

УДК 550.834

ФАЗОЧАСТОТНАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Кочегуров Александр Иванович¹,
kaicc@tpu.ru

Кочегурова Елена Алексеевна¹,
kocheg@tpu.ru

Ильясова Ильмира Эльмировна¹,
iei1@tpu.ru

Виктор Герингер²,
geringer@dhbw-ravensburg.de

Конрад Рейф²,
reif@dhbw-ravensburg.de

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Баден-Вюртембергский объединенный государственный университет,
DNBW-Равенсбург, Фридрихсхафен, Германия.

Актуальность работы. В настоящее время методы деконволюции широко применяются при обработке данных во многих прикладных областях, таких как радио- и гидролокация, навигация, гидроакустика, геофизика и т. д. Особое место эти методы занимают в сейсморазведке при поиске нефтяных и газовых месторождений в тонкослоистых геологических средах. В таких средах отраженные от границ раздела волны интерферируют между собой и проследить границы раздела геологических сред становится крайне затруднительно. Ситуация ещё более усложняется из-за наложения нерегулярных помех, присутствующих на всех сейсмических записях. Поэтому для прослеживания границ в тонкослоистых средах предложено немало алгоритмов сжатия сигналов, которые основаны, как правило, на методах деконволюции. Однако в рамках традиционных методов деконволюции оценивание фазовых спектров не производится, их считают либо минимально фазовыми, либо нуль-фазовыми. Между тем именно в фазу сейсмических сигналов, а точнее в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена важная информация о местоположении отражающих границ, и, следовательно, разрешающая способность сигнала определяется, в первую очередь, сложностью его фазовой характеристики. Поэтому разработка и исследование эффективности алгоритма фазочастотной деконволюции имеет важное значение для практики обработки и интерпретации сейсмических материалов.

Цель исследования: на основе предложенного ранее метода фазочастотного прослеживания сейсмических волн разработать алгоритм фазочастотной деконволюции; исследовать эффективность данного алгоритма на моделях геологических сред и опробовать его применение для обработки и интерпретации материалов общей глубинной точки, полученных на ряде нефтяных месторождений Томской области.

Методы исследования: цифровая обработка пространственно-временных сигналов и полей, методы дискретного преобразования Фурье, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Результаты. Разработан алгоритм деконволюции на основе метода фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов, отличающийся от известных алгоритмов наличием процедуры оценивания мгновенных фазовых спектров. Показаны характерные особенности фазовых спектров, положенные в основу данного алгоритма. Проведены исследования алгоритма на моделях волнового сейсмического поля, а также опытная обработка и интерпретация реальных данных. Полученные результаты подтвердили перспективность применения фазочастотной деконволюции для анализа тонкослоистых геологических сред.

Ключевые слова:

Деконволюция сжатия, методы фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов, модели геологических сред, минимально-фазовые сигналы.

Введение

При обработке и интерпретации данных сейсмических наблюдений, получаемых при поиске месторождений нефти и газа, значительное развитие в последнее время получили методы деконволюции, направленные на получение геологических разрезов с высокой разрешающей способностью [1–5]. В общем случае деконволюция представляет собой процесс, который улучшает временную разрешающую способность сейсмических данных, сжимая основной сейсмический импульс, и является одной из важнейших процедур обработ-

ки данных сейсморазведки. Качество выполнения этой процедуры непосредственно влияет как на надежность выделения и корреляцию отраженных волн, так и на достоверность последующих глубинных построений. Как правило, деконволюция применяется перед суммированием; тем не менее, она применяется и к суммированным данным. С математической точки зрения деконволюция является операцией, основанной на обратной свертке сигналов [6], при этом для синтеза передаточной функции обратного фильтра необходимо иметь полную информацию о комплексном спектре сигнала [6].

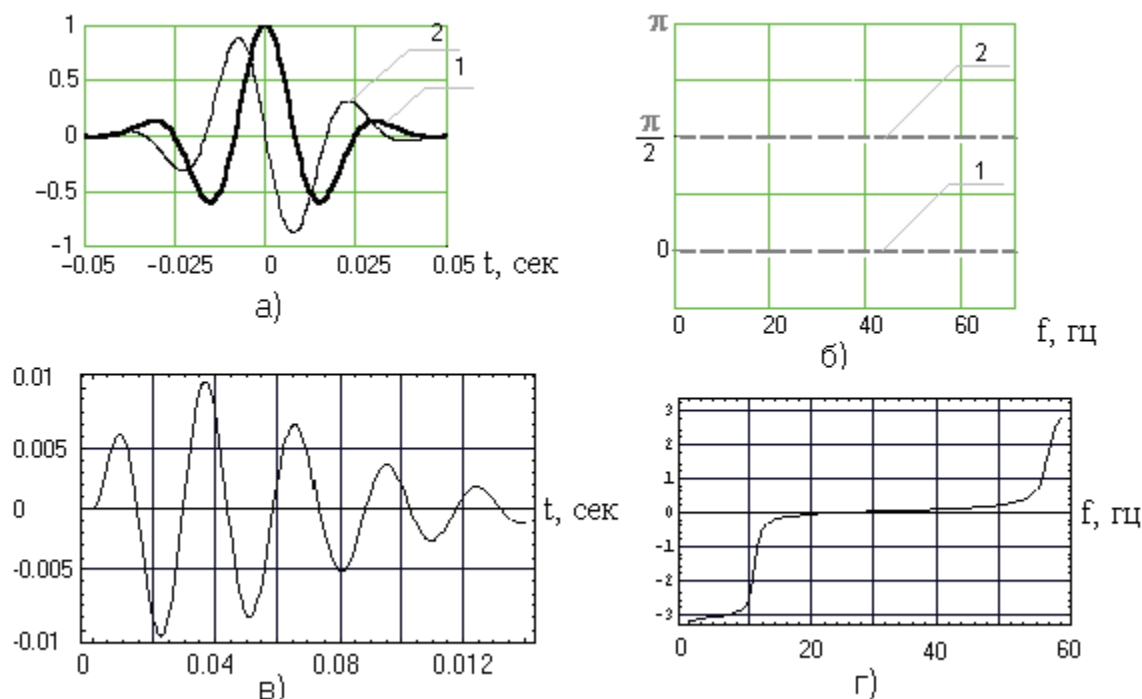


Рис. 1. Пояснение эффекта стационарности фазового спектра отраженных волн: а) импульсы с колокольной огибающей; б) импульс Берлаге; в) фазовые спектры импульса с колокольной огибающей; г) фазовый спектр импульса Берлаге

Fig. 1. Explanation of the steady effect of a phase spectrum of the reflected waves: а) impulses with bell bending around; б) Berlage impulse; в) phase spectrum of the impulse with bell bending around; г) phase spectrum of Berlage impulse

Однако в большинстве известных алгоритмов деконволюции (импульсная, предсказывающая, поверхностно-согласованная, слепая) используют только информацию об энергетических спектрах сигналов, а фазочастотные характеристики отраженных волн считают либо минимально фазовыми, либо нуль-фазовыми [7–11]. Есть только несколько работ, в которых авторы предлагают в алгоритмах деконволюции использовать фазовые соотношения как числовые константы, значения которых были получены ранее в результате многочисленных экспериментов и не привязаны к конкретным обрабатываемым данным, например, такой подход рассматривается в [12]. Поэтому применение методов деконволюции в ряде практически важных случаев не позволяет получать надежные оценки временного положения отражающих границ, тем более что геологическая среда обладает дисперсионностью, а, следовательно, форма сигнала в точках приема изменяется. В таких условиях основным информативным параметром временного положения отражающих границ становится фаза сигнала, а именно выделенная область стационарной фазы, которая и обеспечивает формирование сигнала на сейсмической записи. Поэтому разработка методов деконволюции, использующих наряду с амплитудными спектрами и фазовые спектры сейсмических сигналов, имеет весьма актуальное значение.

Предпосылки использования фазовых спектров в задачах деконволюции

При вычислении фазовых спектров сейсмических колебаний большое значение имеет выбор на сейсмической записи начала отсчета времени и величины временного интервала (размера окна анализа), внутри которого выполняется дискретное преобразование Фурье. Зависимость фазовых спектров сигналов от начала отсчета проявляется в известной теореме о временном сдвиге, согласно которой при сдвиге сигнала на величину t_0 его амплитудный спектр не изменяется, а фазовый спектр получает линейную добавку $\varphi_0 = \omega t_0$ [13]. Обычно фазовые спектры отражений имеют вид монотонных кривых без выраженных особенностей формы [14, 15], что затрудняет выделение каких-либо закономерностей в их свойствах. Проведенные нами исследования показали, что при совмещении начала отсчета с центром окна анализа фазовые спектры наиболее часто используемых аналитических моделей сейсмоимпульсов в определенной полосе частот принимают постоянное, не зависящее от частоты значение [16]. В качестве примера на рис. 1 приведены импульсы с колокольной огибающей (импульс Пузырева) и импульс Берлаге, а также их фазовые спектры, найденные в окне анализа, составляющем 2,5 видимых периода импульсов, и совмещении начала отсчета с центром окна. Из рисунка видно, что в полосе частот, где сосредоточена

основная энергия сигналов, их фазовые спектры практически не зависят от частоты и принимают постоянное значение.

Эта важная особенность фазовых спектров сейсмоимпульсов и была названа свойством их «стационарности». При ограниченной длительности сейсмоимпульсов область стационарной фазы определяется полосой частот [17]:

$$\left[\max \left\{ 0, f_0 - \frac{1}{T} \right\}, f_0 + \frac{1}{T} \right],$$

где f_0 – преобладающая частота в спектре импульса, а T – длительность окна анализа.

Физическое обоснование эффекта стационарности фазового спектра сейсмоимпульсов вытекает из известного локационного принципа передачи сигналов через линейные среды. В соответствии с этим принципом, перенос энергии сигналом возможен лишь при условии синфазности его гармонических составляющих в основном диапазоне частот [18]. Наиболее полно этот принцип выполняется для идеально упругих сред. Для сред с поглощением наблюдается отклонение от «идеальной» стационарности. Тем не менее, как показали исследования спектров однократно отраженных сейсмических волн в различных районах Западной Сибири, и для них удается выделить стационарную составляющую ФЧХ. Стационарные участки выделяются и для интерференционных колебаний, обычно регистрируемых при отражении волн в тонкослоистых средах.

Выделенные особенности поведения фазовых спектров сейсмических сигналов, как будет показано далее, могут быть эффективно использованы для построения частотных характеристик обратного фильтра. Рассмотрим кратко процесс деконволюции.

Деконволюция сейсмических сигналов

С математической точки зрения деконволюция является операцией, основанной на обратной свертке сигналов [6]:

$$S(f) = \frac{X(f)}{H(f)} = X(f)H^{-1}(f) \Leftrightarrow x(t) \otimes h^{-1}(t) = s(t),$$

где индексом «-1» обозначена передаточная функция оператора обратного фильтра. Теперь рассмотрим деконволюцию сжатия (импульсную деконволюцию) применительно к сейсмической трассе.

Пусть сейсмическая трасса имеет вид [6]:

$$x(t) = s(t) \otimes e(t) + n(t),$$

где $x(t)$ – зарегистрированная сейсмотрасса; $s(t)$ – основной сейсмический импульс; $e(t)$ – импульсный отклик разреза; $n(t)$ – случайная помеха; $\otimes$ – круговая свертка.

Задачей импульсной деконволюции является восстановление последовательности коэффициентов отражения (или импульсного отклика $e(t)$) по зарегистрированной сейсмотрассе $x(t)$. Тогда, при

отсутствии помех, оператор фильтра $h(t)$ может быть найден из соотношения

$$e(t) = h(t) \otimes x(t) \text{ или } x(t) = s(t) \otimes h(t) \otimes x(t).$$

При удалении $x(t)$ из обеих частей уравнения получаем следующее:

$$\delta(t) = s(t) \otimes h(t), \quad (1)$$

где $\delta(t)$ представляет дельта-функцию Кронекера.

Выполним дискретное преобразование Фурье (ДПФ) от левой и правой части уравнения (1) и получим

$$\Delta(f) = S(f)H(f).$$

Тогда частотная характеристика фильтра будет иметь вид

$$H(f) = \frac{\Delta(f)}{S(f)}, \quad (2)$$

где $S(f)$ – комплексный спектр сейсмического импульса.

Таким образом, фильтр с данной частотной характеристикой преобразует сейсмический импульс в единичный импульс при $t=0$, а сейсмотрассу – в последовательность единичных импульсов, которая и определяет импульсный отклик разреза. Идеальные обратные фильтры рассчитываются в предположении, что исходной формой сигнала был импульс бесконечно малой длительности (дельта-импульс), а помехи на сейсмограмме отсутствуют. На реальных сейсмограммах подобный фильтр реализовать сложно из-за его неустойчивости даже к низкому уровню случайного шума. Наибольшей устойчивостью к уровню помех при неизвестной форме полезного сигнала обладает минимально-фазовая деконволюция. Ее оператор рассчитывается через автокорреляционную функцию сейсмотрассы в интервале преобладания полезных волн. Неустойчивость обратной фильтрации уменьшается введением параметра регуляризации, однако с его ростом падает и эффект сжатия импульсов. Степень сжатия импульсов деконволюцией зависит от значения сигнал/помеха на сейсмограмме до обработки и степени соответствия форме импульсов минимально-фазовой модели. В том случае, когда ФЧХ сигнала отлична от ФЧХ минимально-фазового сигнала, минимально-фазовая деконволюция не обеспечивает требуемого разрешения на импульсной сейсмотрассе, что приводит к необходимости коррекции фазовых спектров, что выполнить весьма непросто. В то же время, как было показано выше, при определенном выборе начала отсчета и длительности окна анализа, фазовые спектры сейсмических сигналов обладают свойством стационарности, что позволяет построить алгоритмы деконволюции, не требующие коррекции фазовых спектров. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим предложенный нами ранее метод фазочастотного прослеживания сейсмических волн, на основе которого выполняется фазочастотная деконволюция.

Алгоритм фазочастотной деконволюции сейсмических сигналов

Использование априорной информации о стационарности фазовых спектров отраженных волн и их свойствах, определяемых теоремой о временном сдвиге, позволило синтезировать фазочастотные методы прослеживания волн [19], для понимания сути которых остановимся кратко на задачах прослеживания.

Прослеживание сейсмических волн и границ занимает одно из ведущих положений при решении задач структурной сейсморазведки. Основными неизвестными параметрами при прослеживании волн являются моменты их прихода. На основе результатов прослеживания выходных данных осуществляется построение структурных карт и палеопостроения. На практике довольно часто необходимо решать задачи прослеживания волн в условиях их интенсивной интерференции. Такая ситуация наиболее характерна при исследованиях тонкослоистых сред. При этом, как правило, приходится осуществлять прослеживание волн в условиях, когда форма сигналов неизвестна. В этой связи реализуемые алгоритмы прослеживания сейсмических волн должны обладать повышенной разрешающей способностью и позволять надежно осуществлять оценку их кинематических параметров в условиях неполной априорной информации о свойствах выделяемых сигналов. Из приведенных задач следует, что деконволюция сейсмических сигналов является одним из важнейших инструментов для успешного прослеживания волн. Поэтому рассмотрим методы фазочастотного прослеживания волн с позиции решения ими задачи деконволюции.

В общем случае основная идея методов фазочастотного прослеживания состоит в вычислении мгновенных фазовых спектров участков сейсмотрассы в скользящем вдоль трассы окне анализа и формировании на их основе функции правдоподобия (критерий оценки временного положения сигналов) следующего вида [19]:

$$L(t) = \sum_{k=1}^m w(\omega_k) \cos[\varphi(\omega_k, t)], \quad (3)$$

где $w(\omega_k)$ – задаваемая искусственно частотная весовая функция; $\varphi(\omega_k, t)$ – мгновенный фазовый спектр участка трассы, вычисляемый в скользящем окне анализа.

В зависимости от вида $w(\omega_k)$ в (3) можно выделить алгоритмы с равновесной обработкой ($w(\omega_k)$ принимается равной единице во всей полосе частот) и алгоритмы с неравновесной обработкой. Для алгоритма с неравновесной обработкой $w(\omega_k)$ может быть задана с помощью треугольной, синусоидальной или иной функции. Ниже приведен пример треугольной функции $w(\omega_k)$, которая использовалась при дальнейших расчетах:

$$w(\omega) = \frac{4}{3\omega_c} \begin{cases} 0, & \omega \leq \omega_n; \\ \frac{2}{\omega_c} (\omega - \omega_n), & \omega_n < \omega \leq \omega_c; \\ -\frac{1}{\omega_c} (\omega - \omega_b), & \omega_c < \omega \leq \omega_b, \end{cases}$$

где ω_b и ω_n – соответственно верхние и нижние частоты, определяющие $w(\omega)$; ω_c – частота максимума $w(\omega)$. При этом $\omega_c = 2\omega_n$; $\omega_b = 2\omega_c$.

Обратимся теперь к алгоритму фазочастотного прослеживания с равновесной обработкой:

$$L(t) = \sum_{k=1}^m \cos[\varphi(\omega_k, t)], \quad (4)$$

и проведем анализ его функции правдоподобия.

Из выражения (4) следует, что функция правдоподобия является обратным дискретным преобразованием Фурье от результата фильтрации исходного процесса цифровым фильтром с частотной характеристикой вида [19]:

$$H(\omega_k) = \frac{1}{|X(\omega_k)|}, \quad k = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где $|X(\omega_k)|$ – амплитудно-частотная характеристика сейсмотрассы.

Сравнивая выражения (5) и (2) нетрудно показать определенную аналогию между процедурой оценки временного положения сигналов в алгоритме фазочастотного прослеживания и обратной фильтрацией. Действительно, рассмотрим действие фильтра с частотной характеристикой (5). Прежде всего, отметим, что данный фильтр, как и обратный фильтр с частотной характеристикой (2), нормирует к единице амплитудный спектр исследуемого колебания во всей полосе частот. Отличия заключаются в том, что при фазочастотном прослеживании фазовые спектры сейсмических сигналов корректируются автоматически (приводятся к стационарному) путем выполнения дискретного преобразования Фурье в скользящем окне анализа с началом отсчетов, привязанному к центру окна. Таким образом, фазочастотное прослеживание с равновесной обработкой можно рассматривать как фазочастотную деконволюцию. При этом известно [20], что выравнивание амплитудно-частотной характеристики при линейной фазочастотной характеристике приводит к сжатию сигнала, а следовательно, появляется реальная возможность увеличить разрешение сигналов на записи. Кроме того, при реализации фазочастотного прослеживания с неравновесной обработкой (3) с помощью задания весовых коэффициентов $w(\omega_k)$ можно управлять частотной характеристикой обратного фильтра:

$$H(\omega_k) = \frac{w(\omega_k)}{|X(\omega_k)|}, \quad k = \overline{1, m},$$

что позволит дополнительно увеличить разрешение импульсной сейсмотрассы.

Теперь, чтобы убедиться в эффективности предлагаемого алгоритма, приведем результаты вычислительного эксперимента и обработки реальных данных.

Результаты экспериментов

Исследование предложенного алгоритма фазочастотной деконволюции проводилось на модели волнового сейсмического поля с помощью вычислительного эксперимента. При этом рассматривалась модель сейсмограммы, на которой каждая сейсмотрасса формировалась из четырнадцати им-

пульсов с колокольной огибающей, сдвинутых по временной оси на интервал времени, пропорциональный положению 14 горизонтов отражения. На рис. 2 в качестве примера приведена исходная модель волнового поля (рис. 2, а) и результат фазочастотной деконволюции с неравновесной обработкой (рис. 2, б).

Из сравнения рис. 2, а и б видно, что фазочастотная деконволюция позволила выделить все 14 горизонтов отражения, в то время как на исходной модели выделялось не более 10. При этом, что очень важно, местоположение положительных экстремумов после деконволюции (рис. 2, б) точно соответствует местоположению заданных в модели

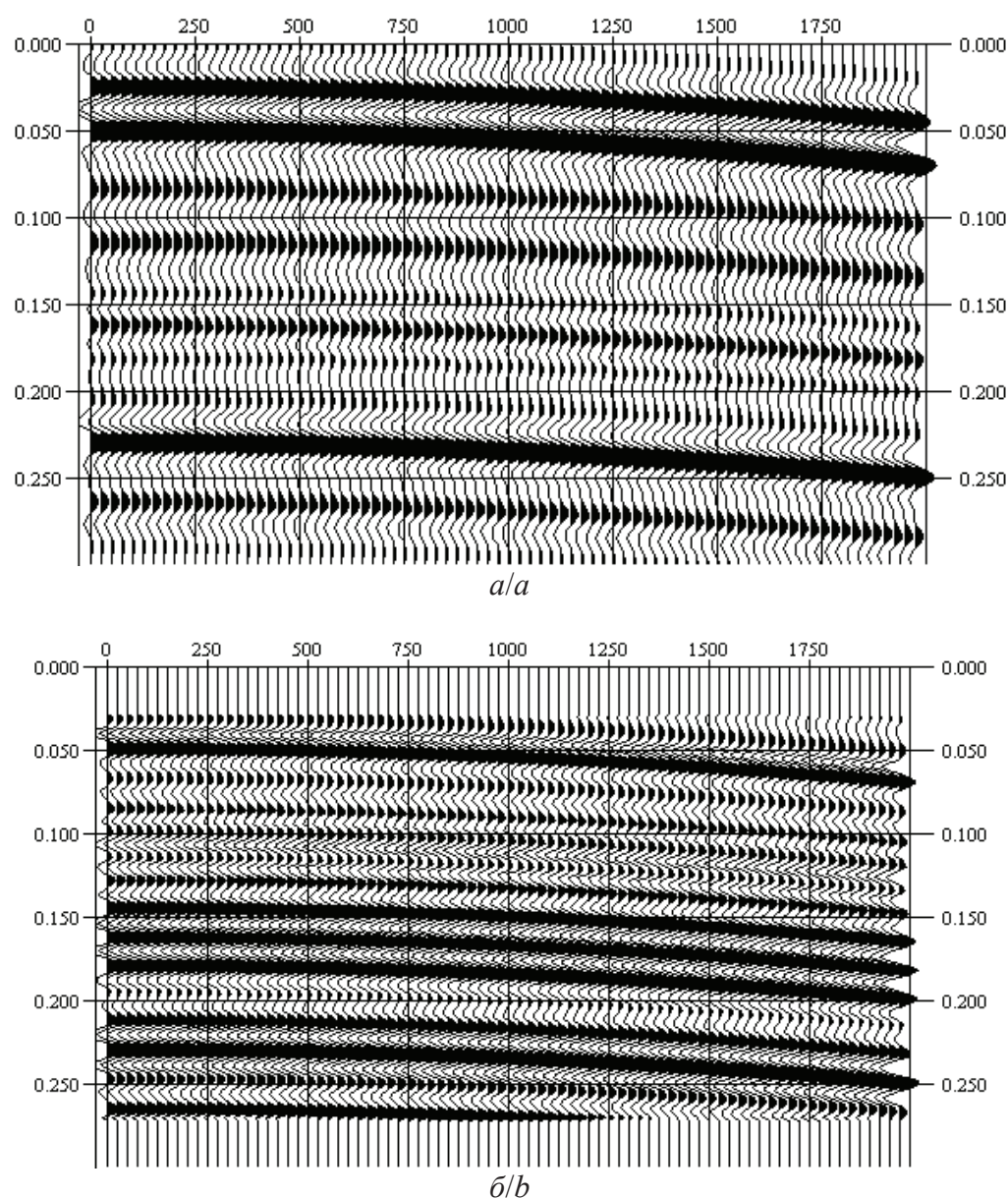


Рис. 2. Модель волнового поля до и после фазочастотной деконволюции: а) исходная модель волнового поля; б) модель после фазочастотной деконволюции

Fig. 2. Model of wave field before and after phase-frequency deconvolution: а) initial model of the wave field; б) model after phase-frequency deconvolution

волн. Оценка схожести выделенных контуров горизонтов отражения методом фазочастотной деконволюции с контурами на исходном разрезе производилась на основе обобщенного критерия качества, рассмотренного в [21] и показала достаточно хорошее совпадение.

Для количественной оценки разрешающей способности фазочастотной деконволюции оценивалась следующая относительная величина:

$$h = \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

где $\lambda = V/f_0$ – длина волны импульса; $\Delta\lambda = \Delta T \cdot V$ – расстояние между интерферируемыми импульсами, м; V – скорость распространения импульса, м/с; f_0 – основная частота импульса, Гц.

Многочисленные эксперименты на моделях волнового поля показали, что предельная разре-

шающая способность предложенной деконволюции составляет порядка четверти длины волны, что является достаточно хорошим результатом. Такое разрешение позволяет на практике получать надежные оценки временного положения сейсмических сигналов при исследовании тонкослоистых геологических сред. Для иллюстрации данного утверждения в следующем разделе работы приведены результаты обработки и интерпретации реальных данных.

Обработка и интерпретация реальных данных

Разработанный алгоритм фазочастотной деконволюции прошел апробацию на сейсмических материалах общей глубинной точки (ОГТ), полученных на ряде нефтяных и газовых месторождений Томской области. В качестве наиболее показательного примера может служить результат фазоча-

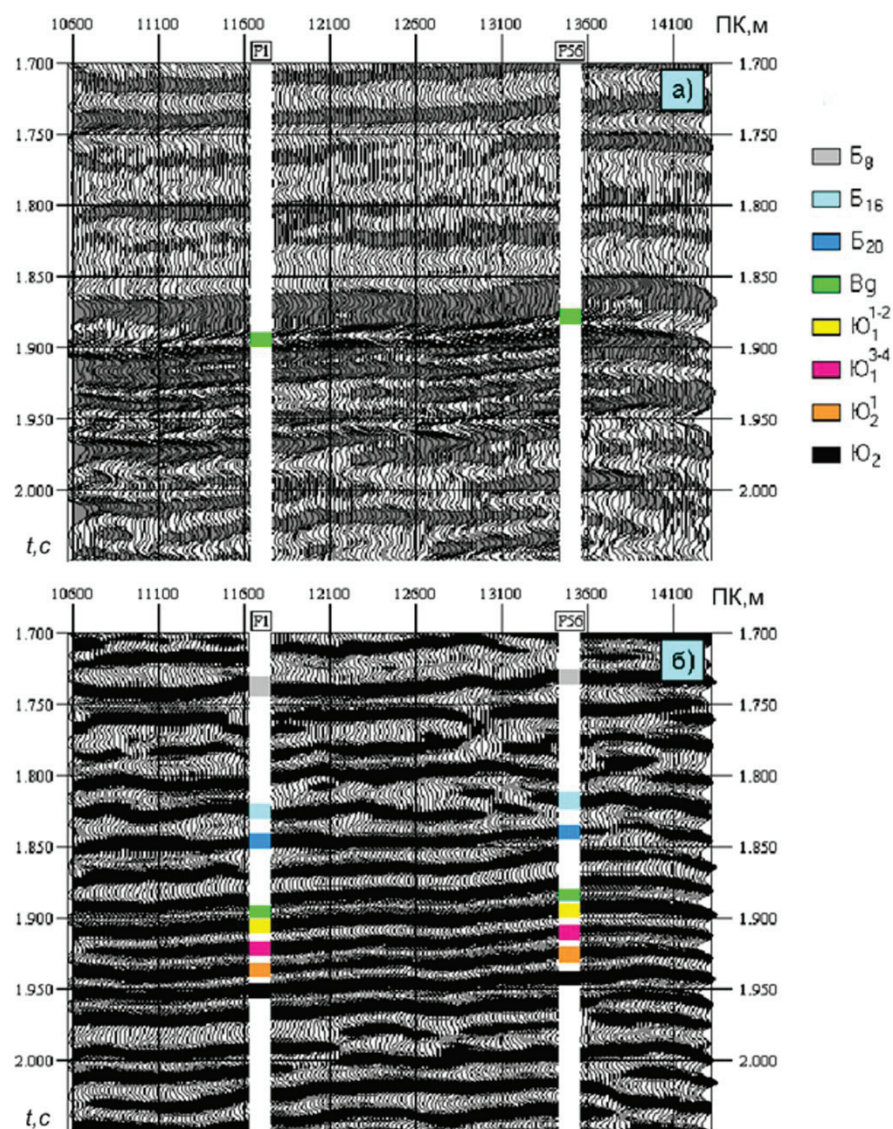


Рис. 3. Фрагменты временных разрезов: а) исходный разрез ОГТ; б) разрез ОГТ после фазочастотной деконволюции

Fig. 3. Fragments of temporary sections: a) general deep point section; б) general deep point section after a phase-frequency deconvolution

стотной деконволюции, полученный для одного из профилей Мыльджинского газоконденсатного месторождения Томской области. На рис. 3 показаны фрагменты исходного разреза ОГТ и результата фазочастотной деконволюции с неравновесной обработкой.

Для анализа полученных результатов необходимо привязать выделенные годографы к основным отражающим горизонтам. С этой целью на рис. 3 отмечены положения меловых (B_8 – B_{20}) и верхнеюрских ($Ю_1^{1-2}$ – $Ю_2$) пластов, а также отмечена подошва Баженовской свиты Bg. Как видно из рис. 3, б, после деконволюции удается выделить все основные отражающие горизонты нижнего мела и верхней юры, при этом хорошо прослеживаются даже самые слабые по интенсивности отражения, которые на исходном разрезе (рис. 3, а) вообще не видны. Также следует отметить, что временное положение выделенных горизонтов точно совпадает со стратиграфической привязкой пластов, выполненной по результатам геофизического исследования скважин, пробуренных на данной площади. Таким образом, приведенный пример обработки реальных материалов подтверждает перспективность применения метода фазочастотной деконволюции для массовой обработки сейсмиче-

ских материалов, в том числе полученных для тонкослоистых геологических сред.

Заключение

Проведенные в работе исследования показали, что предложенные ранее методы фазочастотного прослеживания сейсмических волн могут быть успешно использованы для решения задач импульсной деконволюции. При этом учет особенностей фазовых спектров сейсмических сигналов (наличие области стационарности) в алгоритме фазочастотной деконволюции позволил исключить необходимость коррекции фазовых спектров реальных сейсмических сигналов и обеспечить разрешение импульсов в зоне интерференции до четверти длины волны. Результаты вычислительных экспериментов на моделях волновых полей и обработка реальных данных убеждают в целесообразности включения алгоритма фазочастотной деконволюции в программно-алгоритмические комплексы, используемые в настоящее время для обработки и интерпретации сейсмических данных, получаемых при поиске нефтяных и газовых месторождений.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации ГЗ НАУ-КА № 2.3649.2017/ПЧ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data // *Global Geology*. – 2015. – V. 18 (4). – P. 226–231.
2. Романов В.В. Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ) // *Технологии сейсморазведки*. – 2013. – № 4. – С. 67–73.
3. Станкевич Л.С. Обработка сейсмических разрезов методом динамического сжатия // *Геофизика, геофизическое приборостроение*. – 2015. – № 1 (21). – С. 78–85.
4. Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // *Технологии сейсморазведки*. – 2015. – № 1. – С. 46–56.
5. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria // *Advances in Applied Science Research*. – 2012. – V. 3 (1). – P. 520–529.
6. Сильвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 382 с.
7. Lindberg D.V., More H. Blind Categorical Deconvolution in Two-Level Hidden Markov Models // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – V. 52. – P. 7435–7447.
8. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel Deconvolution of Seismic Signals Using Statistical MCMC Methods // *IEEE Transactions on signal processing*. – 2010. – V. 58. – № 5. – P. 2757–2770.
9. Deconvolution of Seismic Signals in Time and Frequency Domain / Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty // *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition processing and Pattern Recognition*. – 2011. – V. 4. – № 1. – P. 29–47.
10. Optimal Seismic Deconvolution: Distributed Algorithms / K.N. Plataniotis, S.K. Katsikas, D.G. Lainiotis, A.N. Venetsanopoulos // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1998. – V. 36. – P. 779–792.
11. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints // *First break*. – 2004. – V. 22. – P. 47–70.
12. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
13. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы. – М.: Мир, 1988. – Ч. 2. – 360 с.
14. Птецов С.Н. Анализ волновых полей для прогнозирования геологического разреза. – М.: Недра, 1989. – 135 с.
15. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // *Изв. АН СССР. Физика земли*. – 1996. – № 5. – С. 68–77.
16. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis / V.P. Ivanchenkov, O.N. Vylegzhanin, O.V. Orlov, A.I. Kochegurov // *Proc. 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005*. –Novosibirsk, 2005. – V. 1. – P. 159–162.
17. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения околоскважинного пространства // *Нефтяное хозяйство*. – 2015. – № 10. – С. 58–63.
18. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. – М.: Недра, 1972. – 296 с.
19. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2015. – V. 342. – P. 27–36.
20. Карпенко И.В., Тяпкин Ю.К. Способ повышения разрешенности сейсмической записи при линейной зависимости фазового спектра элементарного сигнала от частоты // *Докл. АН УССР*. – 1981. – № 6. – С. 20–23.
21. The results of the investigation of the boaventura and gonzaga integrated performance evaluation method of edge detection based on the two-dimensional renewal stream V.E. Geringer, D.V. Dubinin, A.I. Kochegurov, K. Raif // *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2015): Proc.* – New York: IEEE, 2015. – P. 1–4.

Поступила 26.10.2017 г.

Информация об авторах

Кочегуров А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кочегурова Е.А., кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ильясова И.Э., магистрант кафедры программной инженерии Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Герингер В., кандидат технических наук, заведующий лабораторией автомобильной электроники Баден-Вюртембергского объединенного государственного университета.

Рейф К., доктор философии, профессор Баден-Вюртембергского объединенного государственного университета.

UDC 550.834

PHASE-FREQUENCY DECONVOLUTION OF SEISMIC WAVES

Alexander I. Kochegurov¹,
kaicc@tpu.ru

Elena A. Kochegurova¹,
kocheg@tpu.ru

Ilmira E. Ilyasova¹,
iei1@tpu.ru

Viktor Geringer²,
geringer@dhbw-ravensburg.de

Konrad Reif²,
reif@dhbw-ravensburg.de

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Baden-Wuerttemberg Cooperative State University,
DHBW-Ravensburg, Friedrichshafen, Germany.

Relevance. At present, deconvolution methods are widely used to process data for a variety of applied purposes, such as radio and sonar detection, navigation, hydroacoustics, geophysics, etc. These methods are of great importance in seismic prospecting when searching for oil and gas fields in thin-layered geological environments, where waves reflect from interfaces and interfere with each other thus making it extremely complicated to identify the boundaries of different geological media. The problem becomes even more complicated due to irregular noise in all seismic records. Therefore, to trace the boundaries in thin-layered media, many algorithms for signal compression are used, which are commonly based on deconvolution methods. However, in traditional deconvolution methods phase spectra are neglected and considered to be either minimum-phase or zero-phase spectra. Meanwhile, it is the phase of seismic signals, or rather the complex law of the change in phase spectra, that carries important information on location of reflecting boundaries. Hence, the resolving power of a signal is primarily determined by the complexity of its phase characteristic. Therefore, the development and investigation of the efficiency of a phase-frequency deconvolution algorithm is of great importance for processing and interpreting seismic materials.

The aim of the research is to develop an algorithm for phase-frequency deconvolution on the basis of the method of phase-frequency tracking of seismic waves that was proposed earlier; to analyse the efficiency of this algorithm in models of geological environments; to test the algorithm for processing and interpreting general deep point materials obtained at a number of oil fields in the Tomsk region, Russia.

Methods: digital processing of space-time signals and fields, discrete Fourier transform, mathematical modeling and a computational experiment.

Results. The authors have developed the deconvolution algorithm based on the method of phase-frequency tracking of seismic signals. The algorithm differs from the previous solutions in its capability to analyse instantaneous phase spectra. The paper introduces the characteristic features of the phase spectra that form the basis of the algorithm. Investigations of the algorithm in models of a wave seismic field, as well as experimental processing and interpretation of actual data were carried out. The results obtained confirm the potential of phase-frequency deconvolution to analyse thin-layered geological media.

Key words:

Deconvolution of compression, methods of phase-frequency tracing of seismic signals, models of geological environments, minimum-phase signals.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation ST NAUKA no. 2.3649.2017/PCh.

REFERENCES

1. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data. *Global Geology*, 2015, vol. 18 (4), pp. 226–231.
2. Romanov V.V. Possibilities of increase in resolution of seismographic records of a method of the refracted waves (MPV). *Technologies of seismic exploration*, 2013, no. 4, pp. 67–73. In Rus.
3. Stankevich L.S. Obrabotka seismicheskikh razrezov metodom dinamicheskogo szhatiya [Processing seismic cuts by the method of dynamic compression]. *Geofizika, geofizicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 78–85.
4. Mitrofanov G.M. Homomorphic filtering and deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2015, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
5. Egba J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 520–529.
6. Silvia M.T., Robinson E.A. Obratnaya filtratsiya geofizicheskikh bremennykh ryadov pri razvedke na neft i gaz [The return filtration of seismic signals during oil and gas exploration]. *Geofizika, geofizicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 86–91.

- tion of geophysical temporary ranks at investigation on oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 382 p.
7. Lindberg D.V., More H. Blind Categorical Deconvolution in Two-Level Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 7435–7447.
 8. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel Deconvolution of Seismic Signals Using Statistical MCMC Methods. *IEEE Transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 2757–2770.
 9. Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty. Deconvolution of Seismic Signals in Time and Frequency Domain. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 29–47.
 10. Plataniotis K.N., Katsikas S.K., Lainiotis D.G., Venetsanopoulos A.N. Optimal Seismic Deconvolution: Distributed Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, vol. 36, pp. 779–792.
 11. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 2004, vol. 22, pp. 47–70.
 12. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
 13. Sibert U.M. *Tsepi, signaly, sistemy* [Chains, signals, systems]. Moscow, Mir Publ., 1988. P. 2, 360 p.
 14. Ptetsov S.N. *Analiz volnovykh poley dlya prognozirovaniya geologicheskogo razreza* [Analysis of wave fields for forecasting geological section]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 135 p.
 15. Khudzinskiy L.A. Ob opredelenii nekotorykh parametrov odnorodnykh sloev po ikh fazovym spektralnym kharakteristikam [On determination of some parameters of uniform layers on their phase spectral characteristics]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1996, no. 5, pp. 68–77.
 16. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis. *Proc. 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005*. Novosibirsk, 2005, vol. 1, pp. 159–162.
 17. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Methods of phase-frequency analysis of seismic waves and their application in studying the borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 10, pp. 58–63. In Rus.
 18. Savarensky E.F. *Seysmicheskie volny* [Seismic waves]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 296 p.
 19. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 342, pp. 27–36.
 20. Karpenko I.V., Tyapkin Yu.K. Sposob povysheniya seysmicheskoy zapisi pri lineynoy zavisimosti fazovogo spectra elementarnogo signala ot chastoty [Method of increase in resolution of seismic recording in case of linear dependence of a phase range of an elementary signal from frequency]. *Doklady AN USSR*, 1981, no. 6, pp. 20–23.
 21. Geringer V.E., Dubinin D.V., Kochegurov A.I., Raif K. The results of the investigation of the boaventura and gonzaga integrated performance evaluation method of edge detection based on the two-dimensional renewal stream. *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2015): Proc.* New York, IEEE, 2015. pp. 1–4.

Received: 26 October 2017.

Information about the authors

Alexander I. Kochegurov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena A. Kochegurova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ilmira E. Ilyasova, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor Geringer, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.

Konrad Reif, Ph.D., professor, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.