

Область техники

Настоящее изобретение относится к морской сейсморазведке, в которой движущийся корабль генерирует сейсмические волны и детектирует отражения. Более конкретно, изобретение касается способа и устройства обработки данных по отраженным сейсмическим волнам так, чтобы корректировать данные с учетом движения корабля.

Предшествующий уровень техники

Сейсмология фокусируется на использовании искусственно генерируемых упругих волн для определения местоположения месторождений полезных ископаемых, таких как углеводороды, руды, вода и геотермальные подземные резервуары. Сейсмология также используется для археологических целей и для получения геологической информации для технических целей. Сейсморазведка позволяет получить данные, которые при использовании в сочетании с другими имеющимися геофизическими, геологическими данными и данными, полученными из скважин, могут дать информацию о структуре и распределении типов пород и их содержании.

Чтобы вкладывать средства в бурение разведочных нефтяных скважин, большинство нефтяных компаний выбирают участки путем интерпретации сейсмических данных. Несмотря на тот факт, что сейсмические данные используются для отображения геологических структур, а не для непосредственного обнаружения нефти, сбор сейсмических данных стал крайне необходимой частью при выборе места для разведочных и эксплуатационных скважин. Опыт показал, что использование сейсмических данных значительно увеличивает вероятность успеха.

Сбор сейсмических данных обычно осуществляется на земле и на море. На море сейсморазведочные корабли разворачивают сеймоприемную косу или сейсморазведочный кабель позади корабля, когда корабль движется вперед. Сеймоприемная коса содержит множество приемников, установленных в соответствии с какой-либо схемой расположения, обычно, как показано на фиг. 1. Сеймоприемная коса 110 тянется позади корабля 100, который движется в направлении стрелки 102. Источник 112 также перемещается позади корабля 100. Источник 112 и приемники 114 обычно разворачиваются ниже поверхности океана 104. Сеймоприемная коса 110 также содержит электрический или волоконо-оптический кабель для соединения приемников 114 и сейсмооборудования, находящегося на корабле 100. Сеймоприемные косы обычно выполняются в виде секций длиной от 25 до 100 м и включают группы до 35 или более равномерно разнесенных между собой приемников. Сеймоприемные косы могут быть длиной в несколько миль, и часто сейсморазведочные корабли тянут множество сеймоприем-

ных кос для увеличения количества собранных сейсмических данных. Данные переводятся в цифровую форму вблизи приемников 114 и передаются на корабль 100 по кабелю со скоростью 7 (или более) миллионов бит данных в секунду. Находящееся на борту корабля оборудование по обработке данных управляет работой источника и приемников, которые тянутся за кораблем, и обрабатывает собранные данные.

Способы обработки сейсмических данных позволяют оценивать расстояние между поверхностью океана 104 и подповерхностными структурами, такими как структура 106, которая лежит ниже дна 108 океана. С помощью оценки расстояния до подповерхностной структуры можно определить геометрию и топографию этой структуры. Определенные топографические особенности являются индикаторами наличия нефтяных и/или газовых резервуаров.

Чтобы определить расстояние до подповерхностной структуры 106 источник 112 излучает сейсмические волны 116, которые отражаются от подповерхностной структуры 106. Отраженные волны детектируются приемниками 114. Определив продолжительность временного интервала, в течение которого сейсмические волны 116 распространяются от источника 112 до подповерхностной структуры 106, можно получить оценку расстояния до подповерхностной структуры 106.

Приемники, используемые в морской сейсморазведке, обычно называются гидрофонами или аппаратами для измерения морского давления, и обычно они выполнены с использованием пьезоэлектрического преобразователя. Как правило, используются синтетические пьезоэлектрические материалы, такие как цирконат бария, титанат бария или матаниобат свинца. Когда пластинка из пьезоэлектрического материала подвергается механическому изгибу, то между ее противоположными сторонами возникает разность потенциалов. Тонкое электропроводящее покрытие, нанесенное на эти поверхности, позволяет выполнить электрическое соединение к измерительному устройству, так что разность потенциалов можно измерить. Это напряжение пропорционально величине механического изгиба или изменению давления, которому подвергается приемник в результате распространения через воду сейсмической энергии. Имеются различные типы гидрофонов, такие как дисковые гидрофоны и цилиндрические гидрофоны.

Для генерации сейсмических волн, чтобы проводить сейсмические измерения, используются два типа сейсмических источников. Источник первого типа представляет собой импульсный источник, который генерирует импульсы, короткие по длительности и с высокой энергией. Промежутки времени между испусканием источником импульса и детектированием отраженного импульса приемником используют-

ся при исследовании для определения расстояния до подповерхностной структуры. Импульсный источник и сбор соответствующих данных, а также система обработки данных относительно простые. Однако энергия, требующаяся для сейсморазведки, где используются импульсные источники, в некоторых случаях может быть губительной для морских обитателей, находящихся в непосредственной близости от источника 112.

Проблемы, связанные с негативным влиянием импульсных источников на окружающую среду, привели к использованию сейсмоисточников другого типа, которые генерируют колебательную энергию меньшей амплитуды и в течение более продолжительного времени. Способ измерения, в котором используется такой источник, называется морским вибрационным сейсмическим (МВС) способом. В отличие от передачи в океан импульса давления высокой амплитуды за очень короткий период времени вибрационные источники излучают волны с более низкой амплитудой в течение временного периода обычно от 5 до 7 с, но возможны также и более длительные временные периоды. Частота вибрирующего источника изменяется приблизительно от 5 до 150 Гц, хотя конкретные значения нижних и верхних частот от системы к системе отличаются. Частота источника может изменяться линейно или нелинейно во времени. Такая картина изменения частоты обычно называется "качанием частоты". Качание частоты происходит в диапазоне от 5 до 150 Гц и в течение от 5 до 7 с. Амплитуда колебаний сейсмических волн может изменяться или оставаться постоянной. Однако амплитуда этих колебаний значительно ниже, чем величина импульсов, создаваемых импульсными источниками, и, следовательно, меньше вреда оказывается на окружающую среду.

Сейсморазведочные корабли должны двигаться вперед во время проведения сейсмических измерений по многим причинам. Гидрофоны 114 вместе с соединяющими проводами и элементами нагрузки, находящимися на сейсмоприемных косах, обычно размещаются внутри неопреновой трубки (на фиг. 1 не показаны) диаметром 2,5-5 дюймов. Затем трубка заполняется жидкостью, которая в достаточной степени легче воды, чтобы сейсмоприемная коса была нейтрально плавучей. Когда сейсмоприемная коса движется вперед, то отклонитель 118 вытягивает сейсмоприемную косу 114 до соответствующей рабочей ширины. Устройства управления глубиной погружения (не показаны) прикреплены к сейсмоприемной косе в различных местах вдоль ее длины. Эти устройства воспринимают гидростатическое давление и отклоняют "крылья" регуляторов глубины погружения так, чтобы поток воды над ними поднимал или опускал сейсмоприемную косу до требуемой глубины. Глубина погружения, которую удается

поддерживать устройствам управления, может регулироваться с помощью сигнала по кабелю сейсмоприемной косы, при желании глубина погружения может изменяться.

Чтобы система управления глубиной погружения сейсмоприемной косы работала эффективно, корабль 100 должен двигаться со скоростью приблизительно четыре узла. Кроме того, поскольку сейсмоприемная коса 110 представляет собой в нормальном виде гибкий кабель, то корабль должен двигаться вперед для поддержания требуемого фиксированного расстояния между источниками 112 и сейсмоприемными косами 110. Расстояние между источниками и сейсмоприемными косами - это важный параметр в морской сейсморазведке, и он не должен изменяться при проведении сейсмических измерений.

Движение вперед также необходимо для работы отклонителя(лей) 118. Когда сейсморазведочный корабль развертывает множество сейсмоприемных кос, отклонители используются для обеспечения фиксированного расстояния между сейсмоприемными косами. Отклонители воздействуют на сейсмоприемные косы в боковом направлении при движении судна вперед. Без отклонителей сейсмоприемные косы могут перепутаться между собой. Относительная скорость воды вокруг отклонителей и угол атаки определяют величину расстояния между сейсмоприемными косами.

Движение корабля вперед необходимо также потому, что это позволяет каждый день охватывать с помощью сейсморазведочных кораблей как можно большую поверхность океана. По этим и другим причинам сейсморазведочные корабли должны двигаться вперед при выполнении измерений, и скорость продвижения должна быть постоянной. Обычно скорость корабля составляет приблизительно 2-3 м в секунду. Поскольку сейсмоприемная коса разворачивается позади корабля, источник и приемники также движутся со скоростью приблизительно 2,5 м в секунду.

Морские сейсмические измерения также могут быть выполнены с использованием способа, называемого "кабель на дне" (КНД), при котором корабль укладывает один или более кабелей, содержащих гидрофоны и геофоны, на дно океана. Такой корабль остается неподвижным и записывает информацию, когда производится сбор сейсмических данных. Второй корабль, содержащий источники, движется параллельно или под некоторым углом по отношению к кабелям. В способе КНД приемники не перемещаются, но источники перемещаются и, следовательно, полученные данные могут быть искаженными. Более того, при особых обстоятельствах некоторые из приемников могут быть на земле. Несмотря на то, что способ КНД обычно более дорогой, чем способ морской сейсморазведки с буксируемыми сейсмоприем-

ными косами, но способ КНД может быть необходим в случае, если в обследуемой зоне имеются земные преграды, например, острова.

Хотя движение корабля необходимо, но это движение искажает или "размазывает" полученные сейсмические данные. В широком смысле, размазывание происходит из-за того, что корабль, и источники, и приемники движутся при сборе данных. В размазывании данных в МВС системе заметный вклад вносят движение приемника и источника. Следовательно, полученные МВС данные должны быть скорректированы с учетом движения приемника и источника. Предыдущие попытки вводить поправки на движение корабля основывались на предположении о постоянстве скорости (распространения сейсмической волны), что является неправильным для большинства геологических структур.

Краткое изложение существа изобретения

В основу настоящего изобретения поставлена задача создания сейсмической системы для использования в морской сейсморазведке, которая осуществляет коррекцию данных с учетом движения корабля. Такая система предпочтительно должна вводить поправку на движение приемника и источника и делать это недорогим эффективным способом.

Поставленная задача решается путем создания сейсмической системы с улучшенным способом уменьшения искажений, обусловленных движением источника и приемника в морских сейсмических измерениях, содержащая сейсмоисточник, сеймоприемник, блок сопряжения источника и приемника, блок обработки данных, блок хранения данных, дисплей, устройство для ввода данных пользователем. Блок обработки данных выполнен с возможностью приема данных сейсмических измерений от сеймоприемника и создания модели скорости сейсмической волны, исходя из принятых данных. В блоке обработки данных используется эта модель скорости для вычисления функции расширения, которая является указателем искажения, обусловленного движением сейсмоисточника. В блоке обработки данных корректируются данные сейсмических измерений для учета этого искажения путем вычисления преобразования сейсмических измерений, затем осуществляется разделение преобразованных измерений на "секторы по углам падения", выполняется обратное преобразование для индивидуальных секторов по углам падения, корректировка измерений для этих секторов по углам падения в соответствии с функцией расширения и суммирование скорректированных измерений для секторов по углам падения для получения скорректированных сейсмических измерений.

Описанная система и способ успешно обеспечивают более точную корректировку для учета движения источника, что в свою очередь дает сейсмические данные, имеющие значи-

тельно уменьшенное "размазывание", когда для уменьшения сейсмического шума выполняется усреднение.

Краткое описание чертежей

В дальнейшем изобретение поясняется описанием предпочтительного варианта выполнения со ссылками на сопровождающие чертежи, на которых

фиг. 1 изображает известную систему сейсмических измерений с буксируемой группой сеймоприемных кос, включающей сейсмоисточник и множество приемников;

фиг. 2 - систему сейсмических измерений, выполненную в соответствии с предпочтительным вариантом настоящего изобретения;

фиг. 3 - блок-схему алгоритма способа корректировки сейсмических данных для учета искажений, обусловленных движением источника и приемников, согласно изобретению;

фиг. 4 - примерные данные по давлению, полученные от множества приемников, и искажающий эффект от движения приемников на полученных данных, согласно изобретению;

фиг. 5 - блок-схему алгоритма предпочтительного способа корректировки сейсмических данных для учета искажения, обусловленного движением приемников, согласно изобретению;

фиг. 6 - блок-схему алгоритма предпочтительного способа определения поправок для учета искажения, обусловленного движением источника, согласно изобретению;

фиг. 7 - диаграмму изменения скорости сейсмической волны при распространении через землю, которая используется в способе, согласно изобретению;

фиг. 8 - диаграмму движения источника, с учетом искажений, прогнозируемых по модели, согласно изобретению;

фиг. 9 - диаграмму функции расширения, определенной из модели, согласно изобретению;

фиг. 10 - блок-схему алгоритма предпочтительного способа применения поправок к принятым сейсмическим данным для учета влияния движения источника, согласно изобретению;

фиг. 11 - диаграмму сейсмических данных в области F-K, согласно изобретению;

фиг. 12 - примерные данные выстрела сейсмоисточника, выполненные множеством приемников, в которые включены данные только при постоянном угле падения, согласно изобретению;

фиг. 13 - соотношение между кажущейся скоростью волны и истинной скоростью волны, согласно изобретению;

фиг. 14А-Е - компьютерную программу для определения времени распространения сейсмических волн, отражающихся от совокупности дифракторов, согласно изобретению;

фиг. 15А-Е - компьютерную программу для определения и рационализации функции

расширения для различных секторов по углам падения, согласно изобретению.

Подробное описание предпочтительных вариантов выполнения изобретения

Земля может рассматриваться как фильтр для сейсмической энергии. То есть, если энергия сейсмического сигнала поступает в землю, то приемник, расположенный на поверхности земли, будет принимать энергию сейсмического сигнала, характеристика которого изменена из-за взаимодействия с землей. Цель сейсмической разведки заключается в идентификации первичных отражений от дифракторов, которые обычно представляют собой подповерхностные горизонты. На практике приемники записывают не только первичные сейсмические отражения, но также множество других волн, дифракции, рассеянных волн, отраженных отражений, поверхностных волн и др., и все они перекрываются во времени.

Фильтр - это линейная система, которая формирует выходной сигнал для заданного входного сигнала. Когда имеется заданный любой входной сигнал, то соответствующий выходной сигнал может быть вычислен, если известен импульсный отклик для этого фильтра. Импульсный отклик определяется как выходной сигнал, сформированный фильтром для импульсного входного сигнала. Выходной сигнал - это просто входной сигнал, свернутый с импульсным откликом фильтра.

Сейсмический сигнал, детектируемый приемниками, представляет входной опорный сигнал, на который повлияло множество линейных и нелинейных факторов. Сейсмические данные или "сейсмограммы" служат для определения места залегающих нефтяных или газовых резервуаров, когда эти данные представляют входной опорный сигнал, на который повлияли только дифракторы, представляющие собой подповерхностные горизонты, в отличие от опорного входного сигнала, на который также повлияли нелинейные факторы, видоизменяющие сигнал, такие как эффект Доплера, обусловленный движением источника и/или приемников.

Идеальный импульсный отклик от земли - это эффект, который дифракторы оказывают на сейсмические волны, распространяющиеся через землю. Из-за нелинейных факторов, видоизменяющих сигнал, сейсмический сигнал, принятый приемниками при МВС записи, часто имеет мало сходства с импульсным откликом земли. Цель сейсмической работы заключается в идентификации импульсного отклика земли путем устранения этих влияний на полученные данные, поскольку они не представляют интереса для сейсмологов.

Согласно изобретению корректируются сейсмические данные, собранные морской сейсмической системой, для учета нелинейных эффектов Доплера, обусловленных движением

буксируемых сейсмоприемников и сейсмоисточников. Для простоты этот метод будет описан с обращением к понятию "дифрактор" (также называемый "отражателем"), который представляет собой отражающую область на границе раздела между соприкасающимися подповерхностными образованиями. Поскольку подповерхностная граница раздела состоит из многих точечных дифракторов, то полная граница раздела может быть отображена с помощью простого наложения результатов, полученных от каждого точечного дифрактора.

Сейсмосистема 50 (фиг. 2), выполненная в соответствии с предпочтительным вариантом изобретения, содержит систему 51 сейсмических измерений и обработки данных, устройство 59 для ввода данных пользователем (предпочтительно клавиатура, кнопки, переключатели и ручки управления), дисплей 52, один или более сейсмоисточников 112, один или более кабелей (также называемых сейсмоприемными косами) сейсмоприемников 114. Совокупность всех приемников для регистрации "выстрела", производимого сейсмоисточником, также называется "комплексом для выстрела". Система 51 сейсмических измерений и обработки данных содержит блок 53 обработки данных, соединенный с блоком 54 хранения данных, и блок 56 сопряжения источника и приемников. Система 50 сейсмических измерений может включать и другие элементы (не показаны). Устройство 59 для ввода данных пользователем позволяет вводить в систему 50 команды и информацию о конфигурации. Дисплей 52 обеспечивает для пользователя визуальное представление данных, информацию о конфигурации и информацию о состоянии системы. Источник и приемники предпочтительно связаны с системой сейсмических измерений через волоконно-оптические кабели 57. Источник 112 включает любой подходящий сейсмоисточник, например, МВС источники или импульсные источники. Приемники 114 включают подходящие гидрофонные приемники, включая устройства на основе пьезоэлектриков или сейсмоприемники любого другого подходящего типа.

Блок обработки данных предпочтительно управляет работой системы 50 сейсмических измерений, запоминает данные в блоке 54 хранения данных (который предпочтительно представляет собой магнитную ленту, жесткий диск или накопитель на магнитных дисках КД ПЗУ) и управляет работой источника 112 и приемников 114. Сейсмические сигналы, детектируемые приемниками, передаются в систему сейсмических измерений, обрабатываются блоком 53 обработки данных и запоминаются в блоке 54 хранения данных.

Система 51 (фиг. 2 и 3) сейсмических измерений и обработки данных предпочтительно корректирует записанные сейсмические данные для учета движения приемников 114 и источни-

ка 112 в соответствии с методологией, проиллюстрированной на схеме 150 последовательности операций. В альтернативном варианте сейсмические данные могут запоминаться на магнитной ленте или диске и передаваться в другую компьютерную систему, находящуюся в удаленном месте от сейсмозазведочного корабля, для выполнения анализа в соответствии со сведениями, изложенными при описании предпочтительного варианта. В предпочтительном способе корректировки данных на шаге 152 вводятся поправки для учета эффекта, связанного с движением приемников, а затем на шаге 154 вычисляются поправки для учета влияния движения источника, применяя эти поправки на шаге 156. Скорректированные данные от множества приемников и, возможно, многих выстрелов, объединяются на шаге 158 для получения сигнала с пониженным уровнем шума, который может впоследствии анализироваться для определения геологических структур.

Поправка на движение приемника (шаг 152) осуществляется следующим образом.

Комплект 114 (фиг. 4) для выстрела содержит приемники 125, 126, 127, 128 и сигнал 120 давления, записанный каждым приемником. Сигналы 120 давления, собранные вместе, называются "записью выстрела". Время представлено по вертикальной оси, а расстояние представлено по горизонтальной оси. Примерная диаграмма показана для одного приемника 125, для упрощения для представления записей остальных трасс используется прямая линия.

Если бы приемники не двигались во время записи выстрела, тогда трассы 120 записывались бы в фиксированных местах и, поэтому они были бы только функцией времени, но не расстояния. Поскольку приемники буксируются позади движущегося корабля (предполагается, что движение происходит направо на фиг. 4), каждая запись выстрела записывается в виде функции не только от времени, но также и расстояния, как указано с помощью трасс 122 для каждого приемника. Трассы 122 представляют трассы 120, когда приемник тянется позади корабля. Следовательно, каждая точка, представляющая данные, на записях 122 выстрела представляет сигналы сейсмического давления, воспринимаемые приемником в конкретной точке по времени и пространству.

Предполагается, что каждый приемник находится в положении r_0 , когда начинается запись выстрела. Приемник 125 начинает принимать сигнал в месте r_{125_0} . Приемник 126 начинает принимать сигнал в месте r_{126_0} , приемник 127 - в месте r_{127_0} и приемник 128 - в месте r_{128_0} . Расстояние между начальным местом r_0 и конечным положением представляет собой функцию от скорости приемников. Предполагается, что скорость приемников, также как и скорость источников, такая же, как и скорость корабля, хотя теоретически небольшое различие в

скоростях может существовать вследствие таких факторов, как гибкость сейсмоприемной косы 110.

Записи 122 выстрела представлены на фиг. 4 в виде прямых диагональных линий. Диаграммы, представляющие сигналы давления, прямые, потому что скорость приемников предполагается постоянной. Если скорость приемника равна u_r , тогда положение каждого приемника в любой момент времени t в течение записи выстрела ($r_0 + u_r t$). Линейный наклон записей 122 выстрела эквивалентен пространственному смещению, изменяющемуся со временем. Если $p(s, u_s, S(t), r, u_r, t)$ представляют величину давления p записи выстрела в виде функции от места s источника, скорости u_s источника, сейсмического сигнала $S(t)$, производимого источником, места r приемника, скорости u_r приемника и времени t , тогда пространственное смещение, изменяемое со временем, может быть математически смоделировано как свертка $p(s, u_s, S(t), r, u_r, t)$ с дельта-функцией "Дирака", также называемой "единичным импульсом":

$$p(s, u_s, S(t), r=r_0+u_r t, u_r, t)=p(s, u_s, S(t), r_0, u_r, t)*\delta(r_0+u_r t) \quad (2)$$

где оператор $*$ обозначает свертку, δ обозначает дельта-функцию (подробное объяснение свертки дано к книге "Сейсмозазведка" Шеррифа и Гелдарта (Sheriff, Geldart), "Press Syndicate" Кембриджского университета, 1995, стр. 279-81).

Пространственное смещение, представляемое $\delta(r_0 + u_r t)$ в уравнении (2), может быть исключено путем выполнения свертки результата уравнения (2) с пространственным смещением в противоположном направлении. Таким образом, поправка на движение приемника:

$$p(s, u_s, S(t), r_0, 0, t)=p(s, u_s, S(t), r=r_0+u_r t, u_r, t)*\delta(r_0-u_r t) \quad (3)$$

В уравнении (3) свертка пространственно смещенной записи выстрела с дельта-функцией $\delta(r_0 - u_r t)$ приводит к записи выстрела, выполненной стационарным ($u_r=0$) приемником в положении r_0 . Таким образом, влияние движения приемника на запись выстрела нейтрализуется путем выполнения свертки записи выстрела с дельта-функцией, представляющей пространственное смещение. Следует признать, что вышеизложенный анализ включает функции и математические операции, которые оказываются функциями времени и пространства (так называемыми временными и пространственными областями определения).

Имеются и другие способы введения в запись выстрела поправки на движение приемника. Например, поправка, предусмотренная в уравнении (3), также может быть представлена в частотной области определения (функции), в которой все функции изменяются не по времени, а по частоте. Функции могут быть преобразованы из представлений с временной и пространственной областью определения в представление с частотной областью определения, используя математическую операцию, называемую

мую преобразованием Фурье. Частоты, входящие в такие преобразования Фурье, включают временные и пространственные частоты. Преобразования Фурье от дельта-функции, $\delta(r_0 - u, t)$, - это $e^{-i2\pi k u t}$, где i представляет корень квадратный из -1 (мнимое число), k представляет пространственную частоту (также называемую волновым числом) и π - известная константа. Хорошо известно, что свертка во временной и пространственной областях определения эквивалентна перемножению в частотной области. Следовательно, пространственное смещение, введенное в уравнении (3) для уравнивания пространственного смещения, вызванного движением приемника, может быть представлено в частотной области определения в виде произведения преобразования Фурье для записи выстрела и $e^{-i2\pi k u t}$

$$P(f, k) \cdot e^{-i2\pi k u t} \quad (4)$$

где $P(f, k)$ - двумерное преобразование Фурье записи выстрела и является функцией временной частоты f и пространственной частоты k . Символ "*" обозначает перемножение.

Система 50 сейсмических измерений (фиг. 2, 3 и 5) может устранить влияние движения приемников, используя уравнение (4), путем вычисления сначала преобразования Фурье записей выстрела на шаге 162. Система 51 сейсмических измерений и обработки данных вычисляет преобразование Фурье, используя любой из множества известных методов, например, быстрое преобразование Фурье. Следует признать, что также может быть использовано любое подходящее преобразование, например, преобразования Лапласа, Радона, t - r -преобразование. На шаге 164 система 51 сейсмических измерений и обработки данных перемножает преобразование Фурье записей выстрела с помощью преобразования Фурье дельта-функции уравнения (3), представленной в виде $e^{-i2\pi k u t}$. В заключение на шаге 166 результат, полученный на шаге 164, может быть преобразован обратно в пространственно-временную область определения с помощью операции, называемой обратным преобразованием Фурье, которая также хорошо известна. Если последующие шаги обработки данных должны вычисляться в преобразованной области определения, то шаг 166 обратного преобразования может быть отложен или опущен, чтобы избежать вычислений, не являющихся необходимыми.

Другой способ введения поправки на движение приемника описан со ссылкой на фиг. 4, чтобы скорректировать запись выстрела поправкой на движение приемников. Этот способ описан в отношении одного приемника, например, приемника 127. В этом способе система 51 сейсмических измерений и обработки данных выбирает данные из приемника, когда приемник находится вблизи места, в котором должна быть зафиксирована запись выстрела. Чтобы зафиксировать запись выстрела, например, для места

г127₀, система сейсмических измерений выбирает часть записей выстрела из приемников 127, 126 и 125, когда каждый приемник находится вблизи места г127₀. Часть записей выстрела, которая выбирается системой 51 сейсмических измерений и обработки данных, обозначается с помощью цифровых позиций 127а, 127б и 127с. Таким образом, система сейсмических измерений выбирает начальную часть 127а записи выстрела от приемника 127 до тех пор, пока приемник проходит от места г127₀ расстояние, приблизительно равное половине интервала между приемниками в группе. С этого места система 51 сейсмических измерений и обработки данных выбирает среднюю часть 127б записи выстрела от приемника 126 до тех пор, пока приемник также не пройдет от места г127₀ половину интервала между приемниками в группе. И наконец, последняя часть 127с записи выстрела выбирается системой 51 от приемника 125.

Таким образом, любой из нескольких способов может быть использован для введения поправки на движения приемника на шаге 152 (фиг. 3). Заметим, что при использовании сейсморазведки с кабелем на дне (КНД), нет необходимости вводить какие-либо поправки на движение приемников. Способы, описанные выше, являются только примерными способами для введения поправки на движение приемников.

Данные, скорректированные с учетом движения приемника, иногда называются "данными неподвижного приемника". Предпочтительно после введения поправки на движение приемников система 51 сейсмических измерений и обработки данных определяет для данных неподвижного приемника поправку на движение источника.

Определение поправок на движение источника (шаг 154) осуществляется следующим образом.

Движение источника создает кажущееся смещение частоты, которое является функцией времени и направления движения. Скорость сейсмических волн, проходящих через землю, предполагается постоянной, тогда поправка на движение источника может быть сделана путем применения к данным неподвижного приемника аналитически определенного фазового смещения, зависящего от времени и направления. Однако это предположение часто оказывается нереалистичным и во многих случаях полученные поправки могут быть неточными. На шаге 154 это предположение устраняется с помощью построения модели непостоянной скорости распространения сейсмических волн для определения фазовых поправок, которые имеют более высокую точность.

В предпочтительном способе 154 (фиг. 6) для определения поправок на движение источника для полученных данных система 51 сейсмических измерений и обработки данных кор-

релирует данные неподвижного приемника с сигналом, испускаемым сейсмоисточником 112, например МВС развернутым сигналом. На шаге 168 корреляция производится фильтрация шума вне частотной полосы сигнала и "концентрация" энергии сигнала из отраженных волн с длинной разверткой в волны короткой длительности. Корреляция двух последовательностей данных - это известная математическая операция, в которой одна последовательность данных заменяется варьирующимися величинами, относящимися к другой последовательности данных, соответствующие значения двух последовательностей перемножаются, и результаты суммируются для получения величины корреляции.

На шаге 170 скоррелированные данные используются для вычисления интервальных скоростей. Существует много способов для определения скорости сейсмических волн в виде функции глубины. В одном примерном способе (известном как x^2-t^2 -способ) график, представляющий квадрат времени прихода отраженной энергии в виде функции от квадрата горизонтального расстояния (x^2) между источником и приемниками, дает серию кривых. Наклоны этих кривых вблизи положения источника ($x=0$) приблизительно равны обратной величине квадрата средней скорости ($1/V^2$) сейсмических волн во время их распространения к и от источника отражения. Из этих наклонов могут быть вычислены серии среднеквадратических скоростей (V_{rms}). Из серий среднеквадратических скоростей можно получить интервальные скорости, используя "формулу Дикса":

$$V_{int,n}^2 = (V_{rms,n}^2 t_n - V_{rms,n-1}^2 t_{n-1}) / (t_n - t_{n-1}) \quad (5)$$

где t_n - время прихода n -ой кривой сейсмической энергии к источнику (при $x=0$), $V_{rms,n}^2$ - обратная величина наклона кривой в положении источника, интервальные скорости $V_{int,n}$ - это оценочные скорости сейсмических волн при распространении их через увеличивающиеся по глубине залегания слои земли (слои между отражателями). Толщина каждого из слоев может быть оценена:

$$Z_n = V_{int,n} (t_n - t_{n-1}) / 2 \quad (6)$$

где Z_n - толщина n -го слоя.

На шаге 172 конструируется модель из вычисленных значений, которые точно определяют скорость сейсмической волны как функцию глубины (фиг. 7). Предполагается, что земля состоит из горизонтальных слоев (или, необязательно, из сферических слоев вокруг центра земли), имеющих постоянную толщину и скорость распространения сейсмических волн, которая вычислена из коррелированных данных. Размеры модели по горизонтальной и вертикальной протяженности предпочтительно достаточны для определения поправок для всего времени записи.

Предполагается, что в пределах размеров модели имеется совокупность дифракторов 302, упорядочено пространственно разнесенных по

различным местоположениям и глубинам. Расстояние между дифракторами 302 по глубине предпочтительно около 200 м, а расстояние между дифракторами по горизонтали приблизительно такое же, как расстояние между приемниками. Для каждого приемника R_i предполагается, что дифрактор $D_i(x,z)$ относится к дифрактору, находящемуся от приемника R_i на расстоянии x по горизонтали и глубине z . Для каждого дифрактора $D_i(x,z)$ путь $P(D_i(x,z))$ отражения может быть прослежен от источника S , вне дифрактора $D_i(x,z)$ и к приемнику R_i . Каждый путь имеет время $t(D_i(x,z))$ прохождения и связанный с ним угол ($D_i(x,z)$) падения от источника. Угол падения от источника - это угол отклонения вниз начального участка пути от направления движения источника.

В одном из вариантов шага 172 система 51 обработки данных определяет время прохождения и углы падения от источника для каждого дифрактора $D_i(x,z)$. На фиг. 14А-Е показана компьютерная программа в BASIC для вычисления этих значений для одного столбца отражателей. Выполнение этой компьютерной программы может быть повторено для каждого столбца отражателей в модели скоростей. Затем система 51 обработки данных распределяет дифракторы по группам, каждая из которых "высвечивается" с помощью выбранной области углов падения от приемника R_i . На фиг. 7 показана примерная область углов падения от приемника R_i , "высвечивающая" группу дифракторов (показаны в контуре, ограниченном более темными линиями). Показано также несколько примерных путей для дифракторов из этой группы.

Как только идентифицирована группа дифракторов, обнаруженных с помощью выбранного угла падения, то может быть определена поправка для данных, касающихся прихода сигнала на приемник с этого направления, следующим образом. Частичное расширение для сейсмического сигнала, принятого приемником:

$$d = (\cos \alpha) V_s / V_1 \quad (7)$$

где α - угол падения от источника, V_s - скорость источника и V_1 - интервальная скорость первого слоя. Когда известна величина расширения, то для принятых данных может быть сделана поправка на движение источника.

На фиг. 8 показаны диаграммы сигналов, принятых от дифракторов при различных углах падения на приемник. Для пути каждого принятого сигнала вычисленный выше показатель расширения, перемноженный на длину развертки, нанесен на график в виде функции от времени прохождения сигнала. Положительные значения расширения нанесены на график справа от каждой оси, а отрицательные значения расширения слева от осей. На шаге 174 (фиг. 6) для каждого угла падения на приемник из этих точек на графике формируется гладкая функция

расширения. Один из способов - это выполнение линейной интерполяции для получения совокупности точек с одинаковым интервалом между ними, а затем - усреднения движения для "сглаживания" функции расширения. Предпочтительный способ заключается в исключении точек с наибольшим расширением, если это требуется для получения монотонной функции расширения, а затем выполняется линейная интерполяция. На фиг. 9 показан пример применения способа. На фиг. 15А-Е показана компьютерная программа в BASIC для одного из способов вычисления функции расширения, исходя из выходных данных программы, показанной на фиг. 14А-Е. Корректирующие функции для каждого приемника затем могут быть объединены с функциями для других приемников, чтобы сформировать совокупность корректирующих функций для массива приемников в целом.

Корректировка данных для учета движения источника (шаг 156) осуществляется следующим образом.

На фиг. 10 показана схема последовательности операции способа, который может быть использован для выполнения шага 156 (фиг. 3). На шаге 176 выполняется преобразование F-K (где F - временная частота, K - пространственная частота или волновое число) на данных неподвижного приемника, полученных на шаге 152, или в альтернативном варианте, для скоррелированных данных, полученных на шаге 168. Также могут быть использованы и другие подходящие преобразования, например, преобразование Лапласа, преобразование Радона, τ -р-преобразование. F-K-преобразование - это двухмерное преобразование Фурье, в котором сигнал, являющийся функцией времени t и расстояния x , преобразуется в сигнал, являющийся функцией частоты f и волнового числа k . Преобразованный сигнал может быть изображен в преобразованной области определения (фиг. 11). Преобразование функции из функции с пространственно-временной областью определения в функцию, которая определяется в области частот и волновых чисел, называется прямым F-K преобразованием. По аналогии, преобразование функции из функции, которая определена в области частот и волновых чисел, обратно в функцию с пространственно-временной областью определения, называется обратным F-K преобразованием. Прямое F-K преобразование представляется математически с помощью двойного интеграла:

$$P(k,f) = \iint p(x,t) e^{-i2\pi(kx+ft)} dx dt \quad (8)$$

где $P(k,f)$ - F-K преобразование функции $p(x,t)$. Обратное F-K преобразование (выполненное на шагах 180 и 186) представляется следующим образом:

$$p(x,t) = \iint P(k,f) e^{+i2\pi(kx+ft)} dk df \quad (9)$$

На шаге 178 (фиг. 10) система сейсмических измерений выбирает из F-K диаграммы

сектор данных с постоянными по времени углами падения (описано ниже). Этот шаг становится наиболее понятным при обращении к фиг. 11 и 12. На фиг. 11 показана F-K диаграмма преобразованной записи выстрела с фиг. 12. Частота, измеряемая в циклах в секунду или "Герцах" (Гц), представлена по вертикальной оси, а волновое число, измеряемое в циклах на метр, представлено по горизонтальной оси. Отражения сейсмических волн в виде F-K преобразованных данных представлены участками 191 на F-K диаграмме.

Каждая прямая линия 194, 195, 196, начинаясь из нулевой точки F-K осей и распространяясь далее, представляет сейсмические данные с конкретной кажущейся скоростью. Наклон каждой прямой линии равен кажущейся скорости. Приемники 125, 126, 127, 128 (фиг. 12) показаны вместе с сейсмической волной 132, распространяющейся через землю (включая воду) в направлении стрелки 129. Линия 130 представляет направление распространения сейсмической волны 132 и образует угол θ с направлением движения 134 источника. Этот угол называется углом подхода, кажущимся углом падения или просто углом падения и обозначается на фиг. 12 и 13 как Θ_{DIP} . Линия 130 называется линией падения или линией подхода.

Прямая линия 133 (фиг. 13) перпендикулярна линии 130 падения и представляет схематически волновой фронт волн 132, когда они распространяются вверх под углом Θ_{DIP} падения. Волновой фронт 133 распространяется вверх через землю с определенной скоростью, называемой истинной скоростью, V_{true} . Истинная скорость сейсмических волн, распространяющихся через воду, приблизительно 1500 м в секунду (3325 миль в час) и считается, что она постоянная. Истинные скорости могут быть легко определены с помощью одного из многочисленных известных методов.

Горизонтальная составляющая вектора истинной скорости называется кажущейся скоростью, V_{app} (фиг. 13). Кажущаяся скорость V_{app} :

$$V_{app} = V_{true} / \cos(\Theta_{DIP}) \quad (10)$$

где "cos" - тригонометрическая функция косинуса. Кажущаяся скорость имеет физический смысл, заключающийся в том, что это горизонтальная скорость сейсмической волны 132, которая детектируется приемниками. Когда волновой фронт 133 движется вверх, то приемник 128 будет детектировать этот волновой фронт раньше, чем его зарегистрирует приемник 127. Из-за расстояния между приемниками 127 и 128 и временного интервала между моментами, когда волновой фронт детектируется приемником 128, а затем приемником 127, будет казаться, что волновой фронт распространяется в горизонтальном направлении со скоростью V_{app} .

Как можно заметить из уравнения (10), V_{app} обратно пропорциональна косинусу угла

Θ_{DIP} падения при условии, что V_{true} - постоянная величина. Следовательно, каждая прямая линия на графике F-K (фиг. 11), наклон которой представляет собой V_{app} , определяет угол падения Θ_{DIP} (фиг. 12 и 13). Более того, данные на графике F-K (фиг. 11) вдоль прямой линии, такой как линия 195, представляют только сейсмическую энергию, которая распространяется вверх через землю под конкретным углом падения, и не включают сейсмическую энергию, распространяющуюся вверх под всеми другими углами падения.

Система 51 (фиг. 10, 11 и 12) сейсмических измерений и обработки данных предпочтительно корректирует данные для учета движения источника путем выбора из F-K области определения на шаге 178 сектора данных с постоянными по времени углами падения (фиг. 10). Пример с постоянными по времени углами падения показан на фиг. 11 в виде участка 191, ограниченного прямыми линиями 194 и 196. Поскольку линии 194 и 196 определяют на F-K графике клин, то данные между линиями 194 и 196 называются сектором с постоянными по времени углами падения или пирожковым сектором. Выбирая пирожковый сектор из F-K данных и выполняя обратное F-K преобразование данных выбранного пирожкового сектора на шаге 180, система 51 сейсмических измерений и обработки данных выбирает только сейсмическую энергию, которая распространяется вверх через землю в диапазоне углов падения, определяемом наклонами линий 194 и 196. Таким образом, согласно предпочтительному варианту на шаге 178 из F-K данных выбирается сектор с постоянными по времени углами падения, а на шаге 180 выполняется обратное F-K преобразование. Размер пирожкового сектора может быть установлен любым, какой требуется, и обычно он представляет собой функцию от требуемой точности. Следовательно, размер пирожкового сектора касается диапазона углов падения, $\Theta_{DIP} \pm \Delta\Theta_{DIP}$.

Результат шага 180 представляет собой запись выстрела, которая скорректирована с учетом движения приемников и которая представляет сейсмическую энергию, соответствующую диапазону углов падения $\Theta_{DIP} \pm \Delta\Theta_{DIP}$, которые касаются кажущейся скорости, определяемой по пирожковому сектору. Следует признать, что сейсмическая энергия при угле Θ_{DIP} падения включает суперпозицию сейсмических волн, которые отразились от дифракторов, выявленных путем выбора диапазона углов падения. Используя положения, лежащие в основе классической теории Доплера, данные могут быть скорректированы с помощью введения поправки на движение источника.

Чтобы понять применение теории Доплера, обратимся к фиг. 12, на которой источник 112 движется из места s_0 в начале МВС сигнала

с качающейся частотой в место S_{end} в конце сигнала с качающейся частотой. Точечные дифракторы 140, 142, 144 представляют примерные местоположения дифракторов вдоль линии 130. Линии 145 и 146 представляют направление прохождения сейсмических волн от начального места s_0 источника и от конечного места S_{end} источника к точечному дифрактору 140. Подобные линии могут быть прочерчены для сейсмических волн, распространяющихся к дифракторам 142, 144. Сейсмические волны, отраженные дифракторами 140, 142, 144, распространяются вверх вдоль линии 130 с углом Θ_{DIP} падения.

Источник 112 движется слева направо и, следовательно, движется от дифрактора 140. Поскольку источник движется от дифрактора, то длительность испускаемого источником сигнала с качающейся частотой будет казаться большей. Другими словами, длина сигнала с качающейся частотой будет казаться больше с точки зрения дифрактора 140. Изменение частоты и длины сигнала с качающейся частотой называется смещением частоты по теории Доплера. Однако в этом примере источник достигает дифрактора 144 в течение длительности сигнала с качающейся частотой и, следовательно, сигнал с качающейся частотой становится короче с точки зрения дифрактора 144. Дифрактор 142 находится под средней точкой траектории источника, когда он перемещается в течение сигнала с качающейся частотой. Следовательно суммарное смещение частоты, связанное с дифрактором 142, равно нулю. Более того, искажение, обусловленное движением источника, может быть представлено через величину смещения частоты с использованием теории Доплера. Величина Доплеровского смещения может быть вычислена для каждого местоположения дифрактора или диапазона местоположений дифракторов, и соответствующие фильтры могут быть выполнены для корректировки данных для учета этого искажения. Изменение длины сигнала с качающейся частотой, измеряемое в единицах миллисекунд, называется расширением (или сжатием).

Ранее вычисленная функция расширения (фиг. 9) для выбранного угла падения изменяется со временем и, следовательно, на шаге 181 она может быть разделена по временным элементам, чтобы система 51 сейсмических измерений и обработки данных могла бы для каждого временного элемента обеспечить корректирующий фильтр. На шаге 182 система 51 сейсмических измерений и обработки данных применяет корректирующие фильтры к записи выстрела для введения поправки на расширение.

Несмотря на то, что корректирующие фильтры могут быть вычислены на основе "выборка за выборкой" (что может быть предпочтительным), удовлетворительные результаты могут быть достигнуты за меньшее время, если на

шаге 181 кривая расширения разделяется на сегменты и корректирующие фильтры определяются для каждого сегмента в целом, а не для каждой индивидуальной выборки. Таким образом, согласно предпочтительному варианту, величины расширения фиксируются для каждого сегмента (называемого здесь временным элементом), а сегменты выбираются так, чтобы смоделированная величина расширения расходилась с фиксированным значением не более, чем на 5%. Предполагаются также и другие критерии для дискретизации значений расширения и выбора временных элементов. Разрешение дискретизации и временные элементы могут быть установлены любого размера.

Имеются многочисленные способы для выполнения подходящих фильтров, чтобы для записей выстрела осуществлять компенсацию величины расширения в каждом временном элементе. Например, фильтр может быть выполнен следующим образом: берется развернутый (с качающейся частотой) сигнал источника и выполняется на нем повторная выборка с периодом выборки $\Delta t'$, где

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{T_{SL} + DIL} \quad (11)$$

где T_{SL} - длительность развернутого сигнала, DIL - дискретизированное расширение, а Δt - период дискретизации для записи выстрела. После повторной дискретизации новая частота дискретизации берет верх над старой и получает обозначение Δt , тем самым формируется развернутый сигнал с новой дискретизацией и с требуемым расширением. Например, для развертки в 1 с, расширенной на 1 с и дискретизированной с периодом дискретизации 2 мс (одна выборка берется за каждые 2 мс), развертка повторно дискретизируется с периодом 1 мс, обеспечивая в два раза больше выборок. Затем период дискретизации повторно дискретизированных данных получает обозначение как у двухмиллисекундного периода дискретизации, создавая запись в два раза длиннее. Затем расширенная развертка может применяться в качестве фильтра для записи выстрела с постоянными углами падения (для ранее не скоррелированных сейсмических данных).

В другом случае расширенная развертка может быть скоррелирована с нерасширенной разверткой, а фаза полученного результата используется в качестве требующейся фазовой коррекции для ранее скоррелированных сейсмических данных. Этот способ был бы подходящим, если скоррелированные данные, полученные на шаге 168, использовались бы как входные данные для прямого F-K преобразования на шаге 176. Фазовая коррекция может быть применена путем использования стандартного всечастотного (фазового) обратного фильтра, такого, как может быть получен с использованием метода Винера-Левинсона. Всечастотный

обратный фильтр изменяет не амплитудное содержание данных, а только фазовое содержание. Фильтр предпочтительно выполняется так, чтобы он вносил требующуюся фазовую коррекцию, тем самым устраняя фазовое искажение, вызванное эффектом Доплера.

Корректирующие фильтры предпочтительно применяются ко всей трассе данных, а затем подходящие сегменты временных элементов из каждой скорректированной трассы выбираются и объединяются для формирования полностью скорректированной совокупности данных. Таким образом, к данным применяется коррекция, например, на временном элементе от 0 до 1 с. Аналогичным образом в совокупности данных также вносятся поправки для временных элементов от 1 до 2 с, от 2 до 3 с и от 3 до 4 с, таким образом генерируя четыре совокупности данных, каждая из которых скорректирована с помощью конкретного корректирующего фильтра. Затем из первой совокупности данных выбираются скорректированные данные только от 0 до 1 с, из второй совокупности данных выбираются скорректированные данные от 1 до 2 с, из третьей совокупности данных выбираются скорректированные данные от 2 до 3 с, из четвертой совокупности данных выбираются скорректированные данные от 3 до 4 с, и так далее.

После корректировки сейсмических данных для учета движения приемников и источника для сектора с постоянными углами падения на шаге 182, на шаге 186 выбирается из F-K данных сектор со следующими углами падения, а на шагах 181-186 это повторяется до тех пор, пока не будут выбраны из F-K данных, обратно преобразованы и скорректированы секторы со всеми углами падения. Когда все данные скорректированы для каждого сектора данных с углами падения из F-K данных, на шаге 188 результаты суммируются для получения требующихся данных с введенными поправками на движение источника и приемников.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ корректировки сейсмических данных для учета искажений, обусловленных движением сейсмоисточника и движением сейсмоприемника, заключающийся в том, что вводят в сейсмические данные поправки на движение приемника для получения сейсмических данных неподвижного приемника,

осуществляют корреляцию сейсмических данных неподвижного приемника с сигналом с качающейся частотой для получения скоррелированных сейсмических данных,

формируют из скоррелированных сейсмических данных модель скорости сейсмических волн,

вычисляют по модели скорости сейсмических волн функцию расширения для сектора с выбранными углами падения.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что при определении модели скорости сейсмических волн

вычисляют среднеквадратичные скорости для отраженных сейсмических волн,

преобразуют среднеквадратичные скорости в интервальные скорости,

определяют интервальные глубины, через которые отраженные сейсмические волны распространяются с соответствующими интервальными скоростями.

3. Способ по п.2, отличающийся тем, что при вычислении функции расширения

определяют расширение и время распространения сейсмических волн, отраженных от сейсмоисточника в сеймоприемник, для каждого дифрактора из массива дифракторов, которые предполагаются присутствующими в модели скорости сейсмических волн,

разделяют дифракторы на группы, попадающие в общий сектор с углами падения на приемник, и

определяют расширение в зависимости от функции времени, исходя из расширения и времени распространения для дифракторов из выбранной группы.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно

вычисляют прямое F-K преобразование скоррелированных сейсмических данных для получения F-K преобразованных данных,

выбирают сектор с постоянными углами падения из F-K преобразованных данных,

вычисляют обратное F-K преобразование для выбранного из F-K преобразованных данных сектора с углами падения для получения скоррелированных сейсмических данных для выбранного сектора с углами падения,

корректируют скоррелированные сейсмические данные для выбранного сектора с углами падения, чтобы устранить расширение, которое указано, с помощью вычисленной функции расширения.

5. Способ по п.4, отличающийся тем, что при корректировании скоррелированных сейсмических данных

выполняют расширение сигнала с качающейся частотой на величину, указанную из функции расширения, для получения расширенного сигнала с качающейся частотой,

выполняют корреляцию сигнала с качающейся частотой с расширенным сигналом с качающейся частотой для определения фазовой ошибки,

применяют фазовый корректирующий фильтр к скоррелированным сейсмическим данным для устранения фазовой ошибки.

6. Способ по п.4, отличающийся тем, что дополнительно

повторяют выбор сектора с постоянными углами падения, вычисление обратного преобразования и корректирования скоррелирован-

ных сейсмических данных для получения сейсмических данных со скомпенсированным расширением для множества секторов с постоянными углами падения и

объединяют сейсмические данные со скомпенсированным расширением для секторов с углами падения для получения сейсмических данных, которые скорректированы с учетом движения источника и приемника.

7. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно

вычисляют прямое F-K преобразование сейсмических данных неподвижного приемника для получения F-K преобразованных данных,

выбирают сектор с постоянными углами падения из F-K преобразованных данных,

вычисляют обратное F-K преобразование для сектора с постоянными углами падения из F-K преобразованных данных для получения для сектора с выбранными углами падения сейсмических данных неподвижного приемника,

корректируют сейсмические данные неподвижного приемника для сектора с выбранными углами падения, чтобы устранить расширение, которое указано, с помощью вычисленной функции расширения.

8. Способ по п.7, отличающийся тем, что для корректировки сейсмических данных неподвижного приемника

выполняют расширение сигнала с качающейся частотой на величину, выявленную из функции расширения, для получения расширенного сигнала с качающейся частотой,

выполняют корреляцию сейсмических данных неподвижного приемника с расширенным сигналом с качающейся частотой для получения скоррелированных сейсмических данных со скомпенсированным расширением.

9. Способ по п.7, отличающийся тем, что дополнительно

повторяют шаги выбора сектора с постоянными углами падения, вычисление обратного преобразования и корректирования скоррелированных сейсмических данных для получения сейсмических данных со скомпенсированным расширением для множества секторов с постоянными углами падения,

объединяют сейсмические данные со скомпенсированным расширением для секторов с углами падения для получения сейсмических данных, которые скорректированы с учетом движения источника и приемника.

10. Способ по п.7, отличающийся тем, что выбор сектора с постоянными углами падения из F-K преобразованных данных включает выбор F-K преобразованных данных, соответствующих заданному диапазону углов падения.

11. Система сейсмических измерений, содержащая

устройство для ввода данных пользователем,

дисплей,
блок хранения данных,

блок обработки данных, связанный с устройством для ввода данных пользователем, дисплеем и блоком хранения данных, в котором блок обработки данных выполнен так, чтобы создавать из измеренных сейсмических данных модель скорости сейсмических волн и использовать модель скорости сейсмических волн для вычисления функции расширения, указывающей на искажение, обусловленное движением сейсмоисточника.

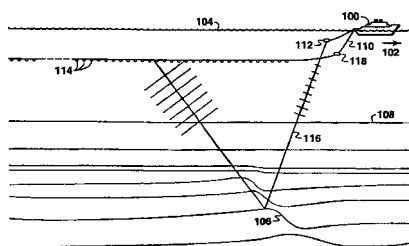
12. Система сейсмических измерений по п.11, отличающаяся тем, что блок обработки данных дополнительно выполнен так, чтобы вводить поправки в измеренные сейсмические данные на искажение, обусловленное движением сейсмоисточника, путем вычисления F-K преобразования измеренных сейсмических данных, разделения преобразованных сейсмических данных по секторам с углами падения, выполнения обратного преобразования для индивидуальных секторов с углами падения, корректировки обратно преобразованных данных секторов с углами падения и суммирования соответствующих по времени значений скорректированных данных секторов с углами падения.

13. Система сейсмических измерений по п.12, отличающаяся тем, что блок обработки данных корректирует обратно преобразованные данные секторов с углами падения путем применения совокупности фильтров, при этом фильтры определяются по расширению сигнала с качающейся частотой, а расширение указывается с помощью функции расширения.

14. Система сейсмических измерений по п.13, отличающаяся тем, что функция расширения разделяется на временные сегменты, а фильтр определяется для каждого временного сегмента и применяется к соответствующему временному сегменту обратно преобразованных данных сектора с углами падения.

15. Сейсмическая система, содержащая по меньшей мере, один сейсмоисточник, выполненный для передачи сигнала с качающейся частотой,

по меньшей мере, один сейсмоприемник, выполненный для получения измеренных сейсмических сигналов, и



Фиг. 1

систему сейсмических измерений и обработки данных, которая включает устройство для ввода данных пользователем,

дисплей,

блок хранения данных,

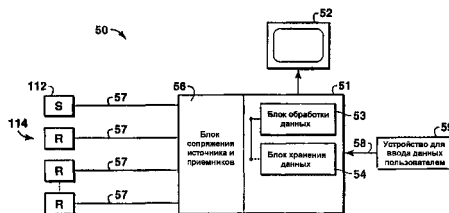
блок сопряжения источника и приемника, связанный с указанными сейсмоисточником и сейсмоприемником;

блок обработки данных, связанный с устройством для ввода данных пользователем, дисплеем и блоком хранения данных, в котором блок обработки данных выполнен так, чтобы создавать, исходя из измеренных сейсмических данных, модель скорости сейсмических волн и использовать модель скорости сейсмических волн для вычисления функции расширения, указывающей на искажение, обусловленное движением сейсмоисточника.

16. Система сейсмических измерений по п.15, отличающаяся тем, что блок обработки данных дополнительно выполнен так, чтобы вводить поправки в измеренные сейсмические данные на искажение, обусловленное движением сейсмоисточника, путем вычисления F-K преобразования измеренных сейсмических данных, разделения преобразованных сейсмических данных по секторам с углами падения, выполнения обратного преобразования для индивидуальных секторов с углами падения, корректировки обратно преобразованных данных секторов с углами падения и суммирования соответствующих по времени значений скорректированных данных секторов с углами падения.

17. Система сейсмических измерений по п.16, отличающаяся тем, что блок обработки данных корректирует обратно преобразованные данные секторов с углами падения путем применения совокупности фильтров, при этом фильтры определяются по расширению сигнала с качающейся частотой, а расширение указывается с помощью функции расширения.

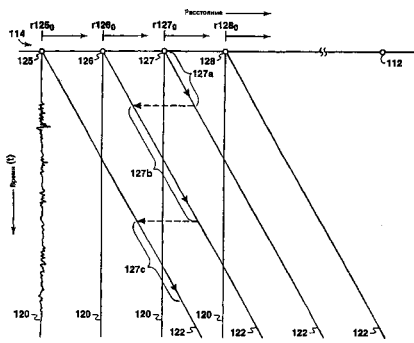
18. Система сейсмических измерений по п.17, отличающаяся тем, что функция расширения разделяется на временные сегменты, а фильтр определяется для каждого временного сегмента и применяется к соответствующему временному сегменту обратно преобразованных данных секторов.



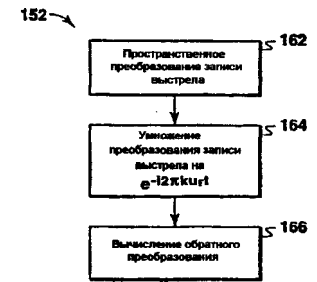
Фиг. 2



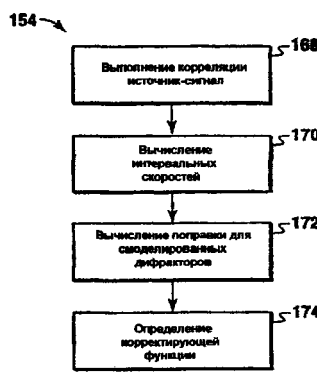
Фиг. 3



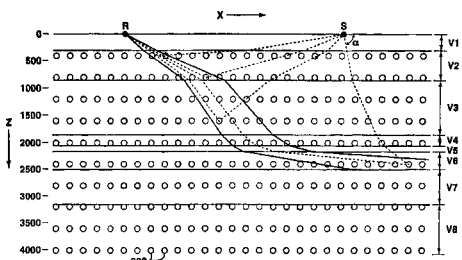
Фиг. 4



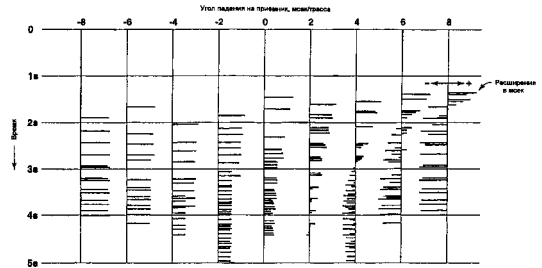
Фиг. 5



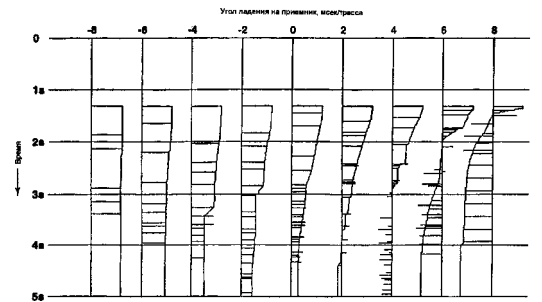
Фиг. 6



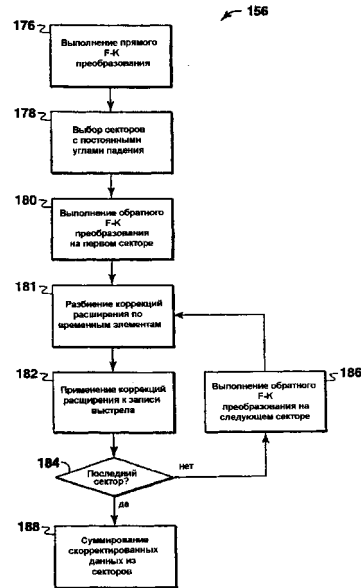
Фиг. 7



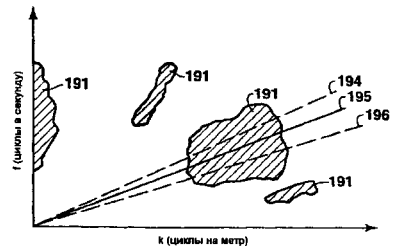
Фиг. 8



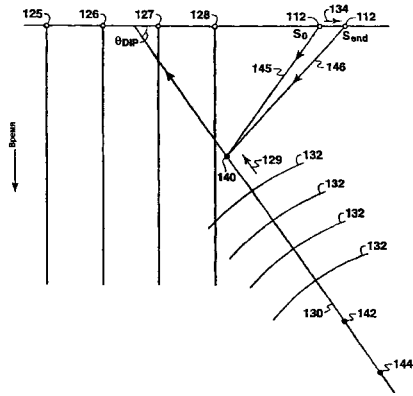
Фиг. 9



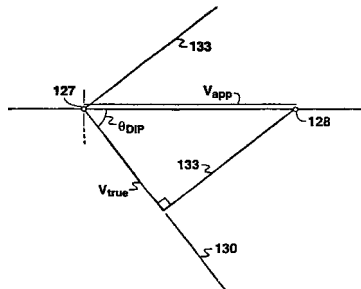
Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13

```

REM: DIFFRACTOR MODEL FOR DOPPLER IN V(z)
REM: CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY INFORMATION OF MOBIL OIL CORPORATION

DIM zi(100), vi(100), p(100), delay(100), dz(100), vz(100)
DIM keapp(100), keappz(100), keappd(100), rayend(100)
CLS

disk$ = "yes": REM: "yes" to output models to disk files (could be in memory)
pause$ = "yes": REM: "yes" to pause after each XD loop
dev$ = "b": REM: b for b drive, a for a drive etc.
nlayer = 8: REM: nlayer = number of velocity layers

REM: READ THE VELOCITY MODEL ( ASSUMED TO BE AVAILABLE )
FOR i = 1 TO nlayer
  READ zi(i), vi(i)
  PRINT zi(i), vi(i)
NEXT i

REM: WRITE THE VELOCITY FILE TO OUTPUT
IF disk$ = "yes" THEN
  ns = dev$ + ".vel.dat": REM: NAME OF VELOCITY MODEL
  OPEN ns FOR OUTPUT AS #1
  PRINT #1, nlayer
  FOR i = 1 TO nlayer
    PRINT #1, zi(i), vi(i)
  NEXT i
  CLOSE
END IF

CLS

REM: SET UP MODEL PARAMETERS
tolx = 5: REM: TOLERANCE FOR RAY TRACING ITERATION ERROR IN METERS
stepz = 20: REM: VELOCITY MODEL RESOLUTION (meters)
xstart = 2000: REM: STARTING XD (meters) NORMALLY 0
xtotalmax = 2001: REM: MAXIMUM WIDTH OF MODEL (meters) SUGGEST 2 x MAX OFFSET
stepdx = 2000: REM: SPATIAL SAMPLING OF MODEL (meters) NORMALLY RCVR SPACING

REM: START OF XD MODEL LOOP
REM: NOTE: xtotal= distance to diffractor (meters) = XD
FOR xtotal = xstart TO xtotalmax STEP stepdx
  kntp = 0: REM: counter for depth levels

REM: START OF DIFFRACTOR DEPTH LOOP
REM: NOTE: ztarget=diffractor depth (meters) = ED
REM: SET UP PARAMETERS
  z0 = 200: REM: starting depth for model (meters)
  zLAST = 4200: REM: ending depth for model (meters)
  ddepth = 400: REM: DEPTH STEP FOR DIFFRACTOR MODEL DEPTHS (meters)
  FOR ztarget = z0 TO zLAST STEP ddepth

```

Фиг. 14A

```

kntp = kntp + 1
REM: FIND OUT WHAT LAYER THE DIFFRACTOR IS IN
FOR z = 0 TO ztarget STEP stepz
  v = vi(1): layer = 1
  FOR j = 1 TO nlayer
    IF z > zi(j) THEN
      v = vi(j + 1): layer = j + 1
    END IF
  NEXT j
NEXT z
PRINT ztarget: layer
REM: INPUT "vel": q$

99 REM

REM: DEFINE MODEL GEOMETRY AND VELOCITY LAYERS & FIND V MAXIMUM IN THE PATH
FOR i = 1 TO layer - 1
  dz(i) = zi(i) - zi(i - 1): vz(i) = vi(i)
NEXT i
dz(layer) = ztarget - zi(layer - 1): vz(layer) = vi(layer)
vmax = vz(1)
FOR j = 1 TO layer
  IF vz(j) > vmax THEN vmax = vz(j)
  PRINT j, dz(j): vz(j)
NEXT j

REM: BEGIN ITERATION TO FIND THE RAY PATH
pmax = 1 / (vmax): REM horizontal in one of the beds
REM: FIRST GUESS FOR RAY PARAMETER
pguess = SIN(ATN(xtotal / ztarget)) / vz(1)
REM: CHECK FOR "ODD" CASES
IF pguess = 0 THEN pguess = .0001 / vz(1): REM: HANDLE 0 OFFSET CASE
IF pguess > pmax THEN pguess = .5 * pmax: REM: AVOID CRITICAL REFRACTION
PRINT pguess

88 REM : RETURN POINT IF ERROR TOO BIG
REM: PROPOGATE RAY FROM SURFACE TO TARGET DEPTH USING P GUESS
sumx = 0: sumxy = 0
FOR i = 1 TO layer
  REM: CALCULATE THE PATH
  f = pguess * vz(i)
  g = (1 - f * f) ^ .5
  sumx = sumx + dz(i) * f / g
  REM: CALCULATE THE P GRADIENT OF THE PATH
  f = .99999 * pguess * vz(i)
  g = (1 - f * f) ^ .5

```

Фиг. 14B

```

sumxy = sumxy + dz(i) * f / g
NEXT i
REM: CALCULATE THE ERROR IN XD
errorx = sumx - xtotal
gradient = (sumx - sumxy) / (.0001 * pguess)
PRINT "sumx": sumx: sumxy: errorx: gradient
IF gradient = 0 THEN GOTO 89: REM: WE HAVE THE ANSWER
pnew = pguess - errorx / gradient: REM: UPDATE THE GUESS
REM: GUARD AGAINST CRITICAL ANGLE BUT ALLOW TO CONVERGE
IF pnew > pmax THEN pnew = (pguess + pmax) / 2

PRINT pguess: pnew: pmax
REM: CHECK ERROR VERSUS TOLERANCE AND STORE THE END POINT OF THE ARRAY
IF ABS(errorx) <= tolx THEN rayend(kntp) = xtotal + errorx: GOTO 89
pguess = pnew: GOTO 88: REM: CONTINUE ITERATION IF ERROR TOO LARGE
89 REM: ITERATION IS DONE

REM: STORE THE ANSWERS
REM: keapp(kntp) = ray parameter keappz(kntp) = diffractor depth
keapp(kntp) = pguess: keappz(kntp) = ztarget
NEXT ztarget
REM: END OF DIFFRACTOR DEPTH LOOP

SCREEN 9, 0: CLS : REM: put the screen in display mode

GOSUB 2000: REM: draw the model grid and velocity layers
REM: plot rays and calculate the travel times NB: MUST GO TO SUB FOR TIMES
FOR i = 1 TO kntp: REM: LOOP ON DIFFRACTOR DEPTHS
  sumx = 0: sumz = 0: sumt = 0
  p = keapp(i)
  FOR j = 1 TO nlayer: REM: LOOP ON LAYERS (PROPOGATE DOWNWARDS)
    stheta = p * vi(j)
    vt = vi(j)
    IF ABS(stheta) > 1 THEN GOTO 33
    ttheta = stheta / ((1 - stheta * stheta) ^ .5)
  REM: STEP DOWN A LAYER
  dsumx = (zi(j) - zi(j - 1)) * ttheta: dsumz = (zi(j) - zi(j - 1))

```

Фиг. 14C

```

REM: CHECK TO SEE IF DIFFRACTOR IS IN THE LAYER
IF sumz + dumz >= keepz(i) THEN
  xone = sumz: yone = sumz
  xtwo = xttotal
  dumz = (rayand(i) - sumz) / ttheta
  ytwo = yone + dumz
  GOSUB 3000
GOTO 33: REM: FINISHED WITH RAY
ELSE : REM: PROPOGATE TO NEXT LAYER
  xone = sumz: xtwo = sumz + dumx
  yone = sumz: ytwo = sumz + dumz
  GOSUB 3000
  sumz = sumz + dumx: sumz = sumz + dumz
END IF
NEXT j
33 REM:
keepz(i) = sumz: REM: SAVE THE TRAVEL TIME TO THE i TH DIFFRACTOR
NEXT i
IF pause$ = "yes" THEN INPUT "next xd": q$: REM: VIEW THE MODEL
CLS
REM: OUTPUT THE DIFFRACTOR MODEL TO DISK IF DESIRED
IF disk$ = "yes" THEN
  n$ = dev$ + ".m" + STR$(xttotal) + ".dat": REM: HERE WE USE XD TO NAME FILE
  PRINT n$
  OPEN n$ FOR OUTPUT AS #1
  PRINT #1, xttotal, kntp
  FOR ii = 1 TO kntp
    PRINT #1, keepz(ii), keepz(ii), keepz(ii)
  NEXT ii
  CLOSE
END IF
NEXT xttotal
REM: END OF XD (xttotal) LOOP
END
REM: MODEL IS COMPLETEZ
3000 REM: plot routine :rem: DRAWS GRID
SCREEN 9, 0
sfx = .06: offx = 300: sfy = 1 / 15: offy = 20
COLOR 7
FOR isub = 0 TO nlayer
  x1 = 10: x2 = 600
  y1 = offy + xi(isub) * sfy
  LINE (x1, y1)-(x2, y1)
NEXT isub
COLOR 3
FOR st = 0 TO 5000 STEP 500
  x1 = 10: y1 = st * sfy + offy
  x2 = 40: y2 = st * sfy + offy
  LINE (x1, y1)-(x2, y2)
NEXT st
RETURN
3000 REM: plot routine :rem: DRAWS RAYS AND CALCULATES TIME
SCREEN 9, 0
sfx = .06: offx = 100: sfy = 1 / 15: offy = 20
COLOR 4
x1 = sfx + xttotal + offx: y1 = offy
x2 = x1: y2 = 5000 * sfy + offy
LINE (x1, y1)-(x2, y2)
x1 = sfx + xone + offx: y1 = sfy + yone + offy
x2 = sfx + xtwo + offx: y2 = sfy + ytwo + offy
cc = 15
COLOR cc: LINE (x1, y1)-(x2, y2)
REM: CALCULATE TRAVEL TIME
sumt = sumt + ((xone - xtwo) ^ 2 + (yone - ytwo) ^ 2) ^ .5 / vt
RETURN

```

Фиг. 14D

```

REM: THIS IS THE VELOCITY MODEL: DEPTH, INTERVAL VELOCITY (PAIRS)
REM: LAST DEPTH SHOULD BE VERY DEEP (eg. RECORD TIME(secs) x 1000 (meters) )
DATA 200,1500
DATA 800,1600
DATA 1800,1800
DATA 2000,1800
DATA 2140,2000
DATA 2400,2000
DATA 3000,2500
DATA 5000,2800
REM: PROGRAM TO CALCULATE & RATIONALIZE DILATION MODEL
REM: CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY INFORMATION OF MOBIL OIL CORPORATION
REM: PROGRAM READS DIFFRACTOR MODELS PREVIOUSLY CREATED
DIM zi(100), vi(100)
DIM keepz(100), keepz1(100), keepz2(100)
DIM tt(10, 100), sdip(10, 100), nbox(10)
DIM tto(10, 100), dilo(10, 100)
DIM order(100), control(10, 100)
CLS
REM: dilfact = sweep length (secs) x boat velocity (m/sec) x 1000
dilfact = 20000
REM: READ MODEL PARAMETERS
disk$ = "yes"
IF disk$ = "yes" THEN
  n$ = "b:vel.dat"
  OPEN n$ FOR INPUT AS #1
  INPUT #1, nlayer
  FOR i = 1 TO nlayer
    INPUT #1, zi(i), vi(i)
    PRINT #1, zi(i), vi(i)
  NEXT i
  CLOSE
END IF
xmax = 4000: REM: last diffractor offset in the model data
h = 2000: REM: current offset for this analysis ( NEED TO LOOP ON H )
stepdx = 200: REM: offset steps used for the diffractor model (SHOULD BE DRCVR)
REM: Define receiver spacing, V0 = velocity at surface, dt = sample interval
drcvr = 12.5: v0 = vi(1): dt = .002
REM: Find Maximum Delay per Receiver Spacing
dtmax = drcvr / v0
ndtmax = INT(dtmax / dt): REM: In Samples
REM: Find Number of Dip Gates from Receiver Gather FK Zones
ndips = 2 * ndtmax + 1
ndipid = ndtmax + 1
PRINT ndtmax
REM: SEARCH DIFFRACTOR MODEL FOR ALL DIFFRACTORS IN A RECEIVER DIP GATE THAT
REM: ARRIVE AT A SOURCE POINT h METERS AHEAD
REM: x1=Maximum -ve distance from receiver to diffractor location
REM: x2=maximum +ve distance from receiver to diffractor location
x1 = h - xmax: x2 = xmax
REM: LOOP ON ALL DIFFRACTOR DISTANCES FROM THE RECEIVER
FOR xd = x1 TO x2 STEP stepdx

```

Фиг. 15A

```

stp = 1
REM: stp is a sign control for the receiver - we only modeled the positive dista
REM: Symmetry says that Arrival times at - X = times at + X but
REM: Receiver Dip is reversed in sign
IF xd < 0 THEN stp = -1
REM: xm=diffractor distance from source given an offset of h
xs = h - xd
REM: Sign Convention for Source
ssp = -1
IF xd > h THEN ssp = 1
IF xd > h THEN xs = h - xd
REM: READ RECEIVER MODEL FILE
x1 = ABS(xd)
IF disk$ = "yes" THEN
  n$ = "b:a" + STR$(x1) + ".dat"
  PRINT n$
  OPEN n$ FOR INPUT AS #1
  INPUT #1, xttotal, kntp
  FOR ii = 1 TO kntp
    INPUT #1, keepz1(ii), keepz1(ii), keepz1(ii)
    PRINT #1, keepz1(ii); keepz1(ii); keepz1(ii)
  NEXT ii
  CLOSE
END IF
REM: READ COMPLEMENTARY SOURCE DISTANCE FILE
x1 = ABS(xs)
IF disk$ = "yes" THEN
  n$ = "b:s" + STR$(x1) + ".dat"
  PRINT n$
  OPEN n$ FOR INPUT AS #1
  INPUT #1, xttotal, kntp
  FOR ii = 1 TO kntp
    INPUT #1, keepz2(ii), keepz2(ii), keepz2(ii)
    PRINT #1, keepz2(ii); keepz2(ii); keepz2(ii)
  NEXT ii
  CLOSE
END IF
PRINT xd, xs: stp, ssp
REM: FOR A GIVEN RECEIVER DIP (BOX) STORE THE MODEL TIMES AND SOURCE DIPS
FOR i = 1 TO kntp
  sth1 = v0 * keepz1(ii): sth2 = v0 * keepz2(ii)
  tapp1 = drcvr * keepz1(ii): tapp2 = drcvr * keepz2(ii)
  lrdip = ssp * INT(tapp1 / dt + .5)
  boxdip = integer designation for the dip gate at the receiver
  boxdip = lrdip + ndipid
REM: keep count the number of events on each constant receiver dip trace
nbox(boxdip) = nbox(boxdip) + 1
REM: Arrival time for events
tt(boxdip, nbox(boxdip)) = keepz1(ii) + keepz2(ii)
REM: sdip = source dip (actually the ray parameter)
sdip(boxdip, nbox(boxdip)) = ssp * keepz1(ii)
NEXT i
NEXT xd
REM: MODELS ARE COMPLETED. FOR EACH RECEIVER DIP GATE WE HAVE A LIST
REM: OF EVENT TIMES AND SOURCE DIPS.
now list by box
FOR box = 1 TO ndips
  PRINT box
  FOR i = 1 TO nbox(box)
    PRINT tt(box, i); -dilfact * sdip(box, i)
  NEXT i
NEXT box
REM: now plot them
FOR box = 1 TO ndips
  FOR i = 1 TO nbox(box)
    REM: dil = sweep dilation (in msec) +ve = longer
    t = tt(box, i): dil = -dilfact * sdip(box, i)
    cc = 15
    GOSUB 1000
  NEXT i
NEXT box
INPUT "": q$
CLS
REM: rearrange in ascending time
FOR box = 1 TO ndips
  FOR ii = 1 TO nbox(box)
    control(box, ii) = 0: REM: control=0 means not ranked yet
  NEXT ii
  FOR i = 1 TO nbox(box)
    mint = 10000
    FOR j = 1 TO nbox(box)
      IF control(box, j) < 1 THEN IF tt(box, j) <= mint THEN mint = tt(box, j):
      NEXT j
    tto(box, i) = tt(box, holdj)
  REM: tto = times in ascending order, dilo = dilation at that time
  dilo(box, i) = -dilfact * sdip(box, holdj)
  control(box, holdj) = 1
  NEXT i
REM: DEFINE THE HORIZONTAL PATH AT T = h/v0
tmin = h / v0: dilmax = dilfact / v0
dilo(box, 0) = dilmax: tto(box, 0) = tmin: control(box, 0) = 1
REM: RATIONALIZE THE DILATION VS. TIME MODEL
REM: FIRST FIND THE "ZERO" CROSSING EVENT
REM: by: find last +ve dilation such that that there are no smaller positives

```

Фиг. 15B

Фиг. 15C

```

REM: at later times.
diloimin = 1000
FOR i = 0 TO nbox(box)
IF dilo(box, i) > 0 THEN
  test = 0
  FOR j = 0 TO i
  IF test < 1 THEN IF dilo(box, i) > ABS(dilo(box, j)) THEN test = 1
  NEXT j
IF test = 0 THEN IF dilo(box, i) < diloimin THEN diloimin = dilo(box, i): hold1 = i
NEXT i
REM: rationalize down to "zero" crossing - put them in monotonic descending
REM: order.
test = dilo(box, 0)
FOR i = 0 TO hold1
  control(box, i) = 0
  IF dilo(box, i) > 0 THEN
  IF dilo(box, i) <= test THEN
    control(box, i) = 1: REM: control=1 means it is a valid control point
    test = dilo(box, i)
  END IF
NEXT i
PRINT i, test(box, i); dilo(box, i); control(box, i)
NEXT i

REM: below the zero crossing Search for smallest absolute value negative
REM: dilation. This is a control point. Then start there and look below
REM: for the next smallest absolute value negative etc.
### diloimin = 1000
hold12 = 0
FOR i = hold1 + 1 TO nbox(box)
  control(box, i) = 0
  test = ABS(dilo(box, i))
  IF dilo(box, i) < 0 THEN IF test < diloimin THEN diloimin = test: hold12 = i
NEXT i
PRINT "###": diloimin, hold12; dilo(box, hold12)
IF diloimin < 1000 THEN control(box, hold12) = 1: PRINT "###"; hold12
REM: INPUT "yy": q5
IF diloimin = 1000 THEN GOTO ###
hold1 = hold12: GOTO ###
### REM:
NEXT box
REM: We now have a "rationalized" dilation function for the offset h trace
REM: for each receiver dip slice.
CLS
INPUT "final plot "; q5
FOR box = 1 TO ndips
  t1 = tto(box, 0): d11 = dilo(box, 0)
  FOR i = 0 TO nbox(box)
    t = tto(box, i): d11 = dilo(box, i)
    cc = 11: IF control(box, i) = 1 THEN cc = 15

```

Фиг. 15D

```

GOSUB 1000
IF control(box, i) = 1 THEN
  t2 = t: d12 = d11
  GOSUB 2000
  t1 = t2: d11 = d12
END IF
NEXT i
REM: Draw to 5 seconds (model should be big enough to go to last time)
IF t1 < 5 THEN
  t2 = 5: d12 = d11: GOSUB 2000
END IF
NEXT box
END
REM: PLOTTING SUBROUTINES
1000 : REM: sub to plot dilation at time t
SCREEN 9, 0
sfx = 2.8: offx = box * 60
sfy = 60: sfy = 10
COLOR 7
x1 = 10: x2 = 600
REM: plot scales
FOR ts = 0 TO 5
  y1 = offy + sfy * ts: y2 = y1
  LINE (x1, y1)-(x2, y2)
NEXT ts
x1 = offx: x2 = offx: y1 = offy: y2 = 300
COLOR 7: LINE (x1, y1)-(x2, y2)
COLOR cc
x1 = offx: x2 = x1 + d11 * sfx
y1 = offy + sfy * t: y2 = y1
LINE (x1, y1)-(x2, y2)
RETURN
2000 : REM: sub to plot
SCREEN 9, 0
sfx = 2.8: offx = box * 60
sfy = 60: offy = 10
COLOR 15
x1 = offx + d11 * sfx: x2 = offx + d12 * sfx
y1 = offy + sfy * t1: y2 = offy + sfy * t2
LINE (x1, y1)-(x2, y2)
RETURN

```

Фиг. 15E

