставшаяся часть сигнатуры может быть, по существу, идентичной.

Изменение полярности источника можно осуществлять рядом способов.

Более конкретно по сравнению с примером конкретного временного дитеринга из уравнений 3-5 и примером конкретных полярностей из уравнений 6-8 нижеследующее общее математическое описание применимо к периодически изменяющейся сигнатуре. Нижеследующее математическое описание применимо в случае, когда источник возбуждают при одной и той же сигнатуре на всех местах нахождения источника, имеющих нечетные номера, и когда на всех местах нахождения источника, имеющих четные номера, сигнатуры также идентичны друг другу, но отличаются от сигнатуры источника на местах нахождения источника, имеющих четные номера так, что сигнатура источника на местах нахождения источника, имеющих четные номера, является масштабированной или фильтрованной версией сигнатуры источника на местах нахождения источника, имеющих нечетные номера. Обозначим фильтр конволюции как $a(t)$, преобразование в частотной области как $A(\omega)$. Анализируемая в частотной области сейсмограмма общего пункта приема (например, когда на одной приемной станции измеряют сигналы от последовательности источников), регистрируемая таким способом, может быть образована на основании нижеследующей модулирующей функции $g(n)$, примененной к массиву обычным образом выбранных данных

$$g(n) = \frac{1}{2} (1 + (-1)^n) + \frac{1}{2} A(\omega)(1 - (-1)^n), \quad (9)$$

уравнение можно также записать как

$$g(n) = \frac{1}{2} (1 + e^{i\pi n}) + \frac{1}{2} A(\omega)(1 - e^{i\pi n}). \quad (10)$$

Уравнение 10 представляет собой более общую формулировку уравнения 1 и уравнения 6. В уравнении 1 (например, для периода временного дитеринга T) $A(\omega) = e^{i\omega T}$. В уравнении 6 (например, для периодических изменений полярности) $A(\omega) = -1$. Кроме того, возможны другие возможные изменения сигнатуры, и они могут быть представлены как $A(\omega) = 1$, $A(\omega) = 0$, $A(\omega) = 1 + e^{i\omega T}$.

Применяя (например, временную конволюцию от записи к записи) функцию $g(n)$ из уравнения 9 в качестве модулирующей функции к данным $f(n)$ до выполнения (нормализованного) дискретного преобразования Фурье в пространство (N равномерно разнесенных мест нахождения источника на протяжении n)

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-i2\pi kn / N},$$

можно получить уравнение

$$H(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) g(n) e^{-i2\pi kn / N} = \frac{1 + A(\omega)}{2} F(k) + \frac{1 - A(\omega)}{2} F(k - k_N), \quad (11)$$

которое следует из результата стандартного преобразования Фурье.

Из уравнения 11 следует, что регистрируемые данные f можно отображать на два места в спектральной области, как это показано на фиг. 2. Часть данных будет оставаться в сигнальном конусе, центрированном вокруг $k=0$, и часть данных будет отображаться в сигнальный конус, центрированный вокруг $k=k_N$.

Количество данных, которые сдвигаются от $k=0$ к $k=k_N$, и количество данных, которые остаются при $k=0$, зависит от функции $A(\omega)$.

Доля данных, которые сдвигаются от $k=0$ к $k=k_N$, определяется в соответствии с $H_- = \frac{1 - A(\omega)}{2}$. Доля данных, которые остаются при $k=0$, определяется в соответствии с $H_+ = \frac{1 + A(\omega)}{2}$.

Когда $A(\omega)=1$, $H_-=0$ и $H_+=1$. Поэтому все данные остаются при $k=0$.

Когда $A(\omega)=-1$, $H_-=1$ и $H_+=0$. Поэтому все данные сдвигаются к $k=k_N$.

Когда $A(\omega)=0$, $H_-=1/2$ и $H_+=1/2$. Поэтому половина данных сдвигается к $k=k_N$ и половина данных остается при $k=0$.

Когда $A(\omega)=1/2$, $H_-=1/4$ и $H_+=3/4$. Поэтому одна четверть данных сдвигается к $k=k_N$ и три четверти данных остаются при $k=0$.

Когда $A(\omega)=e^{i\omega T}$, $H_-= (1-e^{i\omega T})/2$ и $H_+= (1+e^{i\omega T})/2$. Поэтому зависящая от частоты часть данных сдвигается к $k=k_N$ и остальная часть остается при $k=0$. Например, когда $\omega=2^n\pi/T$, $H_-=0$ и $H_+=1$, данные с частотой $\omega=2^n\pi/T$ не сдвигаются к $k=k_N$, а все остаются при $k=0$; и когда $\omega=\pi(2n+1)/T$, $H_-=1$ и $H_+=0$, все данные с частотой $\omega=\pi(2n+1)/T$ сдвигаются к $k=k_N$, а при $k=0$ данные не остаются.

Когда $A(\omega)=1+e^{i\omega T}$, $H_-= -e^{i\omega T}/2$ и $H_+=1+e^{i\omega T}/2$. Поэтому зависящая от частоты часть данных сдвигается к $k=k_N$, а остальная часть остается при $k=0$.

Важно отметить, что при знании или наблюдении одной из частей данных (например, сдвинутой части или несдвинутой части), как это подробно рассматривалось выше, можно прогнозировать другую часть данных. Поэтому в предложенном способе нет необходимости в полном сдвиге данных, и это означает, что можно использовать более простые более примитивные изменения сигнатуры источника (такие как временной дитеринг или изменения амплитуды). В свою очередь, это позволяет осуществлять настоящее изобретение при использовании простых источников, таких как воздушные пушки. В этом заключается отличие от документа US 2014/0278119, в соответствии с которым необходимо использовать очень точное изменение фазы, чтобы данные от источника сдвигались полностью. Точное изменение фазы можно осуществлять при использовании только морских вибраторов.

В предложенном способе можно использовать морской вибросейсмический источник. В морском вибросейсмическом источнике обеспечивается высокая степень регулирования сигнатуры источника, а излучение сигнала с противоположной полярностью осуществляется достаточно просто. Однако они являются дорогими и отнимающими много времени в процессе применения. Поэтому предпочтительно применять более простой источник, что (в противоположность US 2014/0278119) позволяет использовать предложенный способ.

Можно использовать гидропушку. Для гидропушки характерен основной пик, который имеет отрицательную полярность, а не положительную полярность, и поэтому она может использоваться в сочетании с воздушной пушкой (для которой характерен положительный основной пик) для регистрации заданных данных.

Можно использовать группу воздушных пушек. Воздушные пушки можно располагать относительно друг друга так, чтобы эффективно создавались сигнатуры, по существу, с противоположными полярностями.

Следует отметить, что при моделировании, обратной миграции во временной области, инверсии или построении изображений нет необходимости иметь какое-либо конкретное устройство, с помощью которого можно получать заданное изменение сигнатуры источника. Точнее, источник можно просто выбирать и моделировать синтетически, при этом не имеет значения, каким образом сигнатура может быть изменена в реальном сценарии.

Способ может содержать изменение сигнатуры по меньшей мере одного источника так, чтобы после регистрации геофизической энергии, содержащей созданное геофизическое волновое поле и другой сигнал, и преобразования зарегистрированных данных в другую подходящую область зарегистрированные геофизические данные, возникающие из созданного геофизического волнового поля, были сдвинуты от зарегистрированных геофизических данных, возникающих из другого сигнала. Другой сигнал может быть помехой, интерференцией или сигналом от одного или нескольких других источников.

По меньшей мере два источника можно использовать одновременно для создания геофизических волновых полей. Первый источник может иметь переменную сигнатуру. Вторым источником может не иметь переменной сигнатуры или может иметь другую переменную сигнатуру. Таким образом, после регистрации и преобразования геофизической энергии в другую подходящую область геофизические данные от первого источника будут сдвинуты от геофизических данных второго источника.

Может быть любое другое количество источников, каждый с такой особой сигнатурой, чтобы все данные от всех источников отделялись друг от друга после подходящего преобразования.

В предшествующем уровне техники делались попытки регистрации сейсмических данных при применении многочисленных совместно используемых источников в случае случайного временного дитеринга или кодирования источников с использованием ортогональных последовательностей.

Предложенный способ представляет собой усовершенствованный способ с применением двух (или большего количества) совместно используемых источников, поскольку данные, зарегистрированные от каждого источника, могут быть сдвинуты в измененной области и поэтому данные от каждого источника могут быть отделены и, следовательно, идентифицированы и отделены от данных, зарегистрированных от другого источника (источников).

Особенно важно применять предложенный способ, поскольку при использовании многочисленных источников может уменьшаться количество вычислений, необходимых во время моделирования (для моделирования может требоваться очень большой объем вычислений, и это является важным аспектом). Например, если при моделировании использовать два источника одновременно, вычисления, необходимые для получения прежнего количества данных, могут быть сокращены наполовину, а если три источника использовать одновременно, вычисления могут быть сокращены в три раза. Теоретически, если n источников используются одновременно, объем вычислений, необходимых для получения прежнего количества данных, сокращается в $1/n$ раз.

Аналогично этому, при использовании многочисленных источников можно повысить скорость, с которой геофизические данные регистрируют во время разведки. Например, если два источника использовать одновременно, данные можно регистрировать с примерно удвоенной скоростью по сравнению со скоростью при одном источнике, а если три источника использовать одновременно, данные можно регистрировать с примерно утроенной скоростью. Теоретически, если n источников использовать одновременно, данные можно регистрировать в n раз быстрее.

Таким образом, при одновременном использовании многочисленных источников предложенный способ может позволить идентифицировать данные по меньшей мере от одного из источников по данным, регистрируемыми на приемнике. Это может быть полезным при многих различных применениях. Например, при использовании группы источников (которая обычно содержит множество менее крупных объединений источников, распределенных по площади) может быть желательно интерполировать данные для положений между местами, на которых возбуждаются взрывы. Знание того, от какого источника приходит регистрируемое волновое поле, может значительно облегчить это интерполирование.

Кроме того, использование многочисленных источников может позволить использовать более широкий диапазон частот. Например, низкочастотный источник и высокочастотный источник можно использовать одновременно и/или воздушную пушку (пушки) и вибратор (вибраторы) можно использовать одновременно. Без использования предложенного способа на промежуточных перекрывающихся частотах данные, регистрируемые от этих двух источников, будут интерферировать. Однако предложенный способ можно использовать для разделения данных, регистрируемых от таких источников. Таким образом, способ можно использовать при широкополосной сейсмической разведке или моделировании. При широкополосной разведке или моделировании один или несколько генерирующих низкие частоты источников (таких как сейсмический эквивалент "сабвуфера") можно использовать одновременно с обычным высокочастотным источником.

Кроме того, при использовании многочисленных источников, данные от которых могут быть разделены и идентифицированы предложенным способом, можно получать преимущества при выполнении обратной миграции во временной области и инверсии полной волновой формы.

По меньшей мере два источника создают соответствующие геофизические волновые поля одновременно. Одновременно означает, что по меньшей мере два источника создают геофизические волновые поля на протяжении одного и того же периода времени. Это не означает необходимость инициирования по меньшей мере двух источников таким образом, чтобы волновые поля создавались точно в одно и то же время. Например, при использовании дитеринга волновые поля могут намеренно создаваться в различные моменты времени. Конечно, при использовании изменений полярности многочисленные источники могут (или могут не) создавать волновые поля точно в одно и то же время.

Способ может содержать выбор переменной сигнатуры таким образом, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из созданного волнового поля, была, по меньшей мере, частично сдвинута от интерференционной части зарегистрированных сейсмических данных.

Создаваемое распространяющееся геофизическое волновое поле может находиться под воздействием интерферирующей геофизической энергии (например, от других геофизических волновых полей, возможно, создаваемых при другой, проводимой поблизости геофизической разведке или фоновым шумом). Когда это происходит, зарегистрированные геофизические данные могут содержать часть сигнала от создаваемого геофизического волнового поля и интерференционную часть от интерферирующих геофизических данных. Чтобы удалить интерференционную часть, картину сигнатуры следует изменить таким образом, чтобы, по меньшей мере, некоторая часть сигнала была, по меньшей мере, частично сдвинута от интерференционного сигнала в измененной области.

Обычные способы снижения геофизической интерференции являются неэффективными, когда геофизическая интерференция распространяется в поперечном направлении от линии приемников. Предложенный способ хорошо подходит для регулирования этих интерференций.

Оператор может выбирать картину на основании предшествующих сведений или оценок геофизической интерференции. В случае интерференции от проводимой вблизи разведки оператор может выбирать картину на основании известного сигнала, приходящего с места проводимой вблизи разведки, чтобы двигать часть сигнала из интерферирующей части.

Картину можно выбирать так, чтобы часть сигнала сдвигалась по возможности дальше от интерферирующей части.

Кроме того, способ может содержать удаление интерференционной части.

Интерференционная часть может иметь доминирующую частоту, а способ может содержать использование временного дитеринга, приблизительно такого, как половина или четверть периода доминирующей частоты. Этот временной дитеринг может иметься относительно каждого второго создаваемого волнового поля.

Способ может содержать выбор переменной сигнатуры таким образом, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть остаточной помехи от взрывного источника из зарегистрированных геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части геофизических данных, возникающих из образованного геофизического волнового поля.

Создаваемое распространяющееся геофизическое волновое поле может находиться под воздействием остаточной помехи от взрывного источника. Когда это происходит, зарегистрированные геофизические данные могут содержать часть сигнала из созданного геофизического волнового поля и часть остаточной помехи от взрывного источника из остаточной помехи от взрывного источника.

Остаточная помеха от взрывного источника возникает в геофизических трассах вследствие того, что каждая трасса охватывает конечный период времени. Трасса обычно начинается, когда геофизическое волновое поле создано, и заканчивается, когда (или ранее) создано следующее геофизическое волновое поле. Однако, когда следующую трассу регистрируют, может иметься некоторая остаточная помеха от взрывного источника (например, от глубоких отражающих горизонтов) из предшествующих геофизических волновых полей, которые регистрируются. Хотя она является нежелательной, ее трудно исключить. Один способ исключения остаточной помехи от взрывного источника из предшествующего уровня техники заключается в увеличении продолжительности каждой трассы. Однако при этом, в свою очередь, возрастает время между последовательно создаваемыми волновыми полями, что нерационально.

При некоторых применениях "остаточная помеха от взрывного источника" может быть фактически частью полезного/желательного сигнала. В таком применении, рассмотренном ниже, скорость, с которой взрывы и трассы инициируются, эффективно повышается, так что время между созданием последовательных взрывов может быть меньше, чем время, затрачиваемое на полную регистрацию на приемнике сигнала энергии геофизического волнового поля, связанного с каждым создаваемым геофизическим волновым полем.

При использовании предложенного способа остаточную помеху от взрывного источника можно сдвигать от желательного сигнала от источника в подходящей области, так что остаточную помеху от взрывного источника можно идентифицировать. Остаточную помеху от взрывного источника можно удалять/обнулять или отделять и использовать в качестве геофизических данных.

Таким образом, при использовании предложенного способа будет меньше время ожидания спада остаточной помехи от взрывного источника перед получением последующей трассы. Поэтому временной интервал между последовательно создаваемыми геофизическими волновыми полями (и следовательно, трассами) можно уменьшать, и этим можно повышать плотность данных (например, расстояние между местами, на которых геофизические волновые поля создаются по меньшей мере одним источником) или можно повышать скорость, с которой данные получают (например, повышением скорости буксировки). Это повысит эффективность сбора геофизических данных.

Часть остаточной помехи от взрывного источника может иметь доминирующую частоту.

Способ может содержать использование временного дитеринга, такого как половина или четверть периода доминирующей частоты остаточной помехи от взрывного источника. Этот временной дитеринг может быть применен к каждому второму создаваемому волновому полю.

Как упоминалось выше, периодическая схема переменной полярности последовательно создаваемых геофизических волновых полей может быть такой: второе создаваемое геофизическое волновое поле имеет такую же полярность, какую имеет первое создаваемое геофизическое волновое поле, третье создаваемое геофизическое волновое поле имеет полярность, противоположную полярности второго создаваемого геофизического волнового поля, четвертое создаваемое геофизическое волновое поле имеет такую же полярность, какую имеет третье создаваемое геофизическое волновое поле, пятое создаваемое геофизическое волновое поле имеет полярность, противоположную полярности четвертого создаваемого геофизического волнового поля, шестое создаваемое геофизическое волновое поле имеет такую полярность, какую имеет пятое создаваемое геофизическое волновое поля (то есть +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1), и т.д.

Эта картина может быть особенно предпочтительной для идентификации (и следовательно, удаления) остаточной помехи от взрывного источника. В трассу наибольшая остаточная помеха от взрывного источника обычно приходит из создаваемого волнового поля, соответствующего предшествующей трассе. Поэтому наиболее важно рассматривать остаточную помеху от взрывного источника. Использование описанной выше картины позволяет идентифицировать эту остаточную помеху от взрывного источника следующим образом.

Допустим, первая возбужденная волна имеет полярность +1, вторая имеет полярность +1, третья имеет полярность -1 и четвертая имеет полярность -1 и т.д. Основной сигнал в первой трассе будет иметь полярность +1, основной сигнал во второй трассе будет иметь полярность +1, основной сигнал в третьей

трассе будет иметь полярность -1 и основной сигнал в четвертой трассе будет иметь полярность -1. Однако наибольшая составляющая остаточной помехи от взрывного источника в данной трассе (то есть от предшествующего взрыва) будет иметь такую же полярность, какую имеет основной сигнал в предшествующей трассе. Таким образом, наибольшая составляющая остаточной помехи от взрывного источника в первой трассе будет иметь полярность -1 (такую же полярность, какую имеет основная составляющая из предшествующей трассы), наибольшая составляющая остаточной помехи от взрывного источника во второй трассе будут иметь полярность +1 (такую же полярность, какую имеет основная составляющая из первой трассы), наибольшая составляющая остаточной помехи от взрывного источника в третьей трассе будет иметь полярность +1 (такую полярность, какую имеет составляющая из второй трассы) и наибольшая составляющая остаточной помехи от взрывного источника в четвертой трассе будет иметь полярность -1 (такую же полярность, какую имеет основная составляющая из третьей трассы).

Следовательно, имеется набор трасс, t_n (полярность основного сигнала, полярность остаточной помехи от взрывного источника), в следующем виде: $t_1(+1, -1)$, $t_2(+1, +1)$, $t_3(-1, +1)$, $t_4(-1, -1)$ и т.д.

Перед преобразованием данных способ может содержать умножение всех трасс, имеющих полярность +1, также как их основного сигнала (то есть трасс, которые образуются источником с полярностью +1, в данном случае t_1 и t_2), на -1. После этого останется набор трасс, имеющих следующие полярности: $t_1(-1, +1)$, $t_2(-1, -1)$, $t_3(-1, +1)$, $t_4(-1, -1)$ и т.д.

В ином случае (и полностью эквивалентно при условии, что члены +1 и -1 всего лишь отображают противоположные полярности) до преобразования данных способ может содержать умножение всех трасс, имеющих полярность -1, так же как их основного сигнала (то есть трасс, которые образуются источником с полярностью -1, в данном случае t_3 и t_4), на -1. После этого останется набор трасс, имеющих следующие полярности: $t_1(+1, -1)$, $t_2(+1, +1)$, $t_3(+1, -1)$, $t_4(+1, +1)$ и т.д.

Независимо от того, какой из этих способов осуществляют (все они являются, по существу, эквивалентными), результат заключается в том, что все основные сигналы в наборе трасс имеют одинаковую полярность, а остаточная помеха от взрывного источника имеет чередующуюся полярность. Поэтому уравнение 6, приведенное выше, применимо к только к составляющей остаточной помехи взрывного источника, но не к составляющей основного сигнала.

Таким образом, при выполнении надлежащего преобразования набора трасс остаточная помеха от взрывного источника может быть сдвинута относительно основного сигнала. В конкретном случае, показанном в этой заявке, сдвиг происходит к частоте k_N Найквиста.

При этом применении предложенного способа предпочтительно иметь по меньшей мере один источник, создающий волновые поля через регулярные постоянные промежутки времени, а не через, например, регулярные пространственные интервалы. (Конечно, если используется временной дитеринг, регулярные промежутки времени могут не быть совершенно постоянными, но среднее время между взрывами будет постоянным и "ожидаемое" время инициирования взрыва (от которого измеряется временной дитеринг) будет постоянным).

Способ может содержать выбор переменной сигнатуры таким образом, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть продольных волн из геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части поперечных волн из геофизических данных.

После отражения от структуры геологической среды распространяющееся геофизическое волновое поле может содержать отраженные продольные волны и отраженные поперечные волны, так что регистрируемые геофизические данные могут содержать часть продольных волн и часть поперечных волн. Однако поперечные волны распространяются более медленно, чем продольные волны.

Трасса обычно начинается, когда создают геофизическое волновое поле, и заканчивается, когда (или ранее) создают следующее геофизическое волновое поле. Желательно регистрировать как поперечные, так и продольные волны. Если до предложенного способа было желательно регистрировать как поперечную волну, так и продольную волну, то необходимо было делать это в одной и той же трассе. Однако это не было эффективным вследствие задержки между вступлениями продольной волны и поперечной волны. Поэтому аналогично ослаблению остаточного шума от взрывного источника, рассмотренному выше, в одном способе из предшествующего уровня техники просто повышали продолжительность трассы и повышали интервалы между создаваемыми геофизическими волновыми полями. Это было неэффективно.

При использовании предложенного способа продольная волна и поперечная волна могут вступать в различные трассы. Вследствие периодического изменения сигнатуры источника в измененной области можно разделять вступления продольных и поперечных волн. Кроме того, вследствие периодического изменения сигнатуры источника можно знать, из какого создаваемого геофизического волнового поля происходит поперечная волна, независимо от того, в какой трассе ее регистрируют.

Разделенные поперечные и продольные волны можно использовать в качестве геофизических данных при анализе поддонной структуры. В ином случае поперечная или продольная волна может быть удалена/обнулена.

Таким образом, при использовании предложенного способа будет меньшее время ожидания вступления поперечных волн перед получением последующей трассы. Поэтому может быть уменьшен вре-

менной интервал между последующими создаваемыми геофизическими волновыми полями (и следовательно, трассами), и этим можно повысить плотность данных (например, интервалов между местами, на которых создают геофизические волновые поля по меньшей мере одним источником) или можно повысить скорость, с которой получают данные (например, повысить скорость буксировки источника). Это повысит эффективность сбора геофизических данных. Кроме того, в случае регистрации данных продольных и поперечных волн может быть повышено отношение сигнала к шуму вследствие того, что для данных поперечных волн характерна тенденция вступления большей частью в виде горизонтальной составляющей при регистрации на дне моря, а продольные волны большей частью вступают в виде вертикальной составляющей. Поэтому после разделения горизонтальной и вертикальной составляющих данные продольных волн и данные поперечных волн могут быть, по существу, разделены.

Способ может содержать создание последовательных геофизических волновых полей со скоростью, которая является более высокой, чем обычно возможная скорость. Время между созданием последовательных геофизических волновых полей может быть меньше, чем время, затрачиваемое на полную регистрацию на приемнике сигнала энергии геофизического волнового поля, связанного с каждым создаваемым геофизическим волновым полем.

В обычных системах трассы обычно инициируются при каждом взрыве. Поэтому в каждой трассе регистрируется сигнал волнового поля, образующийся от каждого взрыва. Для полной регистрации сигнала волнового поля требуется определенное время (в данном случае полная регистрация не относится к остаточной помехе, она относится только к желательному/полезному сигналу из создаваемого волнового поля).

Однако, как упоминалось относительно остаточной помехи от взрывного источника, трассы должны быть определенной протяженности, чтобы регистрировался весь желательный/полезный сигнал распространяющегося волнового поля от соответствующего взрыва и чтобы исключалась слишком сильная интерференция/помеха от предшествующих взрывов. Поскольку трасса и взрыв инициируются совместно, минимальная протяженность трассы приводит к минимальному времени между взрывами и поэтому ограничивается скоростью, с которой данные могут регистрироваться.

Однако в настоящем изобретении можно инициировать взрывы и регистрировать трассы с большей скоростью. Если сигнатуру источника изменять в соответствии с подходящей периодической схемой, в любой трассе может регистрироваться часть сигнала (то есть желательного/полезного сигнала данных) от более чем одного источника, поскольку данные, регистрируемые от каждого источника в каждой трассе, позднее могут быть идентифицированы/выделены при использовании предложенного способа. Это позволяет регистрировать данные намного быстрее.

После идентификации/выделения данных из данной трассы, возникающей от взрыва источника прежде времени инициирования данной трассы, эти данные могут быть добавлены к данным, зарегистрированным при предшествующем взрыве (то есть эти данные могут быть связаны с предшествующими данными, поскольку эта часть данных имеет нулевое время, которое соответствует инициированию данного взрыва). Предпочтительно, чтобы предшествующий взрыв был взрывом для трассы, непосредственно предшествующим данной трассе.

Например, рассмотрим случай, когда сигнал из создаваемого волнового поля затрачивает время t_0 для полного прохождения к приемнику. При использовании обычных способов система ограничена временным интервалом t_0 инициирования взрывов и инициирования трасс. Однако при использовании предложенного способа можно одновременно регистрировать часть сигнала от двух последовательных взрывов в одной и той же трассе и затем разделять зарегистрированные данные от всех взрывов. В этом случае взрывы и трассы можно инициировать с промежутками $t_0/2$. Кроме того, в случае, когда можно одновременно регистрировать (в одной и той же трассе) и затем разделять зарегистрированные данные для n последовательных взрывов, взрывы и трассы можно инициировать с промежутками t_0/n .

Геофизические волновое поле, энергия и/или данные могут быть сейсмическими волновым полем, энергией и/или данными. Геофизические волновое поле, энергия и/или данные могут быть электромагнитными волновым полем управляемого источника, энергией и/или данными.

Следует осознавать, что в этом применении используются те же самые подходы, как в применении для ослабления остаточной помехи от взрывного источника, но то, что считалось "помехой", теперь является "полезным" сигналом, который необходимо перемещать на нужное место (например, по окончании предшествующего взрыва). Иначе говоря, умышленно вставляется большая часть желательного сигнала в виде "остаточной помехи от взрывного источника" в следующий взрыв (взрывы), где она может быть изолирована, удалена из следующего взрыва (взрывов) и добавлена к надлежащему предшествующему взрыву (взрывам).

Преобразование может быть преобразованием Фурье, Тау-Р или Радона. Подходящая область может быть областью частота-волновое число или областью Тау-Р.

Как рассматривалось выше, способ можно использовать для улучшения оценки градиентов на стороне источника. При проведении регистрации данных источник может быть в виде группы, состоящей из подгрупп источников. Подгруппы могут быть разнесены по вертикали и/или горизонтали.

При использовании предложенного способа можно обнаруживать данные от двух или большего ко-

личества источников (или от подгрупп источников) в группе. При знании данных от каждого источника (или подгруппы) сильно облегчается вычисление градиента (горизонтального и/или вертикального) на стороне источника.

Способ может содержать вычисление (горизонтального и/или вертикального) градиента источника между двумя или большим количеством источников или двумя или большим количеством подгрупп.

Аналогично этому, поскольку данные от конкретного источника могут быть идентифицированы в зарегистрированных данных при использовании предложенного способа, вычисление, проводимое для удаления волны-спутника из данных на стороне источника, является более легким, особенно в случае, когда данные регистрируют одновременно от многочисленных источников.

Способ может содержать удаление волны-спутника из зарегистрированных геофизических данных на стороне источника.

Разделенные данные, полученные предложенным способом, можно использовать для восстановления или интерполяции геофизических данных на стороне источника.

По меньшей мере один источник может быть воздушной пушкой, группой воздушных пушек, морским вибратором, гидроразрывом, флиппером/флоратором или электрическим и/или магнитным источником. Электрический и/или магнитный источник могут быть электромагнитным источником, то есть источником для создания электромагнитных данных. В ином случае или дополнительно можно использовать флиппер/флоратор/флоратор-источник (который может содержать три группы источников) или пента-источник (который может содержать пять групп источников). Флиппер/флоратор-источник и пента-источник являются примерами групп с несколькими элементарными источниками, которые могут использоваться в качестве источников в предложенном способе. Такие группы элементарных источников можно буксировать позади одного судна.

Когда флиппер/флоратор-источник используется с временным дитерингом между флиппер-взрывом и флоратор-взрывом (например, для всех флиппер-взрывов или всех флоратор-взрывов осуществляется дитеринг в соответствии с постоянным временем), два флиппер- и флоратор-источника могут быть смещены в направлении линий приема для компенсации разностей времен возбуждения. Флиппер/флоратор-источники можно перемещать во время возбуждения взрыва с постоянной скоростью. Смещение источников может быть таким, при котором флиппер-взрывы и флоратор-взрывы находятся на одинаковом расстоянии в пространстве, но во времени осуществляется дитеринг взрывов. Например, если временной дитеринг флоратор-взрывов составляет 0,2 с и скорость источника составляет 2,5 м/с, флоратор-взрыв может быть впереди флиппер-взрыва на расстоянии 0,5 м. Флиппер/флоратор-источник может содержать воздушные пушки. В этом случае флиппер/флоратор-источник можно считать одним источником, и этот случай не следует путать с одновременным использованием многочисленных источников. Однако флиппер/флоратор-источник можно также применять в качестве одновременно используемых источников, если они смещены надлежащим образом в направлении линий приема.

Когда имеются многочисленные источники, такое смещение, как это, также можно использовать для источника любого вида (то есть использовать не только флиппер/флоратор-источники).

Такое смещение источников может быть особенно важным при любом применении, когда источник инициируют через регулярные постоянные промежутки времени, а не через, например, регулярные пространственные интервалы. (Конечно, если используется временной дитеринг, регулярные промежутки времени могут не быть совершенно постоянными, но среднее время между взрывами будет постоянным и "ожидаемое" время инициирования взрыва (относительно которого измеряется временной дитеринг) будет постоянным). Это может быть особенно важным при применении для ослабления остаточной помехи от взрывного источника, рассмотренного выше. Смещение источников указанным образом с использованием постоянного во времени инициирования позволяет разносить места взрывов на постоянные расстояния.

Регистрируемые геофизические данные можно подбирать/сортировать в область общего пункта приема. Регистрируемые геофизические данные можно подбирать/сортировать в область общей глубинной точки. Регистрируемые геофизические данные можно подбирать/сортировать в область равных удалений. Преобразование данных можно выполнять в любой из этих областей.

Геофизические данные могут быть двумерными данными или трехмерными данными.

В случае двумерных данных регистрируемые данные (которые могут быть в области пространство-время) можно регистрировать по одному пространственному измерению (например, вдоль линий приема или поперек линий приема) и во времени. Таким образом, только одна пространственная координата может требоваться для двумерных данных. При преобразовании в другую область другая область также может быть двумерной областью. Например, при преобразовании в область частота-волновое число одним измерением может быть волновое число и другим измерением может быть частота. Когда используют фильтр, он может быть двумерным фильтром и может выполнять фильтрацию только по одному пространственному измерению.

В случае трехмерных данных регистрируемые данные (которые могут быть в области пространство-время) можно регистрировать по двум пространственным измерениям (например, вдоль линий приема и поперек линий приема) и во времени. Таким образом, две пространственные координаты могут требоваться для трехмерных данных. При преобразовании в другую область другая область также может быть

трехмерной областью. Например, при преобразовании в область частота-волновое число двумя измерениями могут быть волновые частоты (например, k_x и k_y) и одним измерением может быть частота (например, пространство (f, k_x, k_y)). При использовании трехмерных данных сдвиг можно выполнять по более чем одному измерению (например, k_x и/или k_y). Это позволит иметь дополнительные варианты сигнатур, дополнительные возможности по осуществлению сдвига и большее пространство, в которое сдвигают зарегистрированные данные. Когда используют фильтр, фильтр может быть трехмерным фильтром и может выполнять фильтрацию только по двум пространственным измерениям.

Геофизические данные могут быть морскими сейсмическими данными, сейсмическими данными донных наблюдений, данными постоянного мониторинга коллектора, наземными сейсмическими данными, данными вертикального сейсмического профилирования, электромагнитными данными, электрическими данными и/или магнитными данными управляемого источника.

Когда сигналы от многочисленных одновременно используемых источников разделяют посредством преобразования в подходящую область предпочтительно, чтобы полоса частот сигнала была как можно уже в этой области. Это необходимо для исключения или минимизации перекрытия полос сигналов от различных источников. Например, данные от каждого источника могут иметь форму сигнального конуса. Данные от других источников могут быть с наложенными спектрами, если сигнальные конусы перекрываются. Когда сигналы перекрываются, трудно разделять сигналы от различных источников. Поэтому важно делать ширину сигналов данных в измененной области как можно более узкой. Изобретатели нашли несколько способов осуществления этого, и они рассматриваются ниже.

Таким образом, способ может содержать уменьшение ширины сигнала данных, исходящего по меньшей мере от одного источника, в другой области. Способ может содержать снижение интерференции зарегистрированных данных, возникающих от многочисленных источников. Этого можно достигать применением способов обработки и удаления наложенных спектров к данным в первой области, рассматриваемых ниже, или применением любого обычного способа обработки данных, например, описанного в работе Yilmaz (2001). Под шириной сигнала понимается, например, пространственная апертура сигнального конуса в f - k -пространстве.

Способ может содержать снижение наибольших кажущихся волновых чисел. Это можно делать для данных от одного или нескольких источников. Это можно делать до преобразования и можно делать математически (например, при использовании обработки сигналов) или можно делать физически (например, изменением расположения источника и приемников). Детали этих способов описываются ниже.

Способ может содержать подбор данных или сортировку подобранных данных в область, в которой минимизируется ширина сигнала в измененной области. Такая область может быть областью общего пункта приема, областью общего пункта взрыва, областью общей средней точки или областью равных удалений. Область равных удалений может быть предпочтительной, поскольку она содержит больше кажущихся скоростей вступлений по сравнению с областью общего пункта приема, и поэтому сигнальный конус будет больше в области частота-волновое число.

Способ может содержать удаление низкоскоростных волн из регистрируемого волнового поля, например удаление вступления прямой волны, вступления направляемой водным слоем волны и/или вступления преломленной на дне волны. Эти низкоскоростные волны являются ограничивающим фактором в области частота-волновое число и при удалении их уменьшается ширина сигнального конуса. Эти вступления могут быть удалены моделированием этих вступлений и вычитанием их из зарегистрированных данных.

При использовании способа источник и приемник могут быть разнесены (например, на расстояние по меньшей мере 100, 200, 500, 1000 или 10000 м). Если данные регистрировать далеко от источника, то вследствие сниженного диапазона изменения азимута между источником и приемником ширина сигнального конуса будет меньше.

Любой из этих способов можно выполнять в сочетании с каждым другим.

Благодаря форме конуса сигнала в измененной области низкочастотные данные обычно не перекрываются с низкочастотными данными от других источников. Эти низкочастотные данные можно считать данными без наложенных спектров. Пороговая частота, до которой данные не перекрываются, а выше которой перекрываются, зависит от ширины сигнальных конусов и разделения сигнальных конусов. Данные высоких частот, превышающих порог, могут считаться данными с наложенными спектрами.

Чтобы получать данные без наложенных спектров от каждого источника, изобретатели разработали следующий способ.

Способ может содержать восстановление данных без наложенных спектров в случае одного или нескольких источников на основании низкочастотных данных без наложенных спектров. Для достижения этого имеются известные способы. Этот способ можно выполнять в сочетании с любым из способов ограничения волнового числа, рассмотренных выше.

При широкополосном моделировании/сборе данных низкочастотные данные без наложенных спектров могут быть в основном от низкочастотного источника (источников). Поэтому данные широкополосного моделирования/сбора можно особенно легко разделять при использовании предложенного способа.

В случае применения многочисленных одновременно используемых источников все источники мо-

гут иметь довольно низкую частоту, чтобы их сигналы не интерферировали. Однако предпочтительно, чтобы один источник имел более высокую частоту. Вследствие того, что только один источник имеет более высокую частоту, его высокочастотные сигналы не будут интерферировать ни с какими другими сигналами (а низкочастотные сигналы не будут интерферировать с сигналами других низкочастотных источников вследствие конусной формы данных).

Таким образом, частоты многочисленных источников могут быть разделены для минимизации интерференции/наложения частот из данных от каждого источника.

Следует понимать, что этапы способа, рассмотренные выше, равным образом можно применять к моделированию и физической регистрации данных.

Способ может содержать коррекцию регистрируемых данных за влияние перемещения источника. Эту коррекцию можно осуществлять при использовании любого известного способа.

Способ может содержать регуляризацию данных. Ее можно выполнять после обратного преобразования разделенных данных в исходную область (например, пространственно-временную область), после фильтрации или после подготовки. Регуляризация данных может быть необходимой, если места в пространстве, на которых волновые поля создаются источником, не являются заданными местами. Это может быть в случае, когда волновые поля иницируются через постоянные промежутки времени, а не через постоянные пространственные интервалы, или когда используется значительный временной дитеринг. Регуляризация может быть пространственной регуляризацией. Регуляризацию можно осуществлять в области, в которой данные регистрируют, или в измененной области.

Следует отметить, что все "сдвиги" данных, рассмотренные выше, являются только относительными сдвигами в измененной области, то есть когда устанавливается, что первый массив данных сдвинут от второго, можно в равной степени считать это сдвигом второго массива данных от первого или фактически сдвигом обоих массивов данных относительно друг друга. Данные в области могут быть периодическими, например, в области частота-волновое число данные могут иметь период $2k_N$ (то есть данные при k и $(k+2k_N)$ могут быть идентичными). Таким образом, должно быть понятно, что оси могут изменяться в соответствии с эффективным сдвигом всех данных. Какой массив (массивы) данных сдвигается, зависит от того, какие оси в области также сдвигаются, и они могут свободно выбираться оператором.

Кроме того, следует заметить, что "сдвинутое место" не является одним конкретным местом/координатой в области, а скорее относится к сдвигу одной и той же величины в области (например, данные, имеющие координату k_1 , при сдвиге к "сдвинутому месту" получают место $k_1+k_{\text{сдвига}}$ и данные, имеющие координату k_2 , при сдвиге к "сдвинутому месту" получают место $k_2+k_{\text{сдвига}}$).

Согласно второму аспекту изобретения предложена система для формирования геофизических данных, содержащая по меньшей мере один источник для создания геофизического волнового поля с переменной сигнатурой, при этом источник выполнен с возможностью изменения сигнатуры геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой.

Кроме того, система может содержать по меньшей мере один приемник для регистрации геофизической энергии, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одном источнике; и процессор для преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую область. Другая область может быть такой областью, что, по меньшей мере, некоторые из зарегистрированных геофизических данных сдвигаются к месту, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющих переменную сигнатуру, не используются. В данном случае, по меньшей мере, некоторые из зарегистрированных сейсмических данных могут быть всеми геофизическими данными или частью геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого источником.

Система может содержать по меньшей мере один приемник для регистрации геофизической энергии, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одном источнике; и процессор для отделения геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одном источнике, от любых других геофизических данных, которые могут быть представлены в другой области. Процессор содержит фильтр для фильтрации регистрируемых данных. Фильтр может быть фильтром, рассмотренным выше применительно к способу.

Кроме того, система может содержать по меньшей мере два источника, каждый для создания геофизического волнового поля, при этом первый источник не имеет переменной сигнатуры и второй источник имеет переменную сигнатуру, так что геофизические данные от второго источника сдвинуты от геофизических данных от первого источника. В ином случае каждый источник может иметь особую переменную сигнатуру, так что геофизические данные от второго источника могут быть сдвинуты от геофизических данных от первого источника.

Система может быть сконфигурирована для выполнения любого из описанных выше способов. Система может содержать любые из признаков, рассмотренных выше применительно к описанным выше способам.

Согласно третьему аспекту изобретения предложен компьютерный программный продукт, содер-

жащий машиночитаемые инструкции, которые при выполнении на компьютере конфигурируются для побуждения по меньшей мере одного источника к созданию геофизического волнового поля с переменной сигнатурой, при этом сигнатура изменяется в соответствии с периодической схемой.

Компьютерный программный продукт может быть сконфигурирован для выполнения любого из способов согласно первому аспекту и/или второму аспекту. Компьютерный программный продукт может быть сконфигурирован для побуждения любой из систем согласно первому аспекту и/или второму аспекту к выполнению любого из рассмотренных выше способов.

Согласно четвертому аспекту предложен способ разведки углеводородов. Этот способ содержит выполнение любых способов согласно первому аспекту и/или второму аспекту, возможно, при использовании компьютерного программного продукта согласно третьему аспекту. Этот способ может содержать использование системы согласно второму аспекту и/или компьютерного программного продукта согласно третьему аспекту для разведки углеводородов.

Способ может содержать использование образованных геофизических данных для идентификации мест бурения и/или идентификации размещения скважин при использовании модели. Способ может содержать бурение на идентифицированных местах.

Согласно пятому аспекту изобретения предложен способ добычи углеводородов. Способ может содержать выполнение любого из способов согласно первому аспекту и/или четвертому аспекту и добычу углеводородов из пробуренных скважин. Для добычи углеводородов этот способ может содержать использование системы согласно второму аспекту и/или компьютерного программного продукта согласно третьему аспекту.

Теперь только для примера предпочтительные варианты осуществления изобретения будут рассмотрены с обращением к сопровождающим чертежам, на которых

фиг. 1 - иллюстрация массива сейсмических данных из сейсмограммы общего пункта приема в координатах f-k после обычной отработки профиля (слева) и инвертирования полярности при каждом втором взрыве (справа);

фиг. 2 - иллюстрация массива сейсмических данных из сейсмограммы общего пункта приема в координатах f-k после использования временного дитеринга при каждом втором взрыве;

фиг. 3 - пример массива зарегистрированных данных для иллюстрации варианта осуществления настоящего изобретения;

фиг. 4 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3;

фиг. 5 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но полярность каждой второй трассы инвертирована, и этим имитируется разведка, при которой каждый второй взрыв имеет полярность, противоположную полярности взрывов непосредственно перед ним и после;

фиг. 6 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но с инвертированием полярности от трассы к трассе в соответствии с картиной +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1 и т.д., и этим имитируется разведка, при которой полярность взрывов инвертируется в соответствии с этой картиной;

фиг. 7 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но с применением временного сдвига 10 мс для каждой второй трассы, и этим имитируется разведка с использованием временного дитеринга 10 мс для каждого второго взрыва;

фиг. 8 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но с применением временного сдвига 20 мс для каждой второй трассы, и этим имитируется разведка с использованием временного дитеринга 20 мс для каждого второго взрыва;

фиг. 9 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но с применением временного сдвига 40 мс для каждой второй трассы, и этим имитируется разведка с использованием временного дитеринга 40 мс для каждого второго взрыва;

фиг. 10 - иллюстрация f-k-спектра данных, показанных на фиг. 3, но с применением временного сдвига 200 мс для каждой второй трассы, и этим имитируется разведка с использованием временного дитеринга 200 мс для каждого второго взрыва;

фиг. 11 - иллюстрация данных из фиг. 7, когда уравнение 17 было использовано для надлежащего "удаления волны-спутника" из сигнального конуса, центрированного вокруг волнового числа Найквиста, так что сдвинутые данные теперь опять соответствуют исходным данным (но сдвинуты к волновому числу Найквиста);

фиг. 12 - иллюстрация данных, показанных на фиг. 11, когда уравнения 17 было использовано для надлежащего "восстановления волны-спутника" в сигнальном конусе, центрированном вокруг волнового числа Найквиста, и вычитания ее из сигнального конуса, центрированного вокруг $k=0$; остался массив данных только с одним сигнальным конусом, который сдвинут к волновому числу Найквиста;

фиг. 13 - иллюстрация возможной конфигурации флип/флоп-источника для получения полностью равномерного распределения в пространстве пунктов взрывов при использовании временного дитеринга; и

фиг. 14 - иллюстрация вступлений сигнала и остаточной помехи от взрывного источника после исключения временных сдвигов.

Согласно одному варианту осуществления в предложенном способе регистрация сейсмических

данных определяется тем, каким образом используются сейсмические источники. Основной принцип основан на том, что при изменении сигнатуры источника от взрыва к взрыву можно отделять данные от других сигналов или помехи. В одном варианте осуществления изобретения каждый второй взрыв осуществляется судовым источником с определенной сигнатурой, тогда как каждый промежуточный взрыв возбуждается при той же сигнатуре источника, но с противоположной полярностью. После преобразования таких данных в f - k -область частота-волновое число, например, сортировки в сейсмограмму общего пункта приема, данные будут занимать противоположные концы k -оси в f - k -спектре в отличие от массива данных от обычных взрывов при той же самой сигнатуре источника для каждого взрыва. Теория этого подробно рассматривается ниже. Этот эффект можно использовать для ряда различных применений, каждое из которых рассматривается ниже.

1. Регистрация при одновременном использовании источников.

В описываемом в этой заявке способе предлагается новый путь регистрации данных при одновременном использовании источников. Два или большее количество источников можно возбуждать одновременно, а данные, принимаемые от них, можно разделять при использовании различных картин переносимых сигнатур.

2. Подавление сейсмической интерференции.

При использовании предложенного способа можно адаптировать сигнал регистрируемых данных, чтобы сдвигать данные, исходящие от одного или нескольких источников, от сейсмической интерференции. Для достижения этого оптимальную картину сигнатур можно адаптировать при получении измерений.

3. Ослабление остаточной помехи от взрывного источника.

При надлежащем выборе картины изменения сигнатуры методологию можно использовать для отделения остаточной помехи от взрывного источника, которую можно удалять совершенно без влияния на сигнал. Получаемые преимущества включают в себя лучшее отношение сигнала к шуму в регистрируемых данных, более быструю регистрацию сейсмических данных, более плотную регистрацию сейсмических данных, лучшую регистрацию низких частот (на низкие частоты в наибольшей степени воздействует остаточная помеха от взрывного источника).

4. Моделирование сейсмических данных и обратная миграция во временной области.

Поскольку способ позволяет одновременно использовать многочисленные источники, эффективность при моделировании может значительно повышаться. Например, если использовать два источника, эффективность сразу же может повыситься в 2 раза.

5. Регистрация широкополосных сейсмических данных.

Как рассматривается дополнительно ниже, после сдвига может произойти некоторое наложение спектров на данные от многочисленных источников. Однако в данных от многочисленных источников всегда отсутствует наложение спектров вследствие использования в способе низких частот. Можно использовать низкочастотные источники и гарантировать, что не будет интерференции при регистрации обычных данных.

6. Экономически эффективная регистрация данных поперечных волн.

Подобно применению для ослабления остаточной помехи от взрывного источника при надлежащем выборе картины изменения сигнатуры можно использовать методологию для отделения вступления поперечной волны от вступления продольной волны.

7. Удаление волн-спутников и градиенты на стороне источника при интерполяции.

При применении изменяющейся картины сигнатур источников к различным подгруппам в группе воздушных пушек можно выделять сигналы от подгрупп, вследствие чего могут быть вычислены горизонтальные градиенты на сторонах источников. Это практически используется при удалении волн-спутников на сторонах источников и при других применениях.

Теория.

При нижеследующем рассмотрении теории, лежащей в основе предложенного способа, обсуждаются методики, в которых используется то, что f - k -пространство в морских сейсмических данных содержит значительные области, которые ограничены кажущимися скоростями распространения, которые не могут быть ниже, чем скорость распространения в воде. Однако другие области и геофизические данные других видов также могут использоваться.

В левой части фиг. 1 показан график (f - k) зависимости частоты от волнового числа, основанный на сейсмограмме общего пункта взрыва или сейсмограмме общего пункта приема, полученной при морской сейсмической разведке. Вся энергия сигнала находится внутри "сигнального конуса". Это происходит потому, что самая малая возможная кажущаяся скорость любой сейсмической энергии соответствует скорости распространения в воде. Вне этого сигнального конуса данные являются нулевыми на графике f - k .

Изобретатели обнаружили, что при изменении сигнатуры источника от взрыва к взрыву и тем самым при реализации различных картин профилирования можно намного лучше использовать доступное f - k -пространство. Данные могут быть с наложенными спектрами.

Один пример образования такой картины профилирования заключается в возбуждении волн во всех

четных пунктах взрыва с определенной сигнатурой источника и чередовании с возбуждением волн во всех нечетных пунктах взрыва при использовании такой же сигнатуры источника, но с противоположной полярностью. В случае такого массива данных регистрируемая сейсмограмма общего пункта приема будет иметь каждую вторую трассу с инвертированной полярностью или, иначе говоря, нижеследующая модулирующая функция применяется к обычному массиву данных, при этом для всех трасс имеется одна и та же сигнатура источника

$$g_1(n) = (-1)^n. \quad (12)$$

Уравнение 12 можно также записать в виде

$$g_1 = e^{i\pi n}. \quad (13)$$

При использовании функции g_1 в уравнении 13 в качестве модулирующей функции посредством регистрируемых (то есть данных, регистрируемых без использования переменной сигнатуры источника) данных $f(n)$, где n является номером трассы, до выполнения (нормализованного) дискретного преобразования Фурье

$$F(f(n)) = F(e^{ik}),$$

получаем

$$F(f(n)g_1(n)) = F(f(n)e^{i\pi n}) = F(e^{i(k-\pi)}), \quad (14)$$

что является результатом стандартного преобразования Фурье (сдвигом волнового числа). То есть модулирующая функция из уравнения 12 приводит к сдвигу волнового числа к волновому числу Найквиста.

В правой части фиг. 1 показано, как такой массив данных будет выглядеть после f -к-преобразования. Следует отметить, что теперь сигнальный конус сдвинут в стороны, так что он центрирован относительно волнового числа k_N Найквиста, при этом половина сигнального конуса находится на отрицательной стороне оси волнового числа и другая половина находится на положительной стороне.

Далее будет рассмотрен случай, который назван временным дитерингом. В таком случае каждая вторая трасса может иметь временной дитеринг T относительно соседних трасс. Модулирующую функцию, которую желательно применять, можно записать как суперпозицию нескольких функций с известными преобразованиями

$$g_2(n) = \frac{1}{2}(-1)^n + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(-1)^n e^{i\omega T} + \frac{1}{2} e^{i\omega T}. \quad (15)$$

Следует отметить, что показательные функции являются следствием преобразований Фурье в другое измерение (преобразований Фурье временного сдвига T) и являются постоянными в рассматриваемом измерении (пространства).

Уравнение 15 может быть записано более компактно как сумма двух модулирующих функций (одна из которых является постоянной по отношению к номеру n трассы)

$$g_2(n) = \frac{1}{2} [1 + e^{i\omega T}] + \frac{1}{2} [1 - e^{i\omega T}] (-1)^n. \quad (16)$$

В заключение можно получить результат

$$F(f(n)g_2(n)) = \frac{1}{2} [1 + e^{i\omega T}] F(e^{ik}) + \frac{1}{2} [1 - e^{i\omega T}] F(e^{i(k-\pi)}). \quad (17)$$

Уравнение 17 показывает, что сейсмические данные будут отображаться на двух местах. Часть данных будет оставаться в сигнальном конусе, центрированном вокруг $k=0$ (то есть часть с частотами вокруг $\omega=2\pi(2n+1)/T$) благодаря первому члену уравнения 17, и часть данных будет отображаться в сигнальный конус, центрированный вокруг волнового числа k_N Найквиста (то есть часть с частотами вокруг $\omega=2\pi n/T$) благодаря второму члену в уравнении 17. На фиг. 2 показано, что по сравнению с обычными данными (в левой части фиг. 1) данные частично сдвинуты к k_N . В частности, данные в сигнальном конусе 1, центрированном вокруг $k=0$, не сдвинуты, но данные в сигнальном конусе 2, центрированные вокруг $k=k_N$, сдвинуты.

Таким образом, из уравнения 12 ясно, что при инвертировании полярности, по существу, все данные от источника будут сдвигаться. Однако из уравнения 17 ясно, что при использовании временного дитеринга данные будут сдвигаться только частично.

Однако изобретатели поняли, что, если один из членов уравнения 17 известен из зарегистрированных данных, то другой член можно прогнозировать, используя уравнение 17. Этот важный результат делает временной дитеринг таким же полезным, как инвертирование полярностей.

Поскольку нет необходимости инвертировать полярность, используя временной дитеринг в качестве переменной сигнатуры, временной дитеринг можно осуществлять при использовании обычных источников (таких как воздушные пушки). С другой стороны, для инвертирования полярности может потребоваться использование более специализированного оборудования, такого как морской вибросейсмический источник.

Как можно понять, теорию, лежащую в основе предложенного способа, можно излагать многочисленными различными способами. В другом способе рассмотрения происхождения полезного действия от

изменения сигнатуры источника от взрыва к взрыву регистрируемые данные считаются состоящими из суммы индивидуальных массивов данных, при этом каждый массив данных имеет одну индивидуальную/особую сигнатуру источника. Например, когда сигнатура источника задерживается при каждом втором взрыве, данные можно рассматривать как сумму двух массивов данных: одного без задержки возбуждения источника и другого с задержкой возбуждения источника. Полные данные будут иметь выборочную частоту k_s . В таком случае два индивидуальных массива данных будут иметь выборочную частоту $k_s/2$. Это свойство приводит к достижению всех преимуществ при сборе данных, обработке, моделировании и инверсии, которые описываются в заявке.

Практический пример.

На фиг. 3 показан пример массива данных, полученных при сейсмической разведке. Хотя данные представляют собой сейсмограмму общего пункта взрыва, составленную из подобранных трасс, разнесенных на 6,25 м, обращение с данными будет таким, как если бы она была сейсмограммой общего пункта приема, в которой каждая вторая трасса соответствует новому местоположению источника (нереалистично плотно подобранных с разнесением источников на 6,25 м). Выбрана только небольшая часть данных, таких что, например, все минимальные удаления отсутствуют. Благодаря этому при преобразовании данных в f-k-пространство будут возникать некоторые шумовые артефакты.

На фиг. 4 показан график f-k данных из фиг. 3. Он представляет собой график f-k, составленный при использовании картины профилирования (например, на левой стороне фиг. 1). В этом конкретном примере большая часть данных вступает с отрицательным волновым числом. Это происходит потому, что источник расположен перед расстановкой. Можно ясно видеть, что контур сигнального конуса ограничен минимальной наблюдаемой кажущейся скоростью вступлений (скоростью в воде). Видно, как некоторая часть энергии "растекается" за пределы сигнального конуса. Этот артефакт обусловлен выбором небольшой части данных. Более полный массив данных (такой как массив данных при центральной расстановке с минимальным и максимальным удалениями) будет лучше сосредотачиваться в сигнальном конусе. Однако показанные данные достаточно хорошо служат задаче иллюстрации концепции изобретения.

На фиг. 5 показан график f-k, на котором каждая вторая трасса имеет полярность, противоположную полярности каждой первой трассы (например, +1, -1, +1, -1, +1, -1 и т.д.). Ожидаемый сигнальный конус сдвинут по оси волновых чисел и центрирован вокруг волнового числа Найквиста. Это схематично показано на правой стороне фиг. 1.

На фиг. 6 показан график f-k тех же самых данных, но полярность инвертируется следующим образом: +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1 и т.д. Видно, что сигнальный конус сдвинут и центрирован вокруг положительной и отрицательной половин волнового числа Найквиста.

На фиг. 7-10 показаны графики f-k данных после применения временного сдвига к каждой второй трассе, составлявшего 10, 20, 40 и 200 мс соответственно. Источник может представлять собой, например, флип/флоп-источник. Заметно, что часть данных уже не центрирована вокруг волнового числа $k=0$ и сдвинута к противоположному концу оси волновых чисел, то есть к волновому числу Найквиста. Можно видеть картину вырезов (в дальнейшем называемых "волнами-спутниками", хотя они не имеют ни малейшего отношения к волнам-спутникам от поверхности моря), на которой на некоторых частотах все данные сдвинуты и на некоторых частотах данные совсем не сдвинуты. Это формирование вырезов можно понять при обращении к уравнению 14. На некоторых частотах ($f=(2n+1)/2T$), где T - дитеринг) все данные сдвигаются, а на других некоторых частотах ($f=n/T$) данные совсем не сдвигаются.

Как рассматривалось выше, можно удалять эти вырезы и сдвигать все данные так, чтобы они были центрированы вокруг волнового числа Найквиста. Это показано на фиг. 11 и 12, при этом уравнение 16 применялось к данным с временным дитерингом, составлявшим 10 мс (фиг. 7), для иллюстрации возможности восстановления амплитуды сигнального конуса, который сдвинут к волновому числу Найквиста (даже в случае, если сигнальный конус вокруг $k=0$ ослаблен или полностью маскирован помехой или другими данными). Этот подход также используется при восстановлении "волн-спутников" в данных (этот термин, используемый в данном месте, не имеет ни малейшего отношения к проблеме волн-спутников от поверхности моря) для полного удаления всего, что находится слева от $k=0$.

На фиг. 11 показаны данные из фиг. 7 для случая, когда уравнение 17 использовалось для надлежащим образом "удаления волны-спутника" из сигнального конуса, центрированного вокруг волнового числа Найквиста, так что теперь сдвинутые данные опять соответствуют исходным данным (но сдвинуты к волновому числу Найквиста).

На фиг. 12 показаны данные из фиг. 11 для случая, когда уравнение 17 использовалось для надлежащим образом "восстановления волны-спутника" в сигнальном конусе, центрированном вокруг волнового числа Найквиста, и вычитания ее из сигнального конуса, центрированного вокруг $k=0$. Наблюдатель находится слева относительно массива данных с только одним сигнальным конусом, который сдвинут к волновому числу Найквиста.

Таким образом, при использовании временного дитеринга данные частично сдвигаются. Однако несдвинутые данные можно сдвигать математически при понимании теории, лежащей в основе сдвига.

Теперь только для примера будут описаны некоторые применения предложенного способа.

1. Регистрация при одновременном использовании источников.

В одном варианте осуществления имеются два судна с источниками. На первом судне каждый второй взрыв производят с противоположной полярностью. На другом судне данные регистрируют обычным образом (то есть без переменной сигнатуры). Зарегистрированные данные в виде сейсмограммы общего пункта приема содержат суперпозицию двух массивов данных. Однако после f - k -преобразования данные разносятся к противоположным концам оси k в виде f - k -спектра (один конус от обычного источника центрирован вокруг волнового числа $k=0$ и другой конус от источника с переменной сигнатурой центрирован вокруг волнового числа Найквиста со знаком $\pm$). Теперь два массива данных можно разделить и выполнить обратное преобразование в область пространство-время для получения отдельных массивов данных, соответствующих каждому судовому источнику. И теперь массив данных, в котором каждая вторая трасса имеет противоположную полярность, можно обработать так, чтобы все трассы имели одну и ту же полярность.

В другом варианте осуществления один источник возбуждают без временного сдвига, тогда как второй источник возбуждают с использованием постоянного временного дитеринга (например, 10 мс, как показано выше) для каждого второго взрыва. Данные от первого источника всегда попадают в сигнальный конус вокруг $k=0$. Однако данные от второго источника разделяются между двумя сигнальными конусами; одним, центрированным вокруг $k=0$, и одним, центрированным вокруг волнового числа Найквиста, в соответствии с уравнением 14. В изложенной выше теории показано каким образом:

1) полностью восстанавливать данные от второго источника, используя сигнальный конус только вокруг волнового числа Найквиста (с помощью операции, похожей на операцию "удаления волн-спутников", рассмотренную выше);

2) удалять всю энергию от второго источника, которая остается позади сигнального конуса, центрированного вокруг $k=0$. Иначе говоря, полностью восстанавливать данные от первого источника.

Концепции этих двух вариантов осуществления можно обобщить для более чем двух источников и для различных переменных сигнатур. Например, при наличии третьего источника с временным дитерингом при двух последовательных взрывах и затем без временного дитеринга при следующих двух последовательных взрывах, после этого с временным дитерингом при следующих двух последовательных взрывах и т.д. получают данные с новым сигнальным конусом, центрированным вокруг половины волнового числа Найквиста.

Следует отметить, что хотя большие части f - k -пространства не занимают обычным образом регистрируемыми данными, сейсмограммы общего пункта приема обычно регистрируются разреженными, так что они уже имеют наложенные спектры с частотами, находящимися в представляющем интерес частотном диапазоне. При использовании способа, описанного в этой заявке, два массива данных начинают интерферировать даже на низкой частоте, поскольку сигнальные конусы от различных источников могут перекрываться выше некоторого порогового значения частоты. По возможности, это желательно исключать. Изобретатели нашли несколько способов минимизации данных, содержащих наложенные спектры и/или интерферирующие данные.

А. Вместо разделения данных в сейсмограммах общего пункта приема данные можно разделять в другой области, такой как сейсмограммы равных удалений. Сейсмограммы равных удалений являются в значительной степени плоскими, а кажущиеся скорости являются намного более высокими по сравнению с сейсмограммами общего пункта приема и поэтому разделяются намного лучше после f - k -преобразования, то есть сигнальный конус имеет более крутые стороны и, следовательно, является более узким и поэтому меньше интерферирует с другими сигнальными конусами. Поскольку в такой сейсмограмме последовательность модулирующих временных сдвигов сохраняется от трассы к трассе, по желанию данные можно разделять в f - k -пространстве.

В. Поскольку самые низкие частоты в каждом сигнальном конусе данных не перекрываются с самыми низкими частотами в других конусах данных (вследствие формы конусов данных), самые низкие частоты всегда свободны от наложенного спектра. Освобождение более высоких частот от наложенного спектра может быть осуществлено при использовании известных способов. В одном таком способе "интерполяции с априорными распределениями" (Spitz, 1991; Ozbek et al., 2009; Vasallo et al., 2010; Ozbek et al., 2010) используется то, что (1) модель более высоких частот без наложенного спектра можно прогнозировать по данным с наложенным спектром, (2) для вычисления априорных распределений используются низкие частоты без наложенных спектров, и (3) справедливо предположение, что данные в f - k -пространстве содержат только линейные события. Такое исключение наложенного спектра является очень эффективным в случае данных, которые в этой заявке предложено регистрировать, а также в случаях использования более двух судов с источниками.

С. Посредством исключения прямой волны, волн, канализирующихся в водном слое, преломлений на морском дне и т.д. (например, при моделировании) ширина сигнального конуса может быть значительно сужена, так что сигнальные конусы будут лучше разделяться в f - k -пространстве, а способ будет более эффективным.

Д. Если данные регистрировать на большом расстоянии от положенного места регистрации, сигнальный конус на сейсмограмме будет возникать более узким, поскольку диапазон азимута является ог-

раниченным. Выделение соответствующих сейсмограмм для сортировки данных одновременно используемых источников можно осуществлять так, чтобы по меньшей мере один сигнальный конус гарантированно был уже и лучше отделялся от другого (других).

Эти способы минимизации пригодны в любом применении предложенного способа, когда используются многочисленные источники.

2. Подавление сейсмической интерференции.

Сейсмическая интерференция оказывает нежелательное влияние на другое сейсмическое исследование, проводимое поблизости от основного сейсмического исследования. Сейсмическую интерференцию (СИ) относительно легко устранять, если интерферирующая сейсмическая энергия вступает вдоль направления линий приема сейсмической энергии. Однако особенно трудным является случай, когда сейсмическая интерференция вступает со стороны борта. При использовании способа, описанного в этой заявке, можно перемещать сигнал в f - k -пространстве, чтобы он был как можно дальше от сейсмической интерференции.

Данные сейсмической интерференции часто имеют смещение на низких частотах, сравнимое со смещением регистрируемых сейсмических данных. Чтобы в возможно большей степени исключать сейсмическую интерференцию при использовании временного дитеринга, предпочтительно выбирать большой временной сдвиг, подобный половине доминирующего периода в сейсмической интерференции. Можно ожидать, что применительно к сейсмической интерференции это будет работать особенно хорошо вследствие ограниченной по полосе частот сейсмической интерференции, так что можно будет исключать интерференцию из регистрируемых данных (низкие частоты из данных, сдвигаемые по оси волновых чисел, будут полностью попадать за пределы сигнального конуса регистрируемых данных).

При использовании предложенного способа оператор может всегда обеспечивать регистрацию массива данных на противоположной стороне оси k относительно сейсмической интерференции после f - k -преобразования независимо от направления вступления сейсмической интерференции. Следовательно, интерферирующие данные исключаются даже легче, чем в наиболее благоприятном в настоящее время случае интерференции вдоль линий приема. Надлежащая последовательность сигнатур (например, изменение полярности или дитеринг с детерминированным временным сдвигом) может быть выбрана непосредственно в полевых условиях при обнаружении сейсмической инверсии. Например, если сейсмическая инверсия обусловлена сейсмическими волнами от источника другого судна, можно выбирать соответствующую сигнатуру, если моменты запуска источника другого судна известны.

3. Ослабление остаточной помехи от взрывного источника.

Остаточная помеха от взрывного источника (ОПВИ) представляет собой регистрируемую энергию, которая приходит от глубоких отражающих границ, обменные поперечные волны, многократные отражения высокого порядка или сочетания их, но образуемые в результате предшествующего взрыва. Основное свойство помехи от взрывного источника заключается в том, что она ограничивает отношение сигнала к шуму в регистрируемых данных в случаях, когда помехи других видов, такие как помехи окружающей среды, являются более слабыми. Поэтому при таких сценариях остаточную помеху от взрывного источника можно ослабить либо i) более быстрой съемкой сейсмических данных (приводящей к повышению скорости буксировки и следовательно, к более коротким записям), либо ii) более плотной съемкой, либо iii) поддержанием постоянными скорости буксировки и плотности взрывов, чем можно гарантировать, что данные всегда будут иметь более высокое качество. Поэтому удаление остаточной помехи от взрывного источника может существенно влиять на экономическую эффективность разведки. Следует отметить, что остаточная помеха от взрывного источника является особенно проблематичной на низких частотах, поскольку низкочастотные данные меньше ослабляются в подземной геологической среде, и поэтому требуется большее время ожидания спада помехи, после которого можно регистрировать новый "незагрязненный" взрыв.

В одном варианте осуществления можно использовать нижеследующий способ отделения остаточной помехи от взрывного источника при регистрации сейсмических данных с использованием одного судна с источником. Во-первых, выполняют два последовательных взрыва с одной и той же полярностью. Затем выполняют два последовательных взрыва с противоположной полярностью. Затем опять выполняют два последовательных взрыва с такой же полярностью, как первые два, с последующим выполнением еще двух с противоположной полярностью и т.д. После регистрации данных умножают все взрывы с противоположной полярностью на -1 (или умножают все взрывы с положительной полярностью на -1), так что теперь все трассы будут иметь одинаковую полярность. Интересно, что остаточная помеха от взрывного источника будет иметь противоположную полярность в каждой второй трассе. Вследствие этого после f - k -преобразования остаточная помеха от взрывного источника заканчивается на стороне оси k , противоположной стороне полезного сигнала, и может быть эффективно обнулена.

В другом варианте осуществления флип/флоп-источники можно использовать таким образом, чтобы время между последовательными флоп-взрывами всегда было, по существу, одинаковым и также, по существу, таким же, как время между последовательными флип-взрывами. Однако время между флип-взрывом и флоп-взрывом отличается от времени между флоп-взрывом и флип-взрывом.

На фиг. 13 показано, каким образом можно регистрировать флип/флоп-данные с временными сдвигами.

гами этих видов при совершенно равномерном расположении источников. В верхней части фиг. 13 показана компоновка обычного флип/флоп-источника, при этом двумя звездочками обозначены две группы воздушных пушек, которые имеют одинаковый продольный вынос, но сдвинуты поперек линий приема. В нижней части фиг. 13 флип-источник дополнительно сдвинут относительно флоп-источника в направлении линий приема.

В качестве примера рассмотрим случай, когда данные регистрируют при скорости буксировки 2,5 м/с. При обычной регистрации данных от флип/флоп-источника взрыв производят через каждые 10 с, так что расстояние между флоп-взрывами составляет 50 м и расстояние между флип-взрывами также составляет 50 м. Флип-взрыв и флоп-взрыв идеально смещены относительно друг друга.

В предложенном способе небольшой временной сдвиг между флип-взрывом и флоп-взрывом можно вводить в качестве временного дитеринга. Например, время между флип-взрывом и флоп-взрывом составляет 9,8 с, а время между флоп-взрывом и флип-взрывом составляет 10,2 с. При смещении источников в направлении линии приема, как это показано в нижней части фиг. 13, можно регистрировать данные на полностью регулярной сетке. Все, что для этого требуется, так это смещение источников на расстояние, соответствующее расстоянию, на которое судно перемещается в течение 0,2 с, в этом случае на 0,5 м. Следует отметить, что в случае предпочтительных времен сдвига, например 10 или 20 мс, это расстояние является столь малым, что его можно игнорировать (2,5 см в случае временного сдвига 10 мс), так что можно буксировать флип/флоп-источники как обычные (верхняя часть фиг. 13).

На фиг. 14 показаны сейсмограммы общего пункта приема, зарегистрированные с использованием флип/флоп-возбуждения обычным способом (слева) и новым способом, описанным в этой заявке, после исключения временного сдвига, внесенного во время проведения разведки (справа). Показан случай, когда при использовании нового способа источники буксировали быстрее, так что длительность записи меньше на правой стороне фиг. 14, чем на левой стороне. Как сигнал, так и остаточная помеха от взрывного флоп-источника имеют черный цвет, тогда как вступления, обусловленные флип-источником, имеют серый цвет. В случае обычного способа заметно, что как сигнал, так и остаточная помеха от взрывного источника являются когерентными и непрерывными от взрыва к взрыву. Однако в случае использования предложенного способа заметно, что в то время как сигнал остается непрерывным от взрыва к взрыву, остаточная помеха от взрывного источника претерпевает временной сдвиг, который в два раза больше, чем исходный временной сдвиг, внесенный во время проведения разведки. То есть, если данные регистрировать при временном промежутке 9,8 с между флип-взрывом и флоп-взрывом и 10,2 с между флоп-взрывом и флип-взрывом, остаточная помеха от взрывного источника будет сдвинута на 0,4 с от трассы к трассе после исключения временного сдвига, так что сигнал будет непрерывным между взрывами. Как было описано выше, этот эффект можно использовать для перемещения остаточной помехи от взрывного источника на расстояние от сигнала, центрированного вокруг волнового числа $k=0$, к противоположному концу оси волновых чисел (k волновому числу Найквиста). Теперь можно полностью удалить остаточную помеху от взрывного источника без повреждения сигнала после, например, соответствующего преобразования в f - k -область. Следует отметить, что оптимальный выбор временного сдвига между флип-источником и флоп-источником зависит от геологии и характера остаточной помехи от взрывного источника. Вероятно, что точно так же, как в случае применения для сейсмической интерференции, будет достигаться преимущество в результате сосредоточения только на низких частотах (точно так же, как в случае сейсмической интерференции, для остаточной помехи от взрывного источника характерна тенденция быть сильно выраженной на низких частотах). И в этом случае конкретное преимущество отдания предпочтения низким частотам заключается в том, что будет намного меньшая необходимость в разрешении проблем, связанных с пространственным искажением вследствие наложения спектров.

Хотя рассмотрение было сделано применительно к флип/флоп-источникам, этот же принцип можно использовать в случае любого источника с переменной сигнатурой, изменяющейся периодически.

4. Моделирование сейсмических данных и обратная миграция во временной области (ОМВО).

Механизмы сейсмического моделирования, такие как метод конечных разностей (КР), в существующем уровне техники образуют основу моделирования, построения изображений и получения алгоритмов инверсии. Для таких механизмов моделирования требуются очень простые вычисления, а при формировании синтетических данных с одновременным использованием нескольких пунктов взрыва эффективность можно значительно повышать.

Ясно, что при использовании предложенного способа можно сразу же получать синтетические данные без наложенных спектров при двух (или большем количестве) одновременно используемых источников. Это особенно относится к случаю, когда все, кроме только одного из источников, излучают низкие частоты до места, где они начинают интерферировать с другими данными, поскольку в этом случае образуемые данные всегда свободны от наложенных частот и могут быть получены на достаточно низких частотах.

Таким образом, низкочастотные данные можно без дополнительных усилий получать одновременно от обычных источников и тем самым, с учетом вычислительной мощности эффективно осуществлять регистрацию. Низкочастотные данные содержат довольно низкие частоты, так что не будут интерфери-

ровать с любыми данными от другого низкочастотного источника (источников) или обычного источника (источников).

Кроме того, рассмотренные выше способы, относящиеся к минимизации интерференции и наложению спектров, можно использовать для смягчения проблем интерференции между источниками и наложения спектров.

5. Регистрация широкополосных сейсмических данных.

Чтобы выполнять широкополосную регистрацию, предложено использовать специализированный низкочастотный источник, такой как "сабвуфер", в сочетании с обычным источником (Berkhout (2012)). При использовании изобретения можно регистрировать данные от такого сабвуфера одновременно с данными от обычного источника, диапазон которого включает в себя небольшое количество низких частот, а преимущественно промежуточные и высокие частоты. Поэтому регистрация данных от сабвуфера с инвертированной полярностью на каждом втором месте взрыва может быть осуществлена вообще без интерференции с обычными данными (аналогично применению моделирования, описанному ранее). В ином случае можно использовать временной дитеринг.

Кроме того, в зависимости от максимальной частоты данных от сабвуфера можно выбирать разреженную регистрацию без интерференции с обычными данными от взрыва и без наложения спектров самого сабвуфера. Однако известно, что морские сейсмические вибраторы неэффективны при излучении низких частот. Поэтому даже в случае, если поставить задачу создания низкочастотного морского сейсмического вибратора, вероятно, можно будет извлечь пользу от частого возбуждения, необходимого для возмещения небольшой выходной мощности.

Таким образом, многочисленные одновременно используемые источники могут содержать по меньшей мере один низкочастотный источник и по меньшей мере один обычный источник.

6. Экономически эффективная регистрация данных поперечных волн.

Данные обменных (поперечных) волн можно регистрировать более эффективно при использовании временного дитеринга или инвертирования полярности, концепции, обеспечивающей длительность регистрации, которая аналогична длительности регистрации данных обычных продольных волн. Процедура и преимущества аналогичны описанным выше применительно к остаточной помехе от взрывного источника.

Следует отметить, что как остаточная помеха от взрывного источника, так и поперечные волны наблюдаются на записи позднее и в обоих случаях кажущиеся волновые числа ограничены (волны вступают преимущественно почти вертикально), так что временной дитеринг будет работать особенно хорошо.

Кроме того, в случае регистрации данных продольных и поперечных волн достигается преимущество вследствие того, что для данных поперечных волн характерна тенденция вступления большей частью в виде горизонтальной составляющей при регистрации на дне моря, и это приводит к более благоприятному отношению сигнала к шуму в процессе разделения. Подобным же образом данные продольных волн преобладают в записях продольных и поперечных волн.

Наконец, точно так же, как и в применении к подавлению остаточной помехи от взрывного источника, достигается преимущество, заключающееся в том, регистрируемые вступления поперечных волн обычно не имеют высоких частот и поэтому ограничены более низкими кажущимися волновыми числами, и с меньшей долей вероятности интерферируют.

7. Удаление волн-спутников и градиенты на стороне источника при интерполяции.

Применением последовательностей дитеринга к различным подгруппам в группе воздушных пушек можно разделять регистрируемые сигналы от подгрупп, вследствие чего можно вычислять горизонтальные градиенты на стороне источника. Это полезно для удаления волны-спутника на стороне источника и при других применениях.

При применении концепции одновременно используемых источников (или подгрупп), которые расположены близко друг к другу, можно оценивать производные по пространству в вертикальном и горизонтальном направлениях. Следует отметить, что можно использовать различные последовательности сигнатур, чтобы иметь три (или даже большее количество) подгрупп, возбуждаемых одновременно с различным временным дитерингом, сигналы от которых в дальнейшем могут быть разделены. На основании этих данных производные по пространству волнового поля на стороне источника могут быть вычислены для различных применений, например вертикальную производную можно использовать для удаления волны-спутника на стороне источника и/или горизонтальные производные можно использовать для пространственного восстановления волнового поля на стороне источника (Robertsson et al., 2008).

По существу, в этом случае группа (или подгруппа) рассматривается как содержащая многочисленные источники. Если сигнатуру каждого источника или каждой подгруппы изменять в соответствии с предложенным способом, можно узнавать, какие зарегистрированные данные исходят от каждого источника (или подгруппы). Знание этого сильно облегчает удаление волн-спутников и вычисление градиентов на стороне источника.

Литература

- Berkhout A.J. (2012), "Blended acquisition with dispersed source arrays", *Geophysics*, 77(4), A19-A23.
- Özbek A., Özdemir A.K. and Vassallo M. (2009, January), "Interpolation by matching pursuit", 2009 SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
- Özbek A., Vassallo M., Özdemir A.K., van Manen D.J. and Eggenberger K. (2010), "Crossline wavefield reconstruction from multicomponent streamer data: Part 2 - Joint interpolation and 3D up/down separation by generalized matching pursuit", *Geophysics*, 75(6), WB69-WB85.
- Robertsson J.O.A., Moore I., Vassallo M., Özdemir A.K., van Manen D.J. and Özbek A., 2008, "on the use of multicomponent streamer recordings for reconstruction of pressure wavefields in the crossline direction", *Geophysics*, 73, A45-A49.
- Spitz S. (1991), "Seismic trace interpolation in the FX domain", *Geophysics*, 56(6), 785-794.
- Vassallo M., Özbek A., Özdemir A.K. and Eggenberger K. (2010), "Crossline wavefield reconstruction from multicomponent streamer data: Part 1 - Multichannel interpolation by matching pursuit (MIMAP) using pressure and crossline gradient", *Geophysics*, 75(6), WB53-WB67.
- Yilmaz (2001), "Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data", *Investigations in Geophysics: SEG*.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ формирования геофизических данных с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, включающий в себя этапы, на которых
 - создают геофизическое волновое поле с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки,
 - при этом сигнатуру геофизического волнового поля изменяют по периодической схеме с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и
 - использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает в себя этап, на котором изменяют
 - момент времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или
 - полярность сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или
 - фазу сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или
 - амплитуду сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки,
 - при этом периодическая схема представляет собой такую, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются.
2. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя этапы, на которых
 - регистрируют геофизическую энергию для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и
 - преобразуют геофизические данные из первой области в другую область.
3. Способ по п.2, дополнительно включающий в себя этапы, на которых
 - отделяют геофизические данные, возникающие из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области,
 - и предпочтительно преобразовывают отделенные геофизические данные обратно в область, в которой геофизические данные регистрировали.
4. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя этапы, на которых
 - регистрируют геофизическую энергию для получения геофизических данных с использованием по меньшей мере одного приемника, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и

отделяют геофизические данные, возникающие из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут присутствовать в другой области,

причем этап отделения предпочтительно содержит фильтрацию зарегистрированных данных.

5. Способ по п.3 или 4, дополнительно включающий в себя этапы, на которых

подготавливают отделенные данные для удаления картины переменной сигнатуры из зарегистрированных геофизических данных,

причем этап подготовки предпочтительно выполняют в другой области или в области, в которой геофизические данные регистрировали.

6. Способ по любому из пп.3-5, дополнительно включающий в себя этапы, на которых осуществляют регуляризацию отделенных данных.

7. Способ по любому из пп.2-6, в котором периодическая схема является такой, что после преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую область первая часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одной воздушной пушкой, сдвигается относительно второй части зарегистрированных геофизических данных, возникающих из распространяющегося геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере одной воздушной пушкой, а способ включает в себя этапы, на которых

идентифицируют первую часть; и

обрабатывают данные для вычисления сигнала полных данных на сдвинутом месте нахождения первой части при использовании идентифицированной первой части, причем сигнал полных данных представляет собой данные, которые будучи сдвинутыми на сдвинутое место, имеют все данные, возникающие из создаваемого геофизического волнового поля, сдвинутые на сдвинутое место; и/или

обрабатывают данные для удаления второй части данных при использовании идентифицированной первой части.

8. Способ по любому предшествующему пункту, в котором создают множество геофизических волновых полей с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг,

причем переменный временной дитеринг предпочтительно является таким, что каждое второе геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере одной воздушной пушкой, иницируется с постоянной задержкой T во времени.

9. Способ по любому предшествующему пункту, в котором создают множество геофизических волновых полей с переменной сигнатурой с использованием по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом сигнатуру изменяют посредством изменения полярности,

причем переменная полярность предпочтительно является такой, что каждое второе геофизическое волновое поле, создаваемое по меньшей мере одной воздушной пушкой, имеет противоположную полярность.

10. Способ по любому предшествующему пункту, включающий в себя выбор переменной сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки такой, чтобы после регистрации геофизической энергии, содержащей созданное геофизическое волновое поле и другой сигнал, и преобразования зарегистрированных геофизических данных в другую подходящую область зарегистрированные геофизические данные, возникающие из созданного геофизического волнового поля, были сдвинуты от зарегистрированных геофизических данных, возникающих из другого сигнала,

причем другой сигнал предпочтительно возникает от помехи, интерференции или одного или более других источников.

11. Способ по любому предшествующему пункту, в котором по меньшей мере два источника используют для одновременного создания геофизических волновых полей, при этом первый источник имеет переменную сигнатуру на периодической схеме, а второй источник не имеет переменной сигнатуры на периодической схеме или имеет другую переменную сигнатуру в соответствии с периодической схемой, и или

способ включает в себя выбор такой переменной сигнатуры или сигнатур, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть продольной волны из геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части поперечной волны из геофизических данных, и/или

геофизические волновое поле, энергия и/или данные являются сейсмическими волновым полем, энергией и/или данными или геофизические волновое поле, энергия и/или данные являются электромагнитными волновым полем управляемого источника, энергией и/или данными, и/или

преобразование может быть преобразованием Фурье, преобразованием Tau-P или преобразованием Радона, и/или

геофизические данные представляют собой двумерные или трехмерные геофизические данные.

12. Способ по любому предшествующему пункту, включающий в себя выбор такой переменной сигнатуры, чтобы после регистрации регистрируемых геофизических данных и преобразования в другую

область часть зарегистрированных геофизических данных, возникающих из созданного волнового поля, была, по меньшей мере, частично сдвинута от интерференционной части зарегистрированных геофизических данных.

13. Способ по п.12, в котором сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг, при этом интерференционная часть имеет доминирующую частоту, а способ включает в себя этап, на котором используют временной дитеринг, приблизительно такой как половина или четверть периода доминирующей частоты.

14. Способ по любому предшествующему пункту, включающий в себя выбор такой переменной сигнатуры, чтобы после регистрации геофизических данных и преобразования в другую область часть остаточной помехи от взрывного источника из зарегистрированных геофизических данных была, по меньшей мере, частично сдвинута от части геофизических данных, возникающих из созданного геофизического волнового поля.

15. Способ по п.14, в котором сигнатуру изменяют, используя временной дитеринг, при этом часть остаточной помехи от взрывного источника имеет доминирующую частоту, а способ включает в себя этап, на котором используют временной дитеринг приблизительно такой, как половина или четверть периода доминирующей частоты остаточной помехи от взрывного источника, или

сигнатуру изменяют посредством изменения полярности, при этом часть остаточной помехи от взрывного источника имеет доминирующую частоту, а периодическая схема переменной полярности последовательно создаваемых геофизических волновых полей представляет собой второе создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую же полярность, что и первое создаваемое геофизическое волновое поле, третье создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее полярность, противоположную полярности второго создаваемого геофизического волнового поля, четвертое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую же полярность, что и третье создаваемое геофизическое волновое поле, пятое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее полярность, противоположную полярности четвертого создаваемого геофизического волнового поля, шестое создаваемое геофизическое волновое поле, имеющее такую полярность, что и пятое создаваемое геофизическое волновое поле (то есть +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, -1) и т.д.

16. Способ по любому предшествующему пункту, в котором время между созданием последовательных геофизических волновых полей меньше, чем время, затрачиваемое для регистрации приемником энергии геофизического волнового поля, исходящей из каждого создаваемого геофизического волнового поля, при этом

способ предпочтительно включает в себя этап, на котором идентифицируют данные в заданной трассе, получаемой из геофизического волнового поля, созданного ранее, по времени инициирования заданной трассы и добавление этих идентифицированных данных к данным предшествующей трассы, получаемым из того же самого геофизического волнового поля.

17. Способ по любому предшествующему пункту, включающий уменьшение длительности сигнала данных, исходящего по меньшей мере от одной воздушной пушки, в другой области, при этом

способ предпочтительно включает в себя удаление низкоскоростных волн из зарегистрированного волнового поля в случае, когда геофизические волновое поле, энергия и/или данные являются сейсмическими волновым полем, энергией и/или данными.

18. Способ по любому предшествующему пункту, используемый в способе моделирования, построения изображений или инверсии.

19. Система для формирования геофизических данных, содержащая по меньшей мере одну воздушную пушку для создания геофизического волнового поля с переменной сигнатурой, при этом по меньшей мере одна воздушная пушка выполнена с возможностью изменения сигнатуры геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и

использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает в себя изменение

момента времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или

полярности сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

фазы сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

амплитуды сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, при этом периодическая схема представляет собой такую, что, когда геофизическое волновое поле регистрируют, и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются.

20. Система по п.19, содержащая

по меньшей мере один приемник для регистрации геофизической энергии для получения геофизических данных, при этом геофизическая энергия содержит распространяющееся геофизическое волновое

поле, создаваемое по меньшей мере на одной воздушной пушке; и

процессор для преобразования зарегистрированных геофизических данных из первой области в другую область, и/или

отделения геофизических данных, возникающих из геофизического волнового поля, создаваемого по меньшей мере на одной воздушной пушке, от любых других геофизических данных, которые могут быть представлены в другой области,

причем процессор предпочтительно содержит фильтр для фильтрации регистрируемых данных.

21. Система по п.19 или 20, содержащая по меньшей мере два источника, каждый для создания геофизического волнового поля, при этом первый источник выполнен с возможностью изменения сигнатуры своего геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой, а второй источник выполнен с возможностью не изменения сигнатуры своего геофизического волнового поля в соответствии с периодической схемой или выполнен с возможностью изменения сигнатуры своего геофизического волнового поля в соответствии с другой периодической схемой.

22. Система по любому из пп.19-21, выполненная с возможностью осуществления способа по любому из пп.1-18.

23. Компьютерный машиночитаемый носитель, содержащий машиночитаемые инструкции, которые при выполнении на компьютере конфигурируются для

побуждения по меньшей мере одной воздушной пушки к созданию геофизического волнового поля с переменной сигнатурой,

при этом сигнатура изменяется в соответствии с периодической схемой с использованием детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки; и

использование детерминированного изменения сигнатуры по меньшей мере одной воздушной пушки включает изменение

момента времени, в который геофизическое волновое поле создается по меньшей мере одной воздушной пушкой, и/или

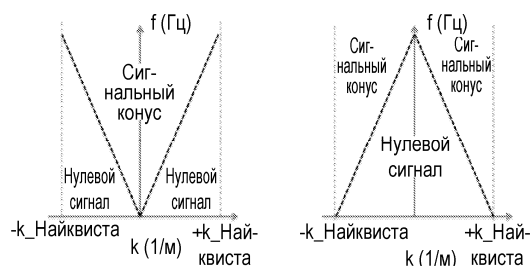
полярности сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

фазы сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки, и/или

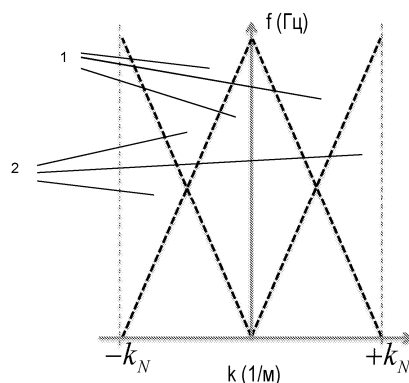
амплитуды сигнала по меньшей мере одной воздушной пушки,

при этом периодическая схема представляет собой такую, что когда геофизическое волновое поле регистрируют и регистрируемые геофизические данные преобразуют в другую область, по меньшей мере некоторые из регистрируемых геофизических данных сдвигаются на место в другой области, которое отличается от места в другой области, где, по меньшей мере, некоторые из геофизических данных, имеющие переменную сигнатуру, не используются,

причем компьютерный машиночитаемый носитель предпочтительно сконфигурирован для выполнения любого из способов по пп.1-18.

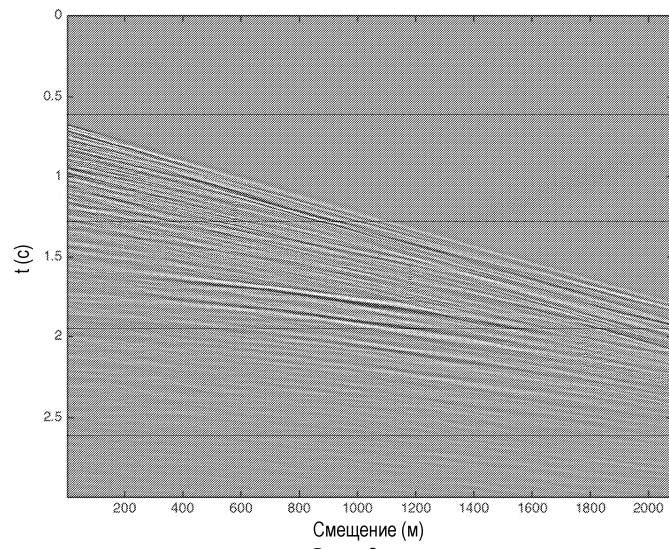


Фиг. 1

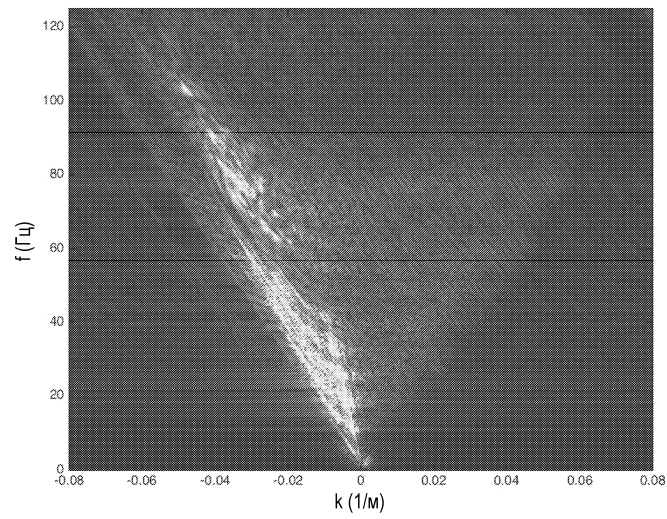


Фиг. 2

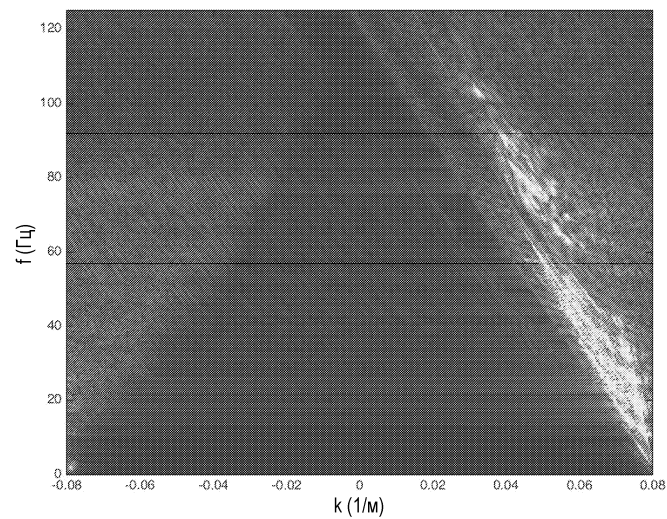
038811



Фиг. 3

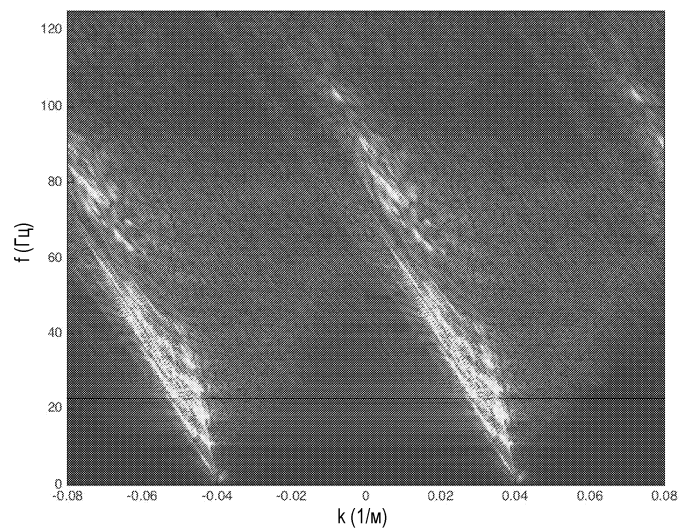


Фиг. 4

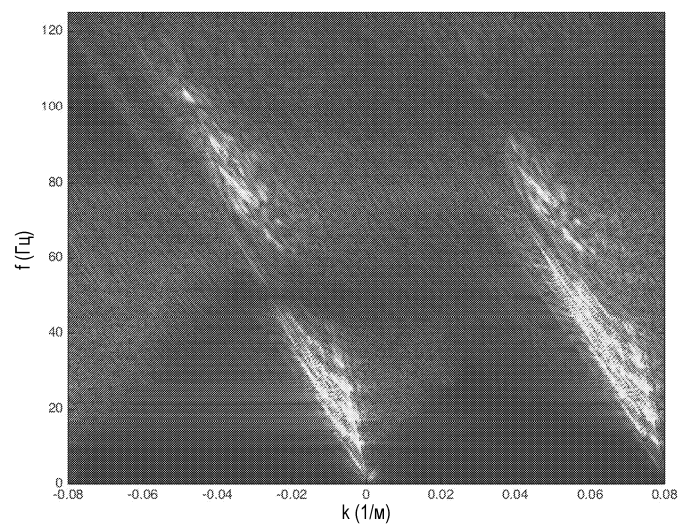


Фиг. 5

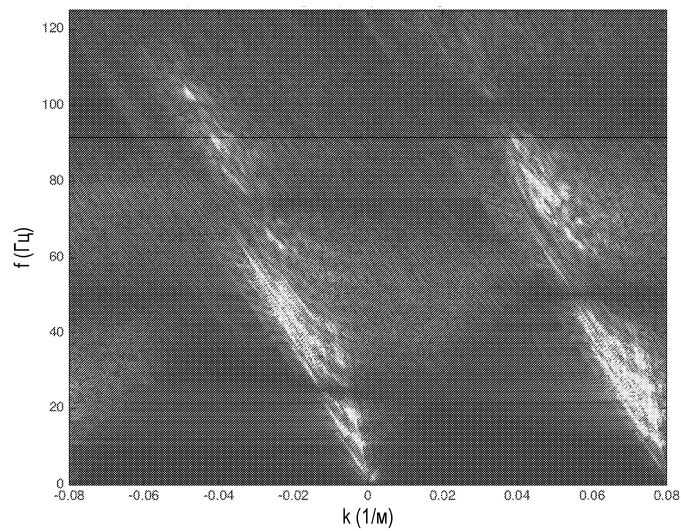
038811



Фиг. 6

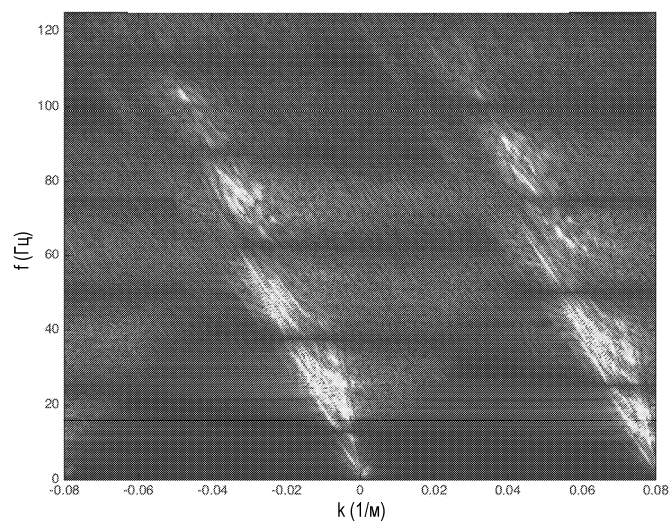


Фиг. 7

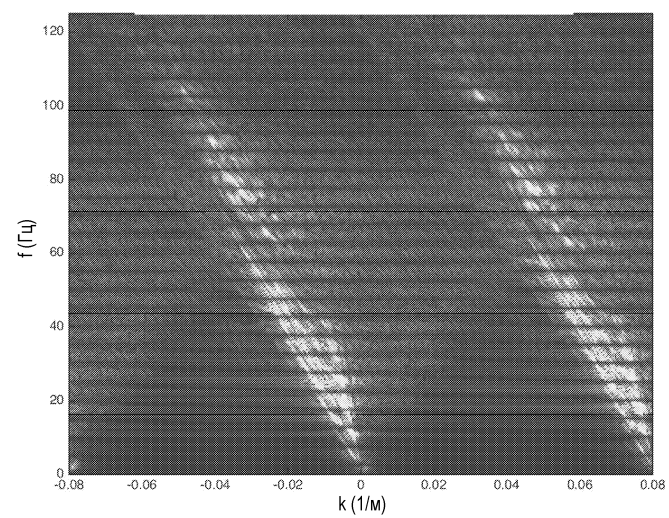


Фиг. 8

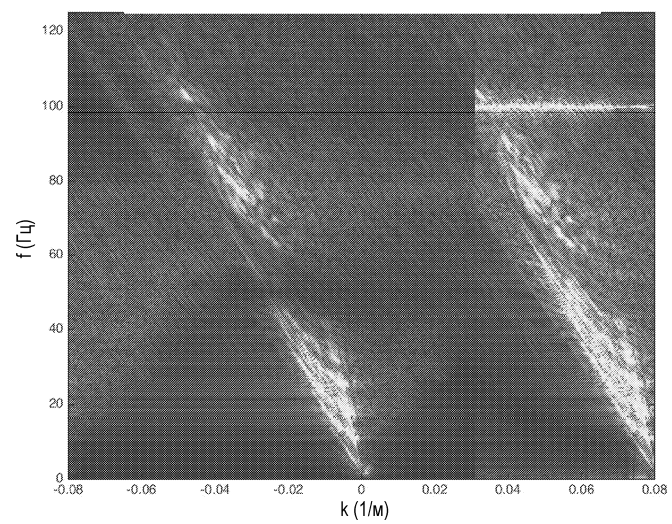
038811



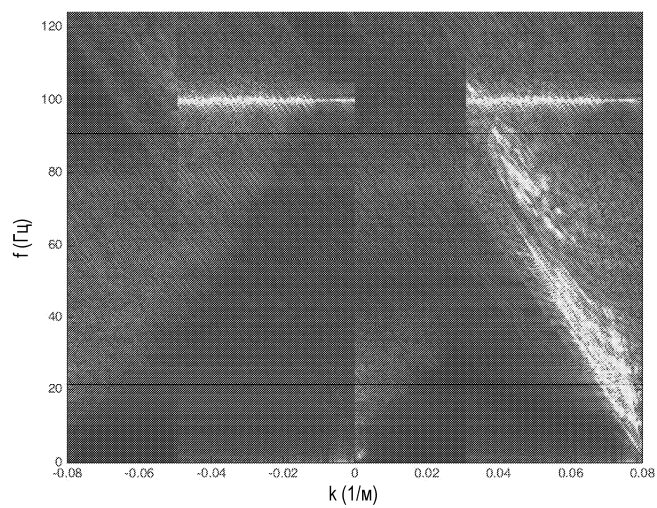
Фиг. 9



Фиг. 10



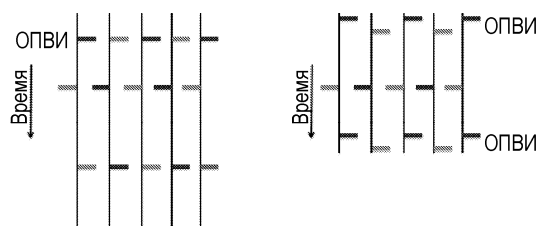
Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2