



(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.01.12

(51) Int. Cl. **G01V 1/28** (2006.01)

(21) Номер заявки
201791534

(22) Дата подачи заявки
2015.04.28

(54) СПОСОБ, СИСТЕМА И ДОЛГОВРЕМЕННЫЙ МАШИНОЧИТАЕМЫЙ НОСИТЕЛЬ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

(31) PCT/CN2015/070655

(32) 2015.01.14

(33) CN

(43) 2018.01.31

(86) PCT/EP2015/059139

(87) WO 2016/112997 2016.07.21

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**СТАТОЙЛ (БЕЙДЖИН) БИЗНЕС
КОНСАЛТИНГ СЕРВИС КО., ЛТД.
(CN); СТАТОЙЛ ГАЛФ СЕРВИСИЗ
ЛЛК (US)**

(72) Изобретатель:
Ван Мэйся (CN), Сюй Шэн (US)

(74) Представитель:
**Хмара М.В., Рыбаков В.М., Липатова
И.И., Новоселова С.В., Дощечкина
В.В., Пантелеев А.С., Ильмер Е.Г.,
Осипов К.В. (RU)**

(56) US-A1-2012243371

LIU Y ET AL.: "A new time-space domain high-order finite-difference method for the acoustic wave equation", JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS, LONDON, GB, vol. 228, no. 23, 10 December 2009 (2009-12-10), pages 8779-8806, XP026684043, ISSN: 0021-9991, DOI: 10.1016/J.JCP.2009.08.027 [retrieved on 2009-09-03] the whole document

Haixia Zhao ET AL.: "STABILITY AND NUMERICAL DISPERSION ANALYSIS OF FINITE-DIFFERENCE METHOD FOR THE DIFFUSIVE-VISCOUS WAVE EQUATION", 20 March 2014 (2014-03-20), XP055240885, Retrieved from the Internet: URL: <http://www.math.ualberta.ca/ijnam/Volume-5-2014/No-l-14/2014-01-07.pdf> [retrieved on 2016-01-13] the whole document

(57) Предложены способ, система и долговременный машиночитаемый носитель информации для создания сейсмического изображения геологической структуры. После получения данных о сейсмических волнах, включающих множество трасс сейсмических волн, в первой области геологической структуры вычисляют прогнозируемую погрешность, вызываемую временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области во вторую область геологической структуры. Скорректированные прогнозируемые сейсмические данные во второй области геологической структуры вычисляют путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмическим данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией. Сейсмическое изображение второй области геологической структуры генерируют с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмических данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

Перекрестная ссылка на родственные заявки

Отсутствует

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к сейсмическим данным и более конкретно к способу, системе и долговременному машиночитаемому носителю информации для создания сейсмического изображения геологической структуры.

Уровень техники

Исследования построения сейсмических изображений сложных геологических структур в настоящее время направлены на разработку алгоритмов, основанных на полных волновых уравнениях, таких как обратная временная миграция (RTM, reverse-time migration) и полноволновая инверсия (FWI, full-waveform inversion). Однако распространение волны имеет преобладающее влияние на вычислительные время/затраты при построении сейсмических изображений сложных геологических структур, при этом точность и эффективность распространения волны чрезвычайно важны для успешного реального приложения этих алгоритмов. Одним из широко используемых способов вычисления волнового поля является метод конечных разностей.

Для повышения эффективности вычисления распространения волны в традиционных способах обычно применяют большую частоту выборки (дискретизации). Однако числовая дисперсия вследствие дискретизации производных по времени и пространству может вносить серьезные числовые погрешности в синтетические данные и мигрированные изображения, особенно при большой частоте выборки. В связи с этим уменьшение числовой дисперсии приобрело важность для реализации эффективных и точных алгоритмов распространения волны.

Дисперсию конечной разности в пространстве можно уменьшить посредством метода длинного шаблона или спектрального метода. Однако временную экстраполяцию, вычисляемую посредством односторонней экстраполяции временных шагов, может оказаться нелегко реализовать при помощи спектральных методов, которые вносят погрешности, пропорциональные времени распространения, и при наличии явления распространения различных частотных компонент волновых полей с различными скоростями. Например, для традиционной временной конечно-разностной схемы 2-го порядка представляется, что высокочастотные компоненты обычно распространяются быстрее, чем ожидается. Эти погрешности, вызываемые временной дисперсией, могут искажать фазу и вносить серьезные помехи в данные и изображения, особенно при продолжительном распространении. При построении сейсмических изображений временная дисперсия может вызывать погрешности позиционирования отражающих горизонтов, особенно для глубоких отражающих горизонтов с высокой частотой, построенных по данным, полученным на больших удалениях от источника. Хотя погрешности, вызываемые временной дисперсией, могут быть исправлены путем уменьшения временных шагов, используемых в методе конечных разностей, вычислительные затраты при этом резко возрастают.

Сущность изобретения

Соответственно целью настоящего изобретения является предложение способа, системы и долговременного машиночитаемого носителя информации для создания сейсмического изображения геологической структуры, позволяющих уменьшить и/или устранить погрешности, вызываемые погрешностями конечной разности, вызываемыми временной дисперсией, при несущественных вычислительных затратах.

Для достижения вышеназванной цели в соответствии с первым аспектом настоящего изобретения предлагается способ создания сейсмического изображения геологической структуры, который включает в себя следующие шаги: получают сейсмоволновые данные в первой области геологической структуры, при этом сейсмоволновые данные включают множество трасс сейсмических волн; вычисляют прогнозируемую погрешность, вызываемую временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области во вторую область геологической структуры; компенсируют каждую из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, перед использованием метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры; вычисляют скорректированные прогнозируемые сейсмоволновые данные во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией; и генерируют сейсмическое изображение второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

В соответствии со вторым аспектом настоящего изобретения предлагается система для создания сейсмического изображения геологической структуры, которая содержит множество сейсмических дат-

чиков, выполненных с возможностью сбора сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры, при этом сейсмоволновые данные включают множество трасс сейсмических волн; и устройство генерации сейсмических изображений, выполненное с возможностью приема сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры, собранных множеством сейсмических датчиков, вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры, так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области во вторую область геологической структуры, компенсации каждой из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, перед использованием метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры; вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией; и генерации сейсмического изображения второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

Согласно третьему аспекту настоящего изобретения предлагается долговременный машиночитаемый носитель информации, содержащий машиновыполняемые команды для выполнения способа создания сейсмического изображения геологической структуры. Машиновыполняемые команды включают: получение сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры, при этом сейсмоволновые данные включают множество трасс сейсмических волн; вычисление прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области во вторую область геологической структуры; компенсацию каждой из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, перед использованием метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры; вычисление скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией; и генерацию сейсмического изображения второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

Дополнительная сфера применения настоящего изобретения станет понятной из подробного описания, приведенного ниже. Однако следует понимать, что подробное описание и конкретные примеры, указывающие предпочтительные варианты осуществления изобретения, приведены только в качестве иллюстрации, так как различные изменения и модификации, не отступающие от существа и объема изобретения, станут понятными специалистам в данной области техники из этого подробного описания.

Краткое описание чертежей

Настоящее изобретение станет более понятным из приведенного ниже подробного описания осуществления изобретения и прилагаемых чертежей, которые приведены только в качестве иллюстрации и, таким образом, не ограничивают настоящее изобретение.

На фиг. 1(a) показана относительная погрешность

$$\frac{|\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|}{\omega \Delta t}$$

по отношению к частоте для конечно-разностной схемы 2-го порядка.

На фиг. 1(b) показана относительная погрешность

$$\frac{|\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|}{\omega \Delta t}$$

по отношению к временному шагу Δt для конечно-разностной схемы 2-го порядка.

На фиг. 2(a) показан пример 1D моделирования в конечно-разностной схеме 2-го порядка в соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 2(b) показан пример 1D моделирования в конечно-разностной схеме 4-го порядка в соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 3 показан пример с малым временным шагом, вычисленный псевдоспектральным методом

в схеме 2-го порядка.

На фиг. 4(а) показан пример 1D RTM с применением коррекции данных способом ППВД в конечно-разностной схеме 2-го порядка и без него.

На фиг. 4(б) показан пример 1D RTM с применением коррекции данных способом ППВД в конечно-разностной схеме 4-го порядка и без него.

На фиг. 5 показаны взрывы, применяемые в примере 3D TTI SEAM.

На фиг. 6(а) показано изображение RTM, генерируемое посредством традиционной RTM.

На фиг. 6(б) показано изображение RTM, генерируемое посредством применения коррекции данных способом ППВД до начала распространения в обратном направлении в соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 6(с) показан увеличенный вид глубокой части на фиг. 6(а).

На фиг. 6(д) показан увеличенный вид глубокой части на фиг. 6(б).

На фиг. 7 показана схема создания сейсмического изображения геологической структуры в соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения

Настоящее изобретение будет теперь подробно раскрыто со ссылкой на прилагаемые чертежи, причем одни и те же позиционные обозначения используются для идентификации одинаковых или аналогичных элементов на нескольких видах. Отметим, что чертежи следует просматривать в направлении ориентации позиционных обозначений.

Целью настоящего изобретения является уменьшение и/или устранение погрешностей, вызываемых временной дисперсией, чтобы создавать более точное сейсмическое изображение геологической структуры без ущерба для вычислительной эффективности или увеличения вычислительных затрат.

Для эффективного уменьшения и/или устранения погрешностей, вызываемых временной дисперсией, необходимо провести исследование проблемы временной дисперсии. Исследование начинается с общего волнового уравнения. В отсутствие члена источника распространение может описываться уравнением (1) в соответствии со следующим:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - Lu = 0, \quad (1)$$

где

$u = u(\vec{x}, t)$ - это волновое поле, которое может представлять собой давление для случая акустических волн или вектор смещения для случая упругих волн,

t - время и

L - оператор пространственного дифференцирования.

В случае акустических волн

$$Lu = v^2 \Delta,$$

с Δ в качестве оператора Лапласа

$$\left(\Delta - \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right)$$

и

$v = v(\vec{x})$ в качестве скорости. В случае упругих волн

$$Lu = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right)$$

с ρ в качестве плотности и C_{ijkl} в качестве тензора жесткости.

Член Lu включает в себя оператор пространственной производной, который предполагается точно вычисленным при помощи метода Фурье. Что касается временной дисперсии и поправок к ней, то, основываясь на разложении в ряд Тейлора, общая временная схема может быть получена при помощи следующего уравнения (2)

$$u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t) - 2u(t) = 2F\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}, +\infty, \Delta t\right)u, \quad (2)$$

где

Δt - временной шаг, и

отображение F определяется как

$$F(X, n, \Delta t) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta t^{2k}}{(2k)!} X^k \quad (3)$$

В уравнении (3) X может быть оператором, как в уравнении (2), или переменной.

Таким образом, F представляет собой функционал оператора или функцию переменной. В уравнении (2) члены производных по времени с правой стороны вычисляются при помощи пространственных производных в соответствии со следующим:

$$u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t) - 2u(t) = 2F(L, +\infty, \Delta t)u, \quad (4)$$

На практике с правой стороны уравнения (4) используется лишь ограниченное количество членов.

Например, конечно-разностная схема 2-го порядка (n представляет собой положительное целое число) выглядит следующим образом:

$$u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t) - 2u(t) \cong 2F(L, n, \Delta t)u, \quad (5)$$

Следует отметить, что символ " $\cong$ " используется в уравнении (5), поскольку уравнение (5) представляет собой лишь аппроксимацию вместо точного отношения равенства. Если $n=1$, уравнение (5) представляет собой конечно-разностную схему 2-го порядка. Если $n=2$, уравнение (5) представляет собой конечно-разностную схему 4-го порядка.

Как видно из уравнения (5), конечно-разностные схемы для временной и пространственной дискретизации волновых уравнений могут рассматриваться отдельно, например, конечная разность во времени представляет собой интеграл для данной производной второго порядка по времени, а конечная разность в пространстве представляет собой регулярную производную 1-го или 2-го порядка. Таким образом, временная дисперсия может рассматриваться независимо от пространственной дисперсии.

Прямое преобразование временной дисперсии (ППВД)

Временная дисперсия в уравнении (5) (т.е. левая часть уравнения (5)) может прогнозироваться следующим образом. Временную дисперсию анализируют и прогнозируемую дисперсию сравнивают с результатом вычисления псевдоспектральным методом для проверки точности прогнозируемой дисперсии, которая прогнозируется в соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения. В этом представленном примере, чтобы продемонстрировать, каким образом предсказывается временная дисперсия, используется простая 1D модель.

Чтобы проанализировать временную дисперсию, к уравнению (5) применяют временное преобразование Фурье

$$\hat{u}(\omega) = \int u(t)e^{i\omega t} dt.$$

Теоретически, при отсутствии ошибки аппроксимации преобразование Фурье

$$u(t + \Delta t) \text{ в левой части уравнения (5) представляет собой } e^{-i\omega\Delta t} \cdot \hat{u}(\omega).$$

Однако вследствие временной дисперсии в ходе конечно-разностной аппроксимации фазовый сдвиг не равен точно $\omega\Delta t$. Так как фазовый сдвиг связан с частотой и временным шагом, предполагается, что он представляет собой $\theta(\omega, \Delta t)$. Поэтому выполняют соответствующее преобразование:

$$u(t + \Delta t),$$

представляющее собой

$$e^{-i\theta(\omega, \Delta t)} \cdot \hat{u}(\omega).$$

Аналогичным образом преобразование

$$u(t - \Delta t)$$

представляет собой

$$e^{i\theta(\omega, \Delta t)} \cdot \hat{u}(\omega).$$

Поскольку пространственные производные в правой части уравнения (5) вычисляются точно, без числовых погрешностей, эти действия не сказываются на соответствующем преобразовании Фурье. Исходя из приведенного выше анализа, уравнение (5) принимает следующий вид:

$$e^{-i\theta(\omega, \Delta t)} \cdot \hat{u}(\omega) + e^{i\theta(\omega, \Delta t)} \cdot \hat{u}(\omega) - 2\hat{u}(\omega) = 2F(-\omega^2, n, \Delta t)\hat{u}(\omega), \quad (6)$$

из чего следует:

$$\cos(\theta(\omega, \Delta t)) = 1 + F(\omega^2, n, \Delta t). \quad (7)$$

В результате получаем следующее уравнение (8):

$$\theta(\omega, \Delta t) = \text{sgn}(\omega) \cdot \text{acos}(1 + F(-\omega^2, n, \Delta t)) \quad (8)$$

Согласно уравнению (8) при низкой частоте и малом временном шаге Δt , $\theta(\omega, \Delta t)$ близка к $\omega\Delta t$. Поэтому погрешность, вызываемая временной дисперсией, мала при низкой частоте и малом временном шаге Δt . Однако погрешность

$$|\theta(\omega, \Delta t) - \omega\Delta t|$$

возрастает вместе с временным шагом и частотой. Относительная погрешность

$$\frac{|\theta(\omega, \Delta t) - \omega\Delta t|}{\omega\Delta t}$$

для конечно-разностной схемы второго порядка показана на фиг. 1.

Для прогнозирования временной дисперсии из конечно-разностных схем здесь предлагается "прямое преобразование временной дисперсии" (ППВД, forward time dispersion transform, FTDT), которое следует реализовать для каждой одиночной временной трассы $u(t)$, не имеющей погрешностей, вызываемых временной дисперсией, как описано на следующих шагах:

- (1) вычислить $\theta(\omega, \Delta t)$ по уравнению (8) для значимых частот;
- (2) применить преобразование Фурье к трассе:

$$\hat{u}(\omega) = \int u(t)e^{i\omega t} dt$$

для преобразования трассы в частотную область;

(3) применить обратное "модифицированное" преобразование Фурье для получения прогнозируемой трассы во временной области:

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{2\pi} \int \hat{u}(\omega) e^{-i\frac{\theta(\omega, \Delta t)}{\Delta t} t} d\omega.$$

Следует отметить, что шаг (3) представляет собой "модифицированное" обратное преобразование Фурье, в котором вместо использования $\omega\Delta t$ в качестве обратного преобразования Фурье, оно было заменено фазовым сдвигом $\theta(\omega, t)$. Это приводит к получению прогнозируемой трассы ППВД $\bar{u}(t)$.

Для проверки точности прогнозирования ППВД в качестве примеров используются конечно-разностные схемы 2-го и 4-го порядка. В примерах, показанных на фиг. 2(а) и 2(б), применяется 1D модель с постоянной скоростью 1500 м/с. Источником является вэйвлет Рикера с пиковой частотой 10 Гц. Расстояние между источником и приемником составляет 18 км. Синяя сплошная линия представляет собой трассу, вычисленную псевдоспектральным методом, красная пунктирная линия представляет собой трассу, прогнозируемую способом ППВД, зеленая сплошная линия представляет собой аналитическое решение, а черную сплошную линию получают путем применения ОПВД к трассе, вычисленной псевдоспектральным методом (синяя линия).

Чтобы проверить возможность прогнозирования способом ППВД, приводится сравнение между трассами, прогнозируемыми способом ППВД, и трассами, вычисленными псевдоспектральным методом. Трассы, прогнозируемые способом ППВД, получают, применяя преобразование ППВД к аналитическим трассам (зеленая линия на фиг. 2(а) и 2(б)), которые являются точными и не имеют числовых погрешностей. Временные шаги $\Delta t=3$ мс при моделировании 2-го порядка и $\Delta t=9$ мс при моделировании 4-го порядка. В изображенных примерах идеальное соответствие между синей сплошной линией (псевдоспектральный метод) и красной пунктирной линией (способ ППВД) на фиг. 2(а) и 2(б) показывает, что способ ППВД точно прогнозирует временную дисперсию при продолжительном распространении. Было также отмечено, что моделируемая форма вэйвлета сильно искажена из-за временной дисперсии.

Обратное преобразование временной дисперсии (ОПВД)

Ввиду вышеизложенного очевидно, что временная дисперсия точно прогнозируется предлагаемым способом ППВД. Поскольку временная дисперсия была точно предсказана, "модифицированное" обратное преобразование Фурье может использоваться, чтобы компенсировать временную дисперсию. Для устранения временной дисперсии "обратное преобразование временной дисперсии" (ОПВД, inverse time dispersion transform, ITDT) применяется к каждой одиночной моделируемой трассе следующим образом:

- (1) вычислить $\theta(\omega, \Delta t)$ по уравнению (8) для значимых частот;
- (2) применить "модифицированное" преобразование Фурье:

$$\hat{u}'(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int u(t) e^{i\frac{\theta(\omega, \Delta t)}{\Delta t} t} dt$$

для преобразования трассы в частотной области с фазовым сдвигом $\theta(\omega, \Delta t)$;

- (3) применить обратное преобразование Фурье:

$$\bar{u}'(t) = \int \hat{u}'(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

для получения скорректированной трассы ОПВД $\bar{u}'(t)$

во временной области.

Следует отметить, что шаг (2) представляет собой "модифицированное" преобразование Фурье, в котором, вместо использования $\omega\Delta t$ в качестве преобразования Фурье, оно было заменено фазовым сдвигом $\theta(\omega, \Delta t)$.

Конкретно ОПВД представляет собой процедуру, обратную ППВД, и может устранять погрешности, вызываемые временной дисперсией, в синтетических данных. Для проверки ее эффективности к трассам, вычисленным псевдоспектральным методом (синяя линия на фиг. 2(а) и 2(б)), применяют коррекцию ОПВД (синяя линия на фиг. 2(а) и 2(б)) и результат сравнивают с аналитическими решениями (зеленая линия на фиг. 2(а) и 2(б)). Трассы, скорректированные посредством ОПВД, показаны в виде черной пунктирной линии на фиг. 2(а) и 2(б)). Можно отметить, что после применения коррекции посредством ОПВД фазовое искажение устраняется. Факт идеального совпадения трасс, скорректированных посредством ОПВД, с аналитическими решениями для схем 2-го и 4-го порядка, показанных на фиг. 2(а) и 2(б), указывает на то, что способ ОПВД успешно устраняет погрешности, вызываемые временной дисперсией, при синтетическом моделировании.

В целях сравнения результаты временной дисперсии при использовании меньших временных шагов также показаны на фиг. 3. В этом примере расстояние между приемником и источником составляет 18 км, и изображена вычисленная псевдоспектральным методом схема 2-го порядка, показывающая моделируемую трассу (черная пунктирная линия) с использованием временного шага $\Delta t=0,5$ мс и ее сравнение с аналитическим решением (зеленая сплошная линия). Несмотря на использование очень маленького вре-

менного шага и при вычислительных затратах, в пять раз превышающих затраты при использовании временного шага $\Delta t=3$ мс, определенные числовые погрешности все же имеются на трассе, моделируемой псевдоспектральным методом (черная пунктирная линия на фиг. 3). С другой стороны, при использовании способа ОПВД могут использоваться большие временные шаги, при этом вычислительное время резко уменьшается, тогда как погрешности, вызываемые временной дисперсией, эффективно устраняются, как показано на фиг. 2(а). Это ясно показывает превосходство способа коррекции ОПВД при синтетическом моделировании.

Аналогично сейсмическому моделированию, настоящее изобретение можно также применить к построению сейсмических изображений. Например, на качество изображений обратной временной миграции (RTM) также влияют числовые погрешности, вызванные временной дисперсией. Фаза может быть искажена, что приводит к смещению по глубине. Для устранения погрешностей, вызванных временной дисперсией, при построении изображений RTM коррекция посредством ППВД может применяться к данным до начала распространения в обратном направлении. В варианте осуществления настоящего изобретения последовательность действий для построения изображений RTM может быть следующей:

(1) распространение в прямом направлении для вычисления прямых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры;

(2) применение ППВД к сейсмоволновым данным до начала распространения в обратном направлении для компенсации каждой из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией;

(3) распространение в обратном направлении для вычисления скорректированных прогнозируемых обратных сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией;

(4) применение условия построения изображения для генерации сейсмического изображения второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

В частности, ППВД-коррекция данных до начала распространения в обратном направлении компенсирует искажение изображения RTM, вносимое прямым моделированием и обратным моделированием, посредством фазового сдвига сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызванной временной дисперсией. Кроме того, вся последовательность действий при RTM не очень значительно изменяет вычислительные затраты/время. Затраты на ППВД пренебрежимо малы по сравнению с вычислительным временем RTM, тем самым гарантируя эффективность.

Пример 1D RTM

Чтобы продемонстрировать эффективность настоящего изобретения для построения изображений RTM, испытания для определения импульсных откликов для конечно-разностных схем 2-го и 4-го порядка приведены на фиг. 4(а) и 4(б). Эти испытания основаны на той же 1D модели, которая использовалась на фиг. 2(а) и 2(б). Входные данные представляют собой взрыв Рикера с пиковой частотой 10 Гц и появлением импульса в момент времени 12 с. Результаты RTM для конечно-разностных схем 2-го и 4-го порядка показаны на фиг. 4(а) и 4(б) соответственно. Временные шаги составляют Δt 3 мс для схемы 2-го порядка и $\Delta t=9$ мс для схемы 4-го порядка. Сравнения между откликами RTM с коррекцией ППВД и без нее показывают, что при применении способа коррекции ППВД сильное фазовое искажение устраняется, и определение глубины становится точным. За исключением небольшого вычислительного времени, затраченного на применение ППВД к входным данным, этот подход не увеличивает затраты памяти или какие-либо дополнительные вычислительные затраты. Это позволяет использовать большие временные шаги для построения изображений, что значительно повышает эффективность.

Пример 3D TTI RTM

В этом примере коррекция ППВД применяется к 3D модели TTI (поперечно-изотропной среды с наклонной осью симметрии, tilted transverse isotropy) SEAM (корпорации SEG Advanced Modeling Corporation). В частности, конечно-разностная схема 2-го порядка и уравнение TTI, предложенные в работе Xu и Zhou (Xu, S., and H. Zhou, 2014, Accurate simulations of pure quasi-P-waves in complex anisotropic media: Geophysics, 79, no. 6, T341-T348), применяются для распространения в прямом и обратном направлении. Общее количество, составляющее 342 взрыва, как показано на фиг. 5, выбрано для построения изображений RTM, при этом черные линии показывают 6 линий взрывов с 342 взрывами.

Изображение RTM (при $X=8360$ м), генерируемое традиционным способом RTM, показано на фиг. 6(а), тогда как изображение RTM (при $X=8360$ м), генерируемое путем применения коррекции ППВД данных до начала распространения в обратном направлении, показано на фиг. 6(б). Кроме того, тот же временной шаг $\Delta t=3,032$ мс для распространения волны в обоих случаях при использовании конечно-разностной временной схемы 2-го порядка. Максимальная частота, используемая для миграции,

составляет 20 Гц. При сравнении фиг. 6(а) и (b) можно видеть, что вступления на фиг. 6(b) намного четче и более сфокусированы при использовании коррекции ППВД. Глубина вступлений, особенно для вступлений глубинных волн, также скорректирована в сторону правильного положения путем применения коррекции ППВД данных до начала распространения в обратном направлении. На фиг. 6(с) и 6(d) соответственно показан увеличенный вид глубокой части на фиг. 6(а) и 6(b), из которого ясно видно, что изображение RTM (при $X=8360$ м), генерируемое путем применения коррекции ППВД данных до начала распространения в обратном направлении, обеспечивает лучшее качество изображения: 1) лучшие вэйлеты были достигнуты при значительно меньшей волнистости контуров изображения (стрелки А); 2) глубина отражающего горизонта была скорректирована в правильное положение (стрелка С); и 3) было получено лучше сфокусированное изображение, на что указывает улучшение фокусировки изображения точек дифракции и отражающего горизонта, представляющего собой поверхность несогласия на отложениях и подошве соляного купола (стрелки В). Эти изображенные примеры ясно показывают, что способ коррекции ППВД эффективен при построении сложных 3D изображений как в изотропных, так и в анизотропных средах.

Ввиду вышеизложенного ясно, что прямое преобразование временной дисперсии ППВД и обратное преобразование ОПВД в случае правильного выбора могут устранять временную дисперсию при сейсмическом моделировании и построении изображений. Прямое преобразование ППВД позволяет почти идеально прогнозировать временную дисперсию при конечно-разностном моделировании и может применяться для устранения шумов, создаваемых временной дисперсией, в изображениях RTM. Обратное преобразование ОПВД может применяться для устранения погрешностей, вызываемых временной дисперсией, при синтетическом моделировании. Эти преобразования устраняют погрешности, вызываемые временной дисперсией, при этом рост затрат пренебрежимо мал. Кроме того, для распространения волны допустим также относительно большой временной шаг, что значительно повышает эффективность, в то же время обеспечивая точность.

Изображенные примеры показывают, каким образом настоящее изобретение может использоваться в приложениях сейсмического моделирования и построения изображений, а также то, что временная дисперсия может удовлетворительно обрабатываться в изотропных и анизотропных средах. Настоящее изобретение может также использоваться в алгоритмах обратной временной миграции (RTM) по методу наименьших квадратов и полноволновой инверсии (FWI) для повышения эффективности и точности. Это позволяет значительно улучшить последовательность действий при обработке сейсмических данных и генерировать высококачественные изображения сложных структур геологической среды при нефтегазопроисковой разведке и других геологоразведочных работах.

Ввиду вышеизложенного, изображенные варианты осуществления иллюстрируют способ создания сейсмического изображения геологической структуры, включающий в себя следующие шаги: получают данные о сейсмических волнах (сейсмоволновые данные) в первой области геологической структуры, при этом сейсмоволновые данные включают множество трасс сейсмических волн; вычисляют прогнозируемую погрешность, вызываемую временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области во вторую область геологической структуры; компенсируют каждую из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, перед использованием метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры; вычисляют скорректированные прогнозируемые сейсмоволновые данные во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией; и генерируют сейсмическое изображение второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

В варианте осуществления настоящего изобретения шаг вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, включает следующий шаг: оценивают фазовый сдвиг, возникающий в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры, причем фазовый сдвиг представляет собой

$$\theta(\omega, \Delta t) = \operatorname{sgn}(\omega) \cdot \operatorname{acos}(1 + F(-\omega^2, n, \Delta t)),$$

где

ω - угловая частота трассы сейсмической волны,

Δt - временной шаг конечно-разностной аппроксимации,

$2n$ - порядок конечно-разностной аппроксимации, при этом n - положительное целое число, и

$$F(-\omega^2, n, \Delta t) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta t^{2k}}{(2k)!} (-\omega^2)^k ,$$

и при этом прогнозируемая погрешность, вызываемая временной дисперсией, составляет $|\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|$.

В варианте осуществления настоящего изобретения шаг компенсации сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, выполняют в частотной области.

В варианте осуществления настоящего изобретения шаг вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры включает следующий шаг: преобразуют сейсмические данные в первой области геологической структуры, скомпенсированные посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

В варианте осуществления настоящего изобретения шаг компенсации сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, включает следующий шаг: выполняют фазовый сдвиг сейсмических данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, до использования метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры.

В варианте осуществления настоящего изобретения шаг фазового сдвига сейсмических данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, выполняют в частотной области.

Кроме того, как показано на фиг. 7, в одном варианте осуществления настоящее изобретение может быть реализовано в виде системы 700 для создания сейсмического изображения геологической структуры, содержащей множество сейсмических датчиков 710, выполненных с возможностью сбора сейсмических данных 720 в первой области 732 геологической структуры, при этом сейсмические данные 720 включают множество трасс сейсмических волн; и устройство 740 генерации сейсмических изображений, выполненное с возможностью приема сейсмических данных 720 в первой области 732 геологической структуры, собранных множеством сейсмических датчиков 710, вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, для фактической погрешности, вызываемой временной дисперсией, которая возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмических данных во второй области 734 геологической структуры так, как будто сейсмическая волна распространяется из первой области 732 во вторую область 734 геологической структуры; компенсации каждой из трасс сейсмических волн сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, перед использованием метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры; вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмическим данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией; и генерации сейсмического изображения второй области геологической структуры с использованием скорректированных прогнозируемых сейсмических данных так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией.

В варианте осуществления настоящего изобретения устройство 740 генерации сейсмических изображений может быть реализовано в виде цифровых электронных схем или аппаратных средств, включая программируемый процессор, компьютер, сервер или несколько процессоров, компьютеров, процессоров или серверов и их структурных эквивалентов, или комбинации одного или более из них.

В другом варианте осуществления настоящее изобретение может быть реализовано в виде одного или более компьютерных программных продуктов, т.е. одного или более модулей команд компьютерных программ, закодированных на долговременном машиночитаемом носителе информации для выполнения работы, или управления работой устройства обработки данных. Машиночитаемый носитель информации может представлять собой машиночитаемое устройство хранения, машиночитаемую среду хранения, запоминающее устройство, комбинацию материальных средств, влияющих на распространяемый сигнал машинного считывания, или комбинацию одного или более из них.

Очевидно, что в описанное таким образом изобретение могут вноситься различные изменения. Такие изменения не должны рассматриваться как отступления от существа и объема изобретения, и все такие модификации, как очевидно специалисту в данной области техники, входят в объем охраны прилагаемых пунктов формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ уменьшения или устранения погрешностей, вызываемых временной дисперсией, в прогнозируемых сейсмоволновых данных при создании сейсмического изображения геологической структуры с использованием указанных прогнозируемых сейсмоволновых данных, включающий шаги, на которых

получают сейсмоволновые данные в первой области геологической структуры, при этом сейсмоволновые данные включают множество трасс сейсмических волн;

вычисляют прогнозируемую погрешность, вызываемую временной дисперсией, на основе угловой частоты (ω) по меньшей мере одной трассы из указанных трасс сейсмических волн и временного шага (Δt), подлежащего использованию при вычислении указанных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры с применением конечно-разностной аппроксимации;

компенсируют каждую из трасс сейсмических волн сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией;

после шага компенсации каждой из трасс сейсмических волн вычисляют указанные прогнозируемые сейсмоволновые данные во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмоволновым данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией;

и генерируют сейсмическое изображение второй области геологической структуры с использованием прогнозируемых сейсмоволновых данных.

2. Способ по п.1, в котором прогнозируемую погрешность, вызываемую временной дисперсией, находят как

$$|\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|,$$

где $\theta(\omega, \Delta t)$ - это оцененный фазовый сдвиг, представляющий собой функцию от ω и Δt .

3. Способ по п.2, в котором шаг вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, включает шаг, на котором

оценивают указанный оцененный фазовый сдвиг, причем этот фазовый сдвиг возникает в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры,

причем фазовый сдвиг представляет собой

$$\theta(\omega, \Delta t) = \operatorname{sgn}(\omega) \cdot \operatorname{acos}(1 + F(-\omega^2, n, \Delta t)),$$

где

ω - указанная угловая частота трассы сейсмической волны,

Δt - указанный временной шаг конечно-разностной аппроксимации,

$2n$ - порядок конечно-разностной аппроксимации, при этом n - положительное целое число, и

$$F(-\omega^2, n, \Delta t) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta t^{2k}}{(2k)!} (-\omega^2)^k |\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|.$$

4. Способ по любому из пп.1-3, в котором шаг компенсации сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, выполняют в частотной области.

5. Способ по п.4, в котором шаг вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры включает шаг, на котором

преобразуют сейсмоволновые данные в первой области геологической структуры, скомпенсированные посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

6. Способ по любому из пп.1-5, в котором шаг компенсации сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, включает шаг, на котором

выполняют фазовый сдвиг сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, до использования метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры.

7. Способ по п.6, в котором шаг фазового сдвига сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, выполняют в частотной области.

8. Способ по п.6 или 7, в котором шаг вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры включает шаг, на котором

преобразуют сейсмоволновые данные в первой области геологической структуры, скомпенсированные посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

няется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

9. Способ по любому из пп.1-8, в котором шаг вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры включает шаг, на котором

преобразуют сейсмические данные в первой области геологической структуры, скомпенсированные посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

10. Система уменьшения или устранения погрешностей, вызываемых временной дисперсией, в прогнозируемых сейсмических данных при создании сейсмического изображения геологической структуры с использованием указанных прогнозируемых сейсмических данных, содержащая

множество сейсмических датчиков, выполненных с возможностью сбора сейсмических данных в первой области геологической структуры, при этом сейсмические данные включают множество трасс сейсмических волн;

и устройство генерации сейсмических изображений, выполненное с возможностью

приема сейсмических данных в первой области геологической структуры, собранных множеством сейсмических датчиков,

вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, на основе угловой частоты (ω) по меньшей мере одной трассы из указанных трасс сейсмических волн и временного шага (Δt), подлежащего использованию при вычислении прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры с применением конечно-разностной аппроксимации,

компенсации каждой из трасс сейсмических волн сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией,

вычисления после шага компенсации каждой из трасс сейсмических волн указанных прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры путем применения конечно-разностной аппроксимации к сейсмическим данным в первой области геологической структуры, скомпенсированным посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией,

и генерации сейсмического изображения второй области геологической структуры с использованием прогнозируемых сейсмических данных.

11. Система по п.10, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью вычисления прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, посредством оценки фазового сдвига, возникающего в результате применения конечно-разностной аппроксимации при вычислении прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры, причем фазовый сдвиг представляет собой

$$\theta(\omega, \Delta t) = \operatorname{sgn}(\omega) \cdot \operatorname{acos}(1 + F(-\omega^2, n, \Delta t)),$$

где

ω - угловая частота трассы сейсмической волны,

Δt - временной шаг конечно-разностной аппроксимации,

$2n$ - порядок конечно-разностной аппроксимации, при этом n - положительное целое число, и

$$F(-\omega^2, n, \Delta t) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta t^{2k}}{(2k)!} (-\omega^2)^k,$$

при этом прогнозируемая погрешность, вызываемая временной дисперсией, составляет

$$|\theta(\omega, \Delta t) - \omega \Delta t|.$$

12. Система по п.10 или 11, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью компенсации сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области.

13. Система по п.12, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры посредством преобразования сейсмических данных в первой области геологической структуры, скомпенсированных посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

14. Система по любому из пп.10-13, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью компенсации сейсмических данных в первой области геологической структуры посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, посредством фазового сдвига сейсмических данных в первой области геологической структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, до использования метода конечных разностей для вычисления прогнозируемых сейсмических данных во второй области геологической структуры.

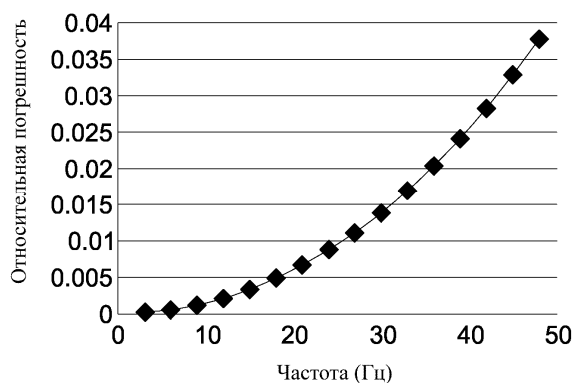
15. Система по п.14, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью осуществления фазового сдвига сейсмических данных в первой области геологической

структуры на величину, соответствующую прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области.

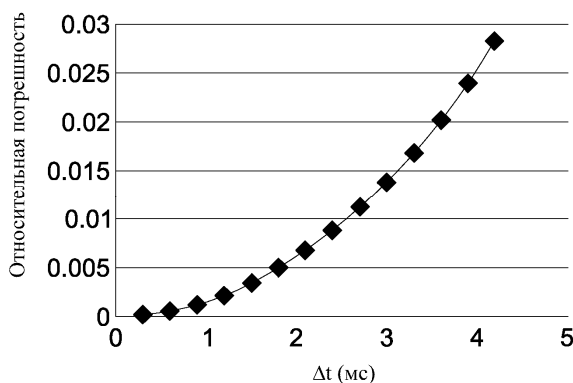
16. Система по п.15, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры посредством преобразования сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры, скомпенсированных посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

17. Система по любому из пп.10-16, в которой устройство генерации сейсмических изображений выполнено с возможностью вычисления скорректированных прогнозируемых сейсмоволновых данных во второй области геологической структуры посредством преобразования сейсмоволновых данных в первой области геологической структуры, скомпенсированных посредством прогнозируемой погрешности, вызываемой временной дисперсией, в частотной области во временную область так, что фактическая погрешность, вызываемая временной дисперсией, устраняется прогнозируемой погрешностью, вызываемой временной дисперсией, во временной области.

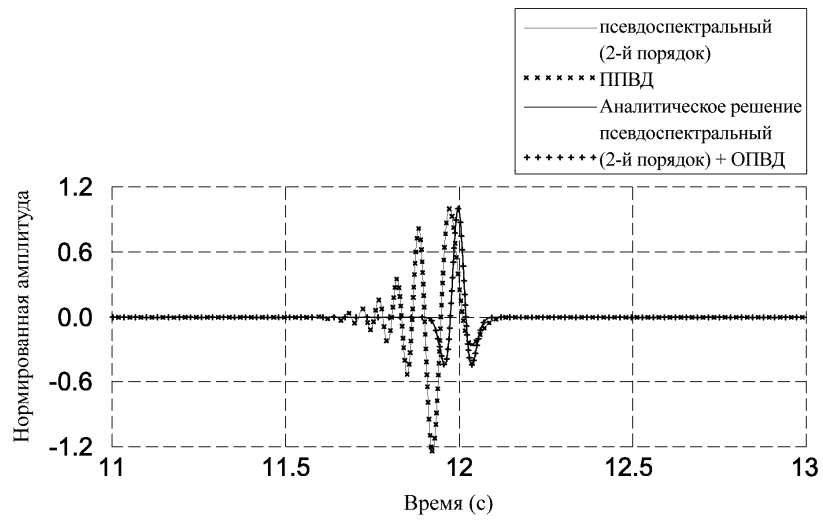
18. Долговременный машиночитаемый носитель информации, содержащий машиновыполняемые команды, которые при выполнении на компьютере обеспечивают выполнение им способа по любому из пп.1-9.



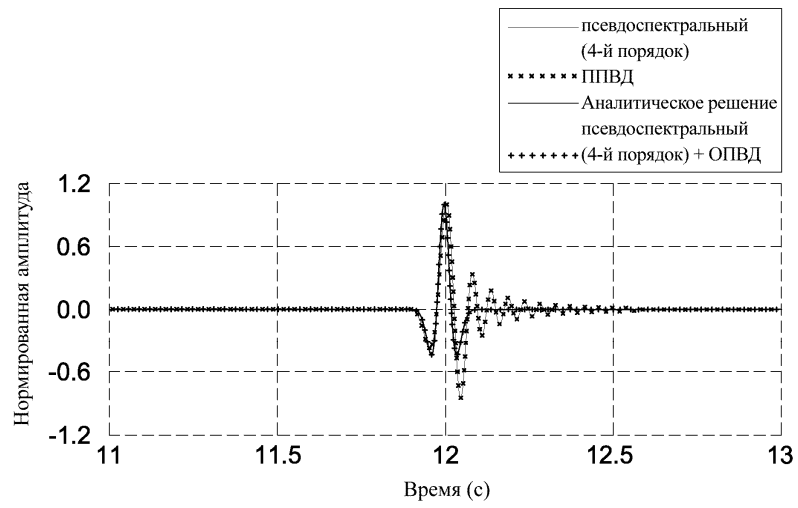
Фиг. 1a



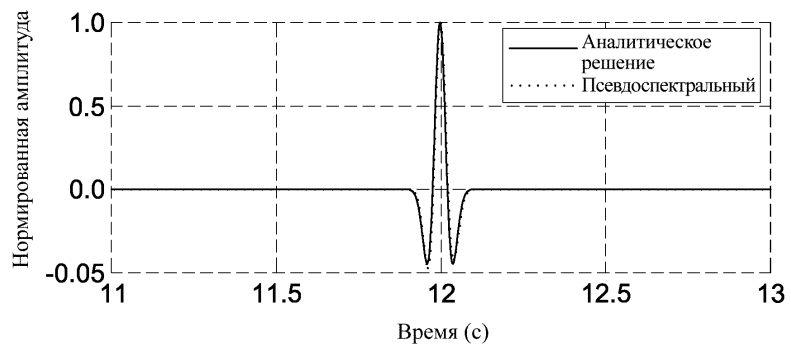
Фиг. 1b



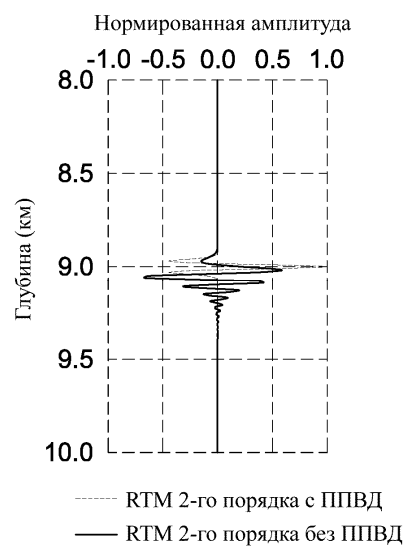
Фиг. 2а



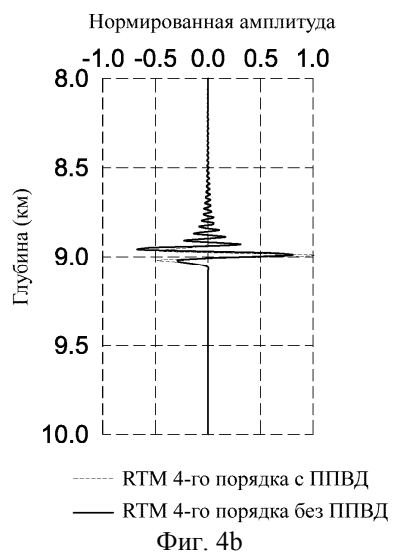
Фиг. 2b



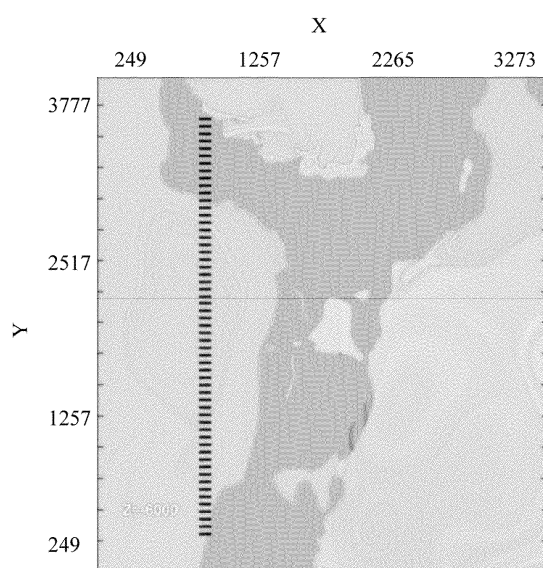
Фиг. 3



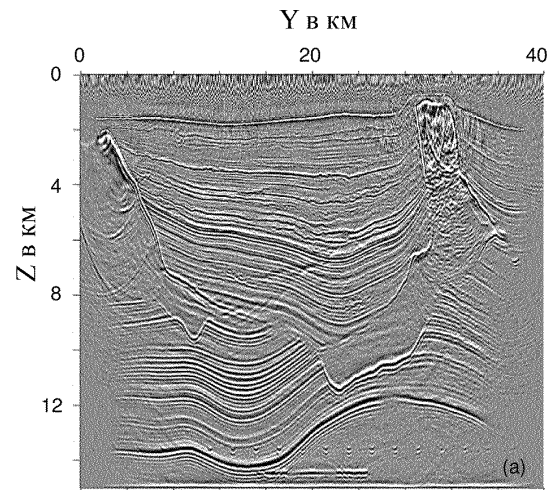
Фиг. 4а



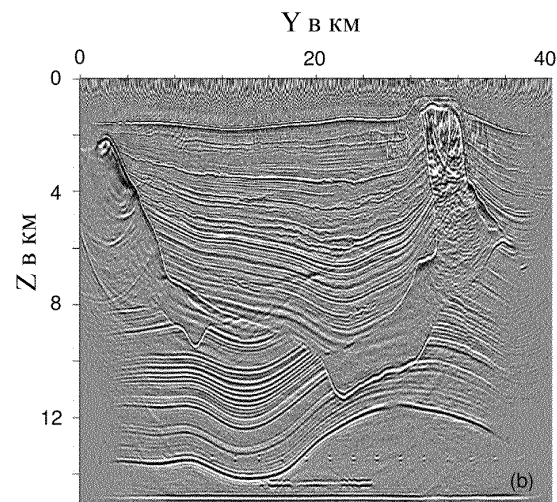
Фиг. 4б



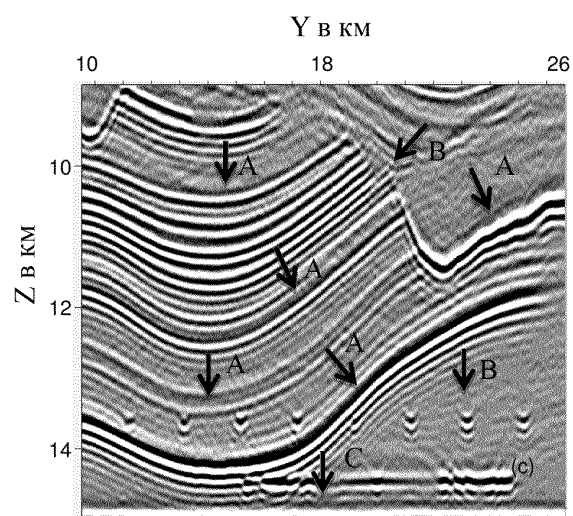
Фиг. 5



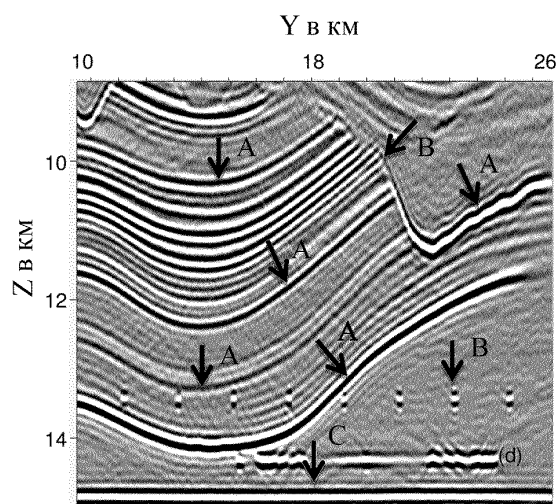
Фиг. 6а



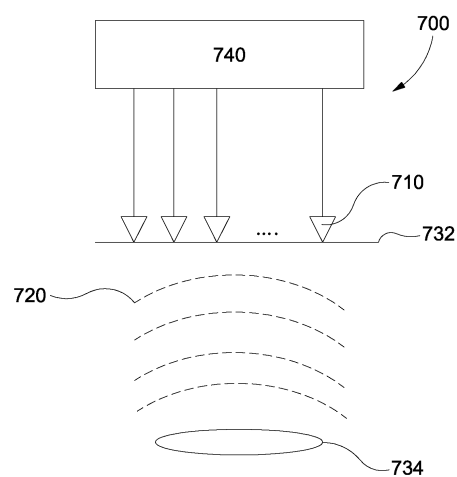
Фиг. 6b



Фиг. 6с



Фиг. 6d



Фиг. 7

