

УДК 550.8.053

Фазочастотный алгоритм прослеживания сейсмических сигналов с управляемой протяженностью функции качества*

В.П. ИВАНЧЕНКОВ¹, А.И. КОЧЕГУРОВ², НГУЕН СУАН ХУНГ³, О.В. ОРЛОВ⁴

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: am@am.tpu.ru

² 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kaicc@tpu.ru

³ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, аспирант. E-mail: nxh1216@gmail.com

⁴ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: orloff@tpu.ru

В настоящее время при обработке и интерпретации волновых сейсмических полей широко используются динамические параметры волн, связанные с амплитудой и энергией отражений. В значительно меньшей степени используются фазочастотные характеристики (ФЧХ) отраженных волн. Между тем в фазу сейсмических сигналов, а вернее, в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена важная информация о местоположении отражающих границ, типе скоростного разреза, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых сред. На этой основе могут быть синтезированы фазочастотные алгоритмы прослеживания сейсмических данных, позволяющие в условиях априорной неопределенности относительно формы исследуемых волн обнаруживать и разрешать сигналы на фоне интенсивных помех и получать надежные оценки их параметров. Использование ФЧХ отраженных волн оказывается также полезным при решении задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза нефтегазоносности осадочных толщ.

В статье кратко обобщаются результаты разработки и исследования ряда фазочастотных методов анализа сложных волновых полей и предлагается новый фазочастотный алгоритм, в котором за счет введения ограничений на область изменения мгновенных фазовых спектров удастся значительно уменьшить временную протяженность формируемой функции качества в области экстремумов. Приводятся результаты исследования данного алгоритма на моделях волновых полей, подтверждающие его эффективность для разрешения сигналов в зонах интерференции при наличии интенсивных помех.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмический импульс, фазочастотные алгоритмы прослеживания сигналов, функция качества алгоритмов, исследование алгоритма с управляемой протяженностью функции качества

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-59-68

ВВЕДЕНИЕ

Прослеживание сейсмических волн является одной из важных процедур при решении структурных задач сейсморазведки [1–3]. В общей постановке в задачу прослеживания входит обнаружение волн, их идентификация и оценка параметров выделяемых сигналов. Основным параметром, определяемым при прослеживании волн, является время их прихода в различные точки приема.

Не менее важное значение имеет прослеживание волн при решении задач прогноза геологического разреза [4–7]. При решении этих задач требуется проводить как детальное изуче-

* Статья получена 10 июня 2014 г.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках финансирования работ по соглашению 14.575.21.0023.

ние геометрических параметров и формы выделяемых локальных геологических объектов, так осуществлять оценку комплекса кинематических и динамических параметров прослеживаемых сигналов. На практике довольно часто приходится решать задачи прослеживания волн в условиях их интенсивной интерференции. Такая ситуация наиболее характерна при исследованиях тонкослоистых сред, где, как правило, приходится осуществлять прослеживание волн, когда форма выделяемых сигналов неизвестна [8, 9]. В этой связи реализуемые алгоритмы прослеживания волн должны обладать повышенной разрешающей способностью и позволять надежно осуществлять оценку их параметров в условиях неполной априорной информации о свойствах анализируемых сигналов и наличии помех [10–13].

1. АЛГОРИТМЫ ФАЗОЧАСТНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ С РАВНОВЕСНОЙ И НЕРАВНОВЕСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ранее в [14–17] для прослеживаемых фиксированных сейсмических волн были предложены фазочастотные алгоритмы прослеживания (ФЧП) с равновесной и неравновесной обработкой, основанные на определении мгновенных фазовых спектров участков сеймотрасс, выделяемых в некотором перемещающемся окне анализа. В обобщенном случае функция качества (критерий оценки временного положения) для таких алгоритмов может быть представлена в следующем виде:

$$L(\tau) = \sum_{k=1}^m W(f_k) \cos[\varphi(f_k, \tau)], \quad (1)$$

где $W(f_k)$ – заданная частотная весовая функция; $\varphi(f_k, \tau)$ – мгновенный фазовый спектр участка сеймотрассы, вычисляемый в скользящем окне анализа.

Для равновесного алгоритма весовая функция $W(f_k)$ из (1) принимается равной единице во всей анализируемой полосе частот $\Omega = f_B - f_H$, т. е.

$$W(f_k) = \text{rect} \frac{f - f_k}{\Omega},$$

где

$$\text{rect} \frac{f}{\Omega} = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{\Omega}{2} \\ 0, & |f| > \frac{\Omega}{2} \end{cases}. \quad (2)$$

Для алгоритмов с неравновесной обработкой $W(f_k)$ может быть задана в треугольной, синусоидальной и экспоненциальной форме. Определение временного положения сигналов при этом осуществляется путем оценки местоположения экстремумов функции качества (1).

Проведенные исследования предложенных алгоритмов ФЧП на различных моделях волновых полей и их применение для обработки материалов общей глубинной точки (ОГТ) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) показали, что они обладают достаточно высокой помехоустойчивостью, улучшают разрешение волн в области их интенсивной интерференции, позволяют выделять и прослеживать слабые по интенсивности отражения [15–17].

2. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ФАЗОЧАСТОТНОГО АЛГОРИТМА ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ

В данной статье рассматриваются дальнейшие возможности повышения разрешающей способности фазочастотных алгоритмов. Предлагается новый алгоритм, в котором за счет введения ограничений на область изменения мгновенных фазовых спектров при прослеживании сигналов удастся значительно уменьшить временную протяженность экстремумов формируемой функции качества. Приводятся результаты исследования рассматриваемого алгоритма на моделях волновых полей, подтверждающие его эффективность.

Отметим, что проведенный анализ различных моделей сейсмических импульсов однократно отраженных волн показал, что при определенном размере окна анализа и выборе начала отсчета времени при нахождении преобразования Фурье их фазовые спектры в полосе частот, в которой сосредоточена основная энергия сигнала, принимают постоянное значение (область стационарной фазы) [17, 18]. На рис. 1 в качестве примера приведены модель сейсмоимпульса Берлаге, часто используемая для аналитического описания наблюдаемых сигналов, а также его фазовый спектр, определенный в коротком окне анализа.

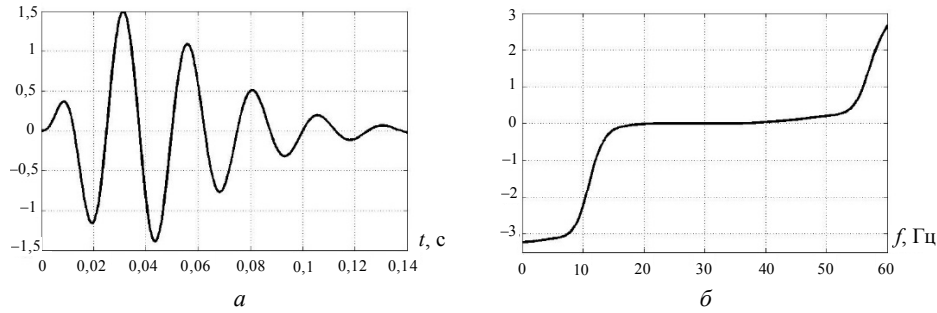


Рис. 1. Эффект стационарности фазового спектра сейсмоимпульса:

a – импульс Берлаге; b – фазовый спектр в коротком окне

При отслеживании волн малое смещение окна анализа на сейсмической записи относительно местоположения сигнала в соответствии с известной теоремой о сдвиге, определяющей одно из свойств преобразования Фурье [19, 20], приводит к изменению мгновенных фазовых спектров, близких к линейным. Наложив ограничения на область изменения мгновенных фазовых спектров в критериях оценки местоположения сигналов (1), можно изменить протяженность функции качества предложенных алгоритмов ФЧП. Исходя из отмеченных предпосылок были введены ограничения на область суммирования мгновенных фазовых спектров в (1) при весовой функции (2) следующие ограничения (рис. 2):

$$a(f) = 2\pi f \frac{T^*}{2} = \pi f T^*, \quad (3)$$

где T^* определяет протяженность функции качества в области возможного местоположения сигнала.

Дополнительно дискриминирующие свойства предложенных ранее алгоритмов ФЧП при разрешении сигналов, очевидно, могут быть также изменены, если вместо функции $\cos[\varphi(f_k, \tau)]$ в (1) ввести некоторые другие функции, которые обладают большей «чувствительностью» к изменению мгновенных фазовых спектров при смещении окна анализа на сейсмической записи. Далее такие функции будем называть фазопреобразующими функциями и обозначать $F[\varphi(f_k, \tau)]$. В связи с ограничениями (3) примем $F[\varphi(f_k, \tau)] = 0$ при $|\varphi(f_k, \tau)| > a(f_k)$.

Очевидно, для любой ограниченной функции $F(x)$ такой, что

$$F(x) = 0 \text{ при } |x| < 1, \quad (4)$$

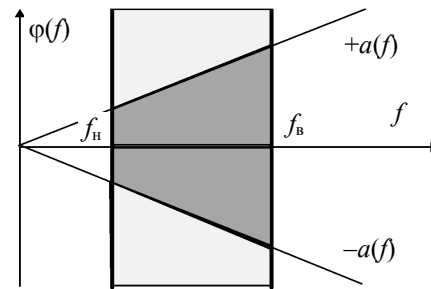


Рис. 2. Область возможных ограничений фазовых спектров сигналов

справедливы соотношения:

$$F\left(\frac{\varphi(f_k, \tau)}{a(f_k)}\right) = 0, \quad |\varphi(f_k, \tau)| > a(f_k). \quad (5)$$

Исходя из этого в качестве фазопреобразующих функций могут быть выбраны любые функции, удовлетворяющие условиям (4) и (5). Так, в качестве такой функции можно взять

$$F(\varphi) = \begin{cases} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\varphi\right)\right]^n, & |\varphi| \leq 1, n > 0 \\ 0, & |\varphi| > 1. \end{cases} \quad (6)$$

При этом функция в качестве предлагаемого алгоритма в общем случае может быть записана

$$L(\tau) = \sum_{k=1}^m F\left(\frac{\varphi(f_k, \tau)}{\pi f T^*}\right). \quad (7)$$

Таким образом, изменяя в (7) величину T^* , можно в определенных пределах управлять размером формируемой функции качества $L(\tau)$ при прослеживании волн и, подбирая соответствующие фазопреобразующие функции, добиться наилучшего разрешения выделяемых сигналов. Далее для краткости изменения по отношению к обычному алгоритму с равновесной обработкой (весовая функция (2)) будем называть предлагаемые алгоритмы модифицированными алгоритмами фазочастотных прослеживаний сигналов.

Следует отметить, что у функций качества алгоритма с равновесной обработкой и модифицированных алгоритмов имеется отличие, заключающееся в том, что фазопреобразующие функции (ФК) вида (4) являются непериодическими. В этой связи в ФК (7) была введена периодичность следующим образом:

$$F\left(\frac{\varphi(f_k, \tau)}{\pi f T^*}\right) = \delta_n F\left(\frac{\bar{\varphi}(f_k, \tau)}{\pi f T^*}\right), \quad (8)$$

где

$$n = \text{round}\left(\frac{\varphi(f_k, \tau)}{\pi}\right),$$

$$\bar{\varphi}(f_k, \tau) = \varphi(f_k, \tau) - n\pi,$$

$$\delta_n = \begin{cases} +1, & n = 2m, m = \pm 0, 1, 2, \dots \\ -1, & n = 2m + 1, \end{cases}$$

round – операция округления.

На рис. 3 показана схема, поясняющая процедуру прослеживания волн в предлагаемом алгоритме. Вдоль выбранной сейсмической трассы перемещается окно анализа, для каждого положения которого определяется мгновенный фазовый спектр выделенного участка трассы. Для заданной фазопреобразующей функции и величины T^* проводится вычисление функции качества (8). После прохождения требуемого интервала сейсмотрассы определяется положение экстремума функции качества и оценивается время прихода сигнала в данную точку приема.

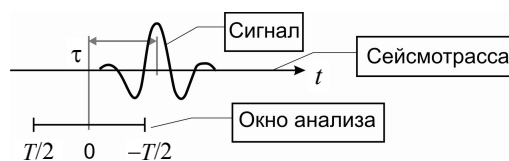


Рис. 3. Схема алгоритма прослеживания

Исследование сравнительной эффективности модифицированного алгоритма проводилось на различных моделях волновых полей. В качестве примера на рис. 4, *а* показана простая модель сейсмоотрассы с двумя импульсами одиноковой формы. На рис. 4, *б* приведена для сравнения функция качества, полученная при отслеживании сигналов алгоритмом ФЧП с равновесной обработкой, а на рис. 4, *в, г* – функции качества, найденные в случае отслеживания данных импульсов модифицированным алгоритмом при двух заданных значениях $T^* = 10$ мс и $T^* = 4$ мс. В модифицированном алгоритме была задана фазопреобразующая функция вида (6).

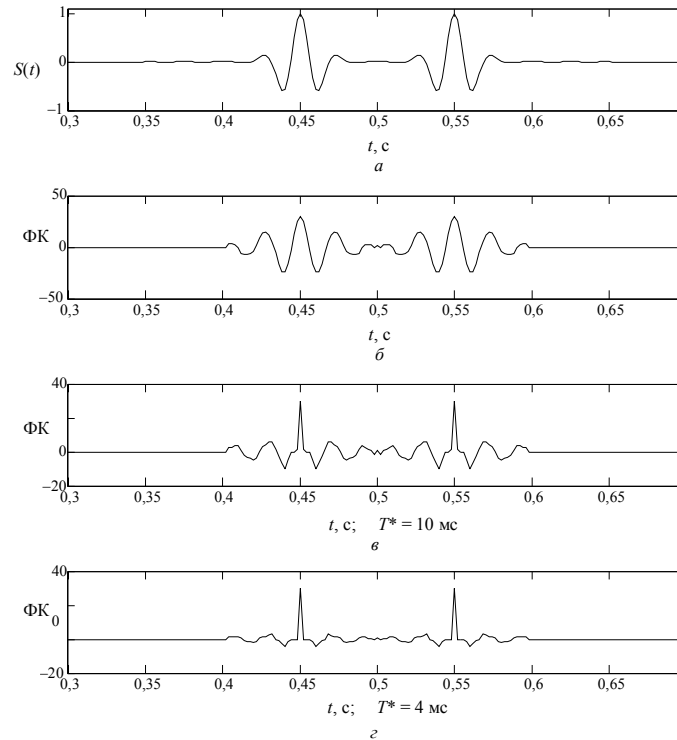


Рис. 4. Отслеживание сейсмических импульсов алгоритмами ФЧП:

а – модель сейсмоотрассы; *б* – функция качества алгоритма с равновесной обработкой; *в, г* – функции качества модифицированного алгоритма при $T^* = 10$ мс (*в*) и $T^* = 4$ мс (*г*)

Из рис. 4 видно, что в области местоположения сигналов функция качества модифицированного алгоритма обладает более узким по протяженности центральным лепестком и меньшими по уровню боковыми лепестками, чем функция качества алгоритма с равновесной обработкой. Причем уменьшение параметра T^* в функции качества модифицированного алгоритма приводит к уменьшению протяженности экстремумов вычисляемых функций качества, что подтверждает возможность повышения разрешения сигналов при их фазочастотном отслеживании.

На рис. 5 и 6 приведены отдельные результаты сравнительного исследования помехоустойчивости различных алгоритмов ФЧП, когда отслеживание сигналов осуществлялось на фоне гауссовых нерегулярных помех.

При этом на рис. 5 приведены графики ошибки смещения $b(\tau)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma(\tau)$ оценки временного положения сигнала от пикового отношения сигнала к шуму ρ для алгоритмов с равновесной и неравновесной обработкой. На рис. 6 даны для сравнения аналогичные зависимости для модифицированного алгоритма ФЧП, функция качества которого определялась при различных значениях параметра T^* . Из них видно, что при принятом интервале дискретизации $\Delta t = 2$ мс формируемых при моделировании реализации смеси сигнала и шума ошибка смещения для алгоритмов с равновесной и неравновесной обработкой не пре-

вышла 1,4 мс, а для модифицированного алгоритма – 0,6 мс. При этом случайная составляющая погрешность оценки временного положения сигнала $\sigma(\tau)$ для всех анализируемых алгоритмов ФЧП (рис. 5, б и 6, б) даже при $\rho = 1$ не превышала 7 мс, что свидетельствует о их достаточно высокой помехоустойчивости. Следует отметить, что предлагаемый алгоритм не уступает по своим характеристикам ранее разработанным алгоритмам ФЧП с равновесной и неравновесной обработкой.

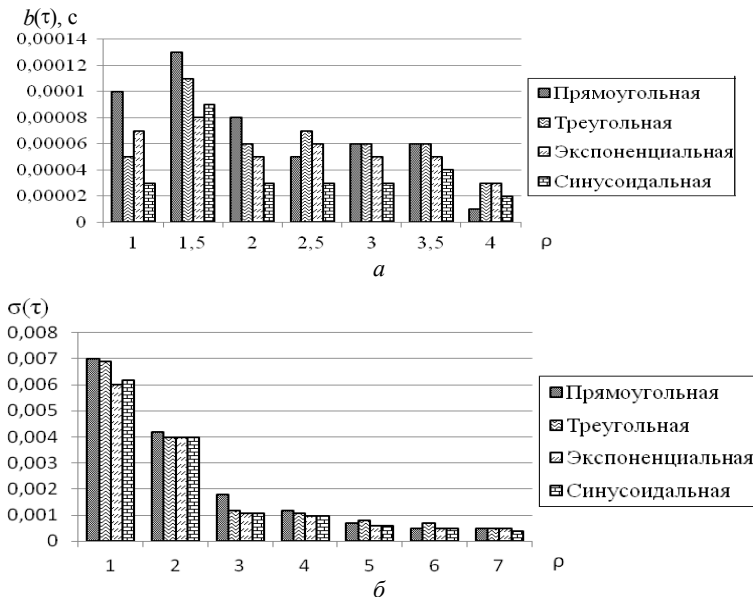


Рис. 5. Результаты исследования помехоустойчивости алгоритмов ФЧП с равновесной и неравновесной обработкой:

a – ошибка смещения; b – среднеквадратичное отклонение

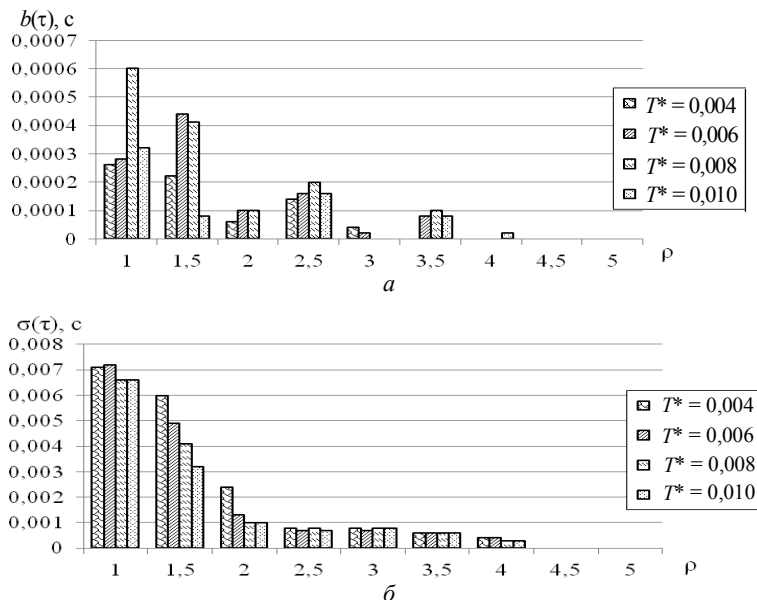


Рис. 6. Результаты исследования помехоустойчивости модифицированного алгоритма ФЧП:

a – ошибка смещения; b – среднеквадратичное отклонение

Как отмечалось выше, повышение разрешающей способности алгоритмов представляется особо важной задачей при выделении и отслеживании волн в условиях их интенсивной интерференции. Исследование разрешающей способности алгоритмов ФЧП приводилось на модели поля, включающей два одинаковых по форме и амплитуде сигнала, временное положение которых целенаправленно изменяется в различных пикетах наблюдения, т. е.

$$S_{\Sigma}^k(t) = S_1\left(t - t_0 + \frac{\Delta T_k}{2}\right) + S_2\left(t - t_0 - \frac{\Delta T_k}{2}\right),$$

где k – номер пикета наблюдения (или номер трассы);
 $\Delta T_k = k \Delta t$, $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ с – шаг дискретизации по времени.

Форма сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$ задавалась импульсом с колокольной огибающей:

$$S(t) = A_0 e^{-\beta^2(t-t_i)^2} \cos[2\pi f_0(t-t_i) + \varphi_0], \quad (9)$$

где A_0 – амплитуда импульса, f_0 – основная частота, φ_0 – начальная фаза.

Для каждого пикета наблюдения проводилось фазочастотное отслеживание сигналов и определялся временной сдвиг между ними Δt , когда еще сигналы разрешались по времени. Величина Δt характеризовала разрешающую способность исследуемого алгоритма ФЧП.

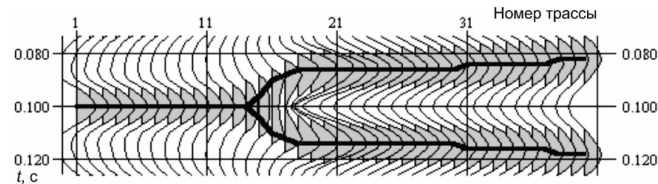


Рис. 7. Модель волнового поля

На рис. 8 приведены графики сравнительной оценки разрешающей способности алгоритмов ФЧП с равновесной и неравновесной обработкой и модифицированного алгоритма, у которого фазопреобразующая функция задавалась вида (6) с параметром $T^* = 8$ мс. Оценка разрешающей способности проводилась для различной основной частоты f_0 выделяемых сигналов (9).

Из графиков видно, что при увеличении частоты f_0 повышается разрешающая способность всех исследуемых алгоритмов ФЧП. При этом наибольшей разрешающей способностью обладает модифицированный алгоритм.

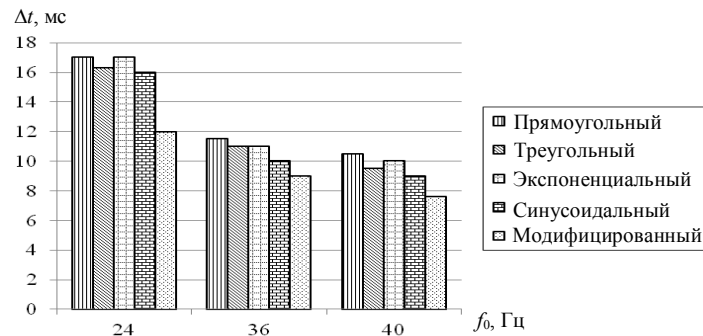


Рис. 8. Оценка разрешающей способности алгоритмов ФЧП с равновесной, неравновесной обработкой и модифицированного алгоритма ФЧП

Изменение разрешающей способности предлагаемого алгоритма ФЧП для двух значений параметра $T^* = 8$ мс и $T^* = 4$ мс приведено на рис. 9.

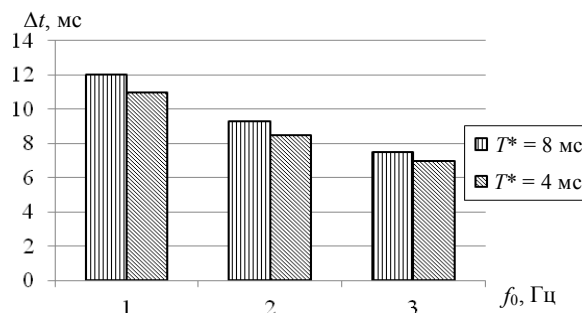


Рис. 9. Оценка разрешающей способности модифицированного алгоритма ФЧП в зависимости от ширины функции качества T^*

Из рис. 9 видно, что уменьшение параметра T^* приводит к увеличению разрешающей способности модифицированного алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали в целом, что модифицированный алгоритм позволяет достичь разрешения порядка 0,3...0,4 видимого периода выделяемых сигналов, что свидетельствует о его повышенной разрешающей способности. Дополнительным достоинством данного алгоритма является возможность управления в определенных пределах его разрешающей способностью в зависимости от задач и сложности сейсмических материалов, подлежащих обработке и интерпретации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 744 с.
2. Кочнев В.А. Адаптивное прослеживание отраженных волн и оценка их параметров по данным многократных систем наблюдения // Геология и геофизика. – 1983. – № 2. – С. 95–103.
3. Кочнев В.А., Антоненко А.В., Игошкин В.П. Использование адаптивных алгоритмов определения статических поправок // Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1988. – Вып. 103. – С. 3–9.
4. Птецов С.Н. Анализ волновых полей для прогнозирования геологического разреза. – М.: Недра, 1989. – 135 с.
5. Gregory A.R. Fluid saturation effect on dynamic elastic properties of sedimentary rocks // Geophysics. – 1976. – Vol. 41, N 5. – P. 895–921. – doi: 10.1190/1.1440671.
6. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке. – М.: Недра, 2007. – 195 с.
7. Трапезникова Н.А. Методика спектральных вариаций для прогнозирования свойств геологического разреза // Геофизика. – 1997. – № 2. – С. 12–16.
8. Дедовская Е.М. О влиянии слоистости среды на форму теоретических сейсмограмм // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. – Вып. 29. – С. 59–67.
9. Авербух А.Г. Разработка прямых методов геофизических работ на нефть и газ в мире. – М.: ВНИИОЭНГ, 1982. – 38 с. – (Обзорная информация. Серия «Нефтегазовая геология и геофизика»; вып. 12 (32)).
10. Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А. Разрешающая способность и параметры всеерной фильтрации при обработке сейсмических волновых полей // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 5. – С. 17–22.
11. Widess M. Quantifying resolving power of seismic systems // Geophysics. – 1982. – Vol. 47, N 8. – P. 1160–1173. – doi: 10.1190/1.1441379.
12. Chen J. Specular ray parameter extraction and stationary-phase migration // Geophysics. – 2004. – Vol. 69, N 1. – P. 249–256. – doi:10.1190/1.1649392.
13. Bansal R., Imhof M. Diffraction enhancement in pre-stack seismic data // Geophysics. – 2005. – Vol. 70, N 3. – P. 73–79. – doi:10.1190/1.1926577.
14. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
15. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсморазведки / В.П. Иванченков, О.Н. Вылегжанин, О.В. Орлов, А.И. Кочегуров, А.А. Козлов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 7. – С. 65–70.

16. Методы фазочастотного отслеживания отраженных волн и их применение в задачах обработки сейсмической информации / В.П. Иванченков, А.И. Кочегуров, Н.А. Купина, О.В. Орлов // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 5–10.
17. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Фазочастотные методы анализа сейсмических сигналов и их применение в задачах прогноза геологического разреза // Сборник трудов Украинского государственного геологоразведочного института. – 2013. – № 4. – С. 79–92.
18. Иванченков В.П., Шлотгауэр В.А. Применение спектральных характеристик для решения некоторых задач автоматической обработки сейсмограмм // Известия вузов. Геология и разведка. – 1977. – № 3. – С. 108–116.
19. Тяпкин Ю.К. Оптимальная линейно-фазовая полосовая фильтрация сейсмических записей // Геология и геофизика. – 1984. – № 3. – С. 99–105.
20. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – М.: Питер, 2006. – 750 с.

Иванченков Виктор Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов и изображений. Автор более 200 научных публикаций и 14 свидетельств на изобретения. E-mail: am@am.tpu.ru

Кочегуров Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета, член-корреспондент Международной академии информатизации. Основное направление научных исследований – теория информации, цифровая обработка пространственно-временных сигналов и изображений волновых полей. Автор более 60 научных публикаций. E-mail: kaicc@tpu.ru

Нгуен Суан Хунг, аспирант Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов и изображений. E-mail: nxhl216@gmail.com

Орлов Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – обработка пространственно-временных сигналов при решении задач сейсморазведки. Автор более 50 научных публикаций. E-mail: orloff@tpu.ru

Phase-frequency algorithm of tracing the seismic response with an adjustable fitness function extent*

V.P. IVANCHENKOV, A.I. KOCHEGUROV, NGUYEN XUAN HUN, O.V. ORLOV

National Research Tomsk Polytechnic University

Presently, dynamic parameters of waves related to the amplitude and energy of reflection are widely used in processing and interpretation of wave seismic fields. Phase-frequency characteristics (PFC) of the reflected waves are used to a far lesser extent. Meanwhile, the phase of seismic responses, in particular a complex pattern of change of their phase spectra includes important information on the location of reflecting boundaries, on the type of a velocity profile, and on the absorbing and dispersion properties of the layered media. This can form the basis for generating phase-frequency algorithms of the seismic data tracking which, under prior uncertainty concerning the forms of the waves on test, allows detecting and resolving signals exposed to high-amplitude noises and receiving reliable estimates of their parameters. Using the phase-frequency characteristics of the reflected waves appears to be also useful in solving the tasks of geological profile forecasts including the forecast of oil and gas content of the sedimentation mass.

The article summarizes the results of research and development of a series of analytical phase-frequency methods of complex wave fields. A new phase-frequency algorithm is proposed which, by imposing restrictions on the range of the instantaneous phase spectrum variation, will make it possible to significantly reduce a time extent of the fitness function formed in the extremes. The research results of the algorithm are given for the models of wave fields confirming its effectiveness for signal resolution in interference areas with high-intensity noises.

Keywords: seismic exploration, seismic pulse, phase-frequency algorithms of signal tracking, algorithm fitness function, algorithm analysis with an adjustable extent of the fitness function

* Received 10 June 2014.

The research was supported by the RF Ministry of Education and Science within the program of financing research studies under agreement 14.575.21.0023.

REFERENCES

1. Boganik G.N., Gurchik I.I. *Seismorazvedka* [Seismic exploration]. – Tver', AIS Publ., 2006. 744 p.
2. Kochnev V.A. *Adaptivnoe proslezhivanie otrazhennykh voln i otsenka ikh parametrov po dannym mnogokratnykh sistem nablyudeniya* [Adaptive tracing of the reflected waves and an assessment of their parameters according to repeated systems of supervision]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1983, no. 2, pp. 95–103.
3. Kochnev V.A., Antonenko A.B., Igoshkin V.P. *Ispol'zovanie adaptivnykh algoritmov opredeleniya staticheskikh poravok* [Use of adaptive algorithms of definition of static amendments]. *Razvedochnaya geofizika* [Prospecting geophysics]. Moscow, 1988, Nedra Publ., iss. 103, pp. 3–9.
4. Pletsov S.N. *Analiz volnovykh polei dlya prognozirovaniya geologicheskogo razreza* [The analysis of wave fields for forecasting of a geological section]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 135 p.
5. Gregory A.R. Fluid saturation effect on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, 1976, vol. 41, no. 5, pp. 895–921. doi: 10.1190/1.1440671
6. Krylov D.N. *Detal'nyi prognoz geologicheskogo razreza v seismorazvedke* [Detailed geological interpretation of seismic data]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 195 p.
7. Trapeznikova N.A. Metodika spektral'nykh variatsii dlya prognozirovaniya svoystv geologicheskogo razreza [Method of spectral variations for forecasting of properties of a geological section]. *Geofizika – Geophysics*, 1997, no. 2, pp. 12–16.
8. Dedovskaya E.M. *O vliyaniy sloistosti sredi na formu teoreticheskikh seismogramm* [About influence of lamination of the environment on a form of theoretical seismographic records]. *Voprosy dinamicheskoi teorii rasprostraneniya seismicheskikh voln* [Questions of the dynamic theory of distribution of seismic waves]. Leningrad, LGU Publ., 1989, vol. 29, pp. 59–67.
9. Averbukh A.G. *Razrabotka pryamykh metodov geofizicheskikh rabot na nef't i gaz v mire. Obzornaya informatsiya. Seriya «Neftegazovaya geologiya i geofizika». Vyp. 12* [Development of direct methods of geophysical works on oil and gas in the world. Survey information. Series: Oil and gas geology and geophysics. Iss. 12]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1982. 38 p.
10. Stepanov D.Y., Yapparova E.A. Stepanov D.Yu., Yapparova E.A. *Razreshayushchaya sposobnost' i parametry veeranoi fil'tratsii pri obrabotke seismicheskikh volnovykh polei* [Fan filtering resolution and parameters at development of seismic wave fields]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 17–22.
11. Widess M. Quantifying resolving power of seismic systems. *Geophysics*, 1982, vol. 47, no. 8, pp. 1160–1173. doi: 10.1190/1.1441379
12. Chen J. Specular ray parameter extraction and stationary-phase migration. *Geophysics*, 2004, vol. 69, no. 1, pp. 249–256. doi: 10.1190/1.1649392
13. Bansal R., Imhof M. Diffraction enhancement in pre-stack seismic data. *Geophysics*, 2005, vol. 70, no. 3, pp. 73–79. doi: 10.1190/1.1926577
14. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I. Definition of temporary provision of seismic signals by estimates of their phase-frequency characteristics. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1988, no. 9, pp. 77–83.
15. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I., Kozlov A.A. *Metody fazochastotnogo analiza volnovykh polei i ikh primeneniye v zadachakh obrabotki dannykh seismorazvedki* [The methods of phase-frequency analysis of wave fields and their application in the problems of seismic prospect in data processing]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 65–70.
16. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Kupina N.A., Orlov O.V. *Metody fazochastotnogo proslezhivaniya otrazhennykh voln i ikh primeneniye v zadachakh obrabotki seismicheskoi informatsii* [Phase-frequency picking of reflection events: method and application to CMP data processing]. *Tekhnologii seismorazvedki – Technology of seismic exploration*, 2013, no. 3, pp. 5–10.
17. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. *Fazochastotnye metody analiza seismicheskikh signalov i ikh primeneniye v zadachakh prognoza geologicheskogo razreza* [Phase-frequency methods of the analysis of seismic signals and their application in tasks of the forecast of a geological section]. *Sbornik trudov Ukrainetskogo gosudarstvennogo geologorazvedochnogo instituta – Collection of works of the Ukrainian state prospecting institute*, 2013, no. 4, pp. 79–92.
18. Ivanchenkov V.P., Shlotgauer V.A. *Primeneniye spektral'nykh kharakteristik dlya resheniya nekotorykh zadach avtomaticheskoi obrabotki seismogramm* [Application of spectral characteristics for the solution of some problems of automatic processing of seismographic records]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka – Bulletin of the higher education institutions. Geology and investigation*, 1977, no. 3, pp. 108–116.
19. Tyapkin Yu.K. *Optimal'naya lineino-fazovaya polosovaya fil'tratsiya seismicheskikh zapisei* [Optimal linear-phase band-pass filtering of seismic]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1984, no. 3, pp. 99–105.
20. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Moscow, Piter Publ., 2006. 750 p.