

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ПИКАМ СПЕКТРОГРАММ ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ S-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Александр Сергеевич Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Антон Витальевич Азаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник, e-mail: antonazv@mail.ru

Александр Викторович Яблоков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник; Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru

Рассматривается задача частотно-временной фильтрации сейсмических данных на основе S-преобразования. S-преобразование обеспечивает частотно-зависимое разрешение, сохраняя при этом прямую связь со спектром Фурье. S-преобразование широко используется при обработке сейсмических данных. Стандартный метод фильтрации на основе S-преобразования основан на его обратимости. С точки зрения временной локализации этот метод не является оптимальным, поскольку вычисление обратного S-преобразования включает в себя усреднение по времени. Мы предлагаем альтернативный метод фильтрации, основанный на восстановлении сигнала по пикам S-преобразования. Фазовый Фурье спектр сигнала восстанавливается с использованием фазы пиков S-преобразования. Получено интегральное уравнение, которое связывает амплитуды пиков S-преобразования и амплитудный Фурье спектр реконструируемого сигнала. Полученное уравнение решается численно, с использованием усеченного сингулярного разложения. Мы получаем как фазу, так и амплитуду сигнала. Таким образом, сигнал может быть извлечен из спектра S-преобразования только по пикам. Мы считаем, что этот подход перспективен с точки зрения максимального использования временного разрешения S-преобразования в ходе частотно-временной фильтрации. Результаты обработки синтетических данных подтверждают перспективность метода.

Ключевые слова: поверхностные волны, дисперсионная кривая, инверсия, искусственная нейронная сеть.

S-TRANSFORM RIDGE FILTERING

Aleksander S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher; Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Anton V. Azarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, e-mail: antonazv@mail.ru

Alexandr V. Yablokov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru

The problem of time-frequency filtering of seismic data on the basis of S-conversion is considered. S-transform provides a frequency-dependent resolution, while maintaining a direct connection with the Fourier spectrum. S-conversion is widely used in seismic processing. The standard filtering method based on S-conversion is based on its reversibility. From the point of view of temporal localization, this method is not optimal, since the calculation of the inverse S-transform includes time averaging. We propose an alternative filtering method based on signal recovery from S-transform peaks.

Key words: surface waves, dispersion curves, inversion, artificial neural network.

Введение

S-преобразование [1] является методом частотно-временного спектрального анализа, который сочетает в себе преимущества непрерывных вейвлет-преобразований (CWT) и преобразований Фурье. Подобно CWT, S-преобразование (ST) обеспечивает адаптивное разрешение время-частота. В отличие от CWT, ST сохраняет прямую связь со спектром Фурье. Для эффективного вычисления ST можно использовать быстрое преобразование Фурье (FFT). Кроме того, ST сохраняет абсолютную фазу каждой локализованной частотной составляющей. Это свойство обеспечивает его обратимость.

ST широко используется в обработке сейсмических данных. Приложения, связанные с задачами частотно-временной фильтрации и подавлением помех рассмотрены в работах [1-3]. В работе [4] решается задача выделения отраженных волн от тонких пластов с использованием обобщенного ST. В исследовании [5] предложен автоматизированный способ обработки пассивных микро-сейсмических данных на основе ST и известного метода выделения порогового значения [6]. В работе [7] модифицированное ST использовано для деконволюции сейсмических сигналов в средах с затуханием. В работе [8] применяют ST-анализ в методе отраженных волн. ST также широко применялся для анализа распространения сейсмических поверхностных волн [9-11].

Стандартный метод фильтрации на основе ST заключается в применении обратного преобразования к обработанному спектру. Исходный частотно-временной спектр умножается на адаптивное частотно-временное окно [12]. Поскольку вычисление обратного ST включает усреднение по времени (см. [1]), рассматриваемый стандартный метод фильтрации не является оптимальным с точки зрения временной локализации сигналов. Другими словами, если ширина временного окна недостаточно велика, например, окно не содержит

«полезную» волну полностью, фильтрация приводит к искажению волновых форм.

Мы предлагаем альтернативный подход фильтрации, направленный на пики амплитудного спектра ST. Как правило, эти пики соответствуют образам «импульсных» сейсмических сигналов, которые часто и представляют интерес во время обработки сейсмических данных. Для таких задач мы и предлагаем метод восстановления сигнала по ST пикам.

Метод

S-преобразование сигнала $h(t)$ задается соотношением:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

S-преобразование (ST) также может быть выражено через спектр Фурье $H(f)$ сигнала $h(t)$:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha. \quad (2)$$

Запишем Фурье и ST спектры через амплитуды и фазы:

$$\begin{aligned} H(f) &= A(f) e^{-i2\pi\varphi(f)}, \\ S(\tau, f) &= B(\tau, f) e^{-i2\pi\beta(\tau, f)}. \end{aligned}$$

ST пиком будем называть функцию $\tau_R(f)$ для которой выполнено: $B(\tau_R(f), f) \geq B(\tau, f)$ для любых τ и f (по крайней мере в некоторой области). Таким образом, получаем две функции частоты: амплитуду и фазу ST пика:

$$B_R(f) = B(\tau_R(f), f), \quad \beta_R(f) = \beta(\tau_R(f), f). \quad (3)$$

Задача состоит в том, чтобы восстановить амплитуду и фазу сигнала по функциям (3). Следуя [13,9], мы подставляем следующую аппроксимацию фазы сигнала:

$$\varphi(\alpha + f) \sim \varphi(f) + \alpha \varphi'(f) \quad (4)$$

в уравнение (2). После проведения очевидных выкладок, получим:

$$\tau_R(f) = \varphi'(f), \quad \varphi(f) = \beta_R(f). \quad (5)$$

Обратите внимание, что приближение (4) становится точным равенством, когда сигнал является симметричным, например, в случае импульса Рикера.

После сокращения фаз в уравнении (2), получаем следующее интегральное уравнение:

$$B_R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} d\alpha. \quad (6)$$

где амплитуда сигнала A является неизвестной функцией. Решаем уравнение (6) численно. Предположим, что неизвестная амплитуда сигнала и амплитуда ST пика равны нулю за пределами некоторого интервала частот:

$$A(f) = 0 \text{ and } B_R(f) = 0 \text{ for } f \notin (f_0, f_{N+1}). \quad (7)$$

Частота дискретизируется внутри этого интервала:

$$f_j = f_0 + j \delta\alpha, \quad \delta\alpha = \frac{f_{N+1} - f_0}{N + 1}, \quad j = 1 \dots N$$

После применения простейших квадратурных формул к интегралу из (6), получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \quad (8)$$

где \mathbf{M} матрица размера $N \times N$ с элементами $M_{kj} = e^{-\frac{2\pi^2(k-j)^2}{k^2}} \delta\alpha$, \mathbf{a} вектор неизвестных: $\mathbf{a}_j = A(f_j)$, вектор из правой части уравнения: $\mathbf{b}_k = B_R(f_k)$. Решение интегрального уравнения является некорректной задачей – матрица \mathbf{M} плохо обусловленная. Следуя [14] мы применяем усеченное сингулярное разложение (TSVD) при решении системы (8).

Пример

Чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого метод ST, мы сгенерировали широкополосный сейсмический «импульсный» сигнал, который показан на рис. 1, *а*. Амплитуда S-преобразования (ST) сигнала представлена на рис. 1, *г*. Второй сигнал, который является «помехой», показан на рис. 1, *б*. ST второго сигнала показан на рис. 1, *д*. Сумма двух сгенерированных сигналов является данными (см. рис. 1, *в*). На амплитудном ST спектре данных, показанных на рис. 1, *е*, наблюдается ST пик, который соответствует изображению первого сигнала. Цель фильтрации состоит в восстановлении сигнала по этому пику. Для восстановления сигнала был выбран интервале частот от 25 до 65 Гц (пик отмечен черной полосой на рис. 1, *е*). Для решения линейной системы (8) методом TSVD были использованы 20 старших сингулярных векторов. Число обусловленности соответствующей матрицы малого ранга около 11,6. Результат восстановления сигнала показан на рис. 2. Восстановленный сигнал показан чер-

ным цветом, он хорошо совпадает с исходным восстанавливаемым сигналом (показа красным), для иллюстрации фильтрации здесь же показаны и данные (серым цветом).

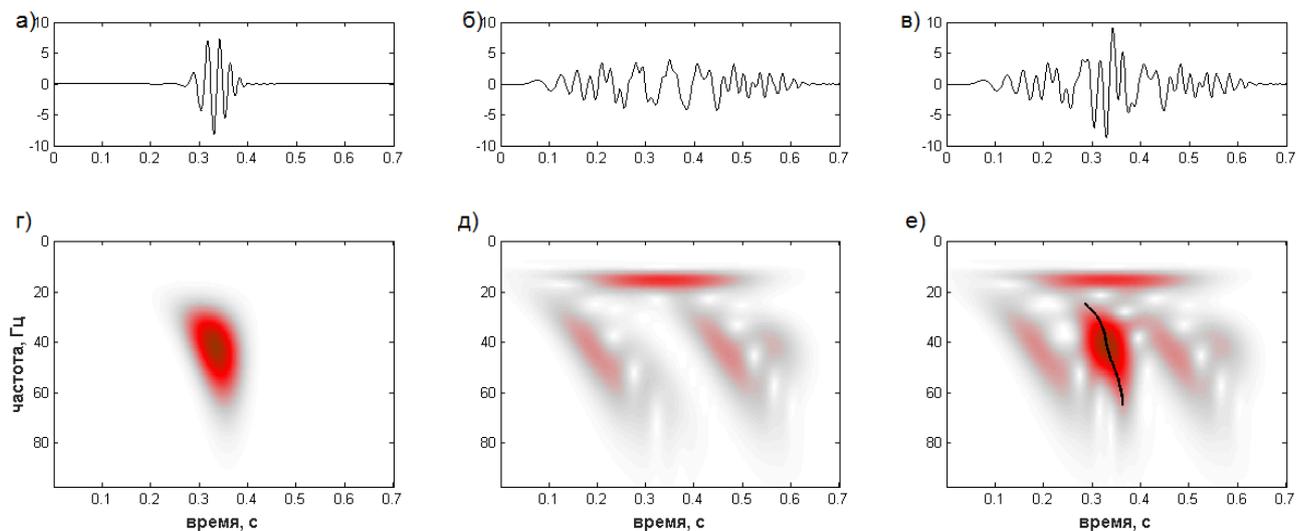


Рис. 1. Синтетические данные и ST спектры

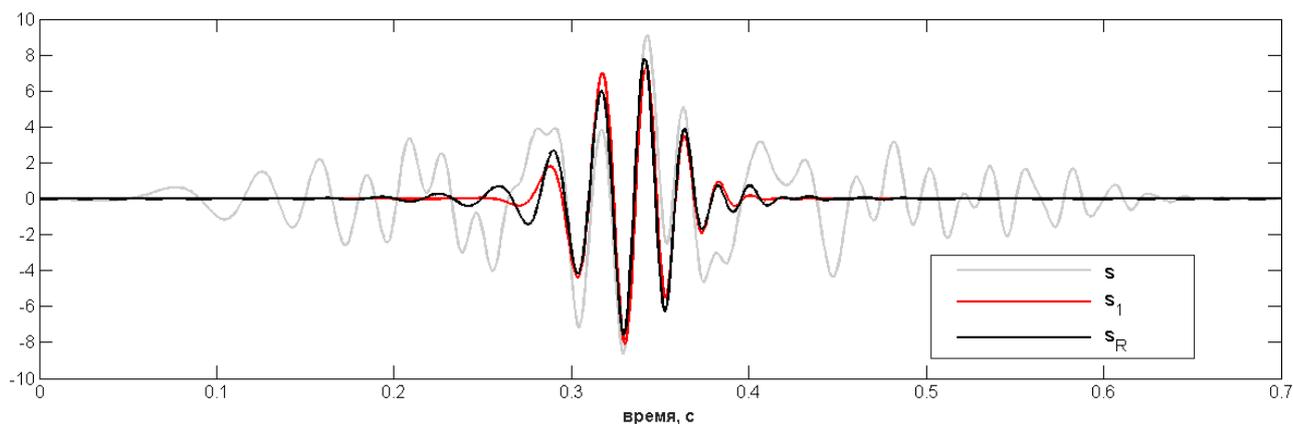


Рис. 2. Результат фильтрации

Заключение

Предложен новый метод частотно-временной фильтрации данных по частоте и времени. Полезный сигнал выделяется по пикам амплитудного спектра, полученного при помощи S-преобразования (ST). Фазовый и амплитудный спектр Фурье «полезного» сигнала реконструируются по выбранному ST пику в выбранном частотном диапазоне. Метод хорошо подходит для извлечения широкополосных сейсмических «импульсных» сигналов, что часто необходимо при обработке сейсмических данных при наличии шума и помех. Работоспособность метода продемонстрирована на синтетических данных.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 18-35-20030.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stockwell R. G., Mansinha L., Lowe R. P. Localization of the complex spectrum: the S transform // *IEEE transactions on signal processing*. – 1996. – Vol. 44. – №. 4. – P. 998-1001.
2. Pinnegar C. R., Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68. – №. 1. – P. 381-385.
3. Pinnegar C. R., Eaton D. W. Application of the S transform to prestack noise attenuation filtering // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2003. – Vol. 108. – №. B9.
4. Askari R., Siahkoochi H. R. Ground roll attenuation using the S and xfk transforms // *Geophysical Prospecting*. – 2008. – Vol. 56. – №. 1. – P. 105-114.
5. Strategy for automated analysis of passive microseismic data based on S-transform, Otsu's thresholding, and higher order statistics / Tselentis, G. A., Martakis, N., Paraskevopoulos, P., Lois, A., & Sokos, E. // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77. – №. 6. – P. KS43-KS54.
6. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. – 1979. – Vol. 9. – №. 1. – P. 62-66.
7. Djeflal A., Pennington W., Askari R. Enhancement of Margrave deconvolution of seismic signals in highly attenuating media using the modified S-transform // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*. – Society of Exploration Geophysicists, 2016. – P. 5198-5202.
8. Li D., Castagna J., Goloshubin G. Investigation of generalized S-transform analysis windows for time-frequency analysis of seismic reflection data Investigation of GST analysis windows // *Geophysics*. – 2016. – Vol. 81. – №. 3. – P. V235-V247.
9. Askari R., Ferguson R. J. Dispersion and the dissipative characteristics of surface waves in the generalized S-transform domain Dispersion and dissipation of surface waves // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77. – №. 1. – P. V11-V20.
10. Askari R., Hejazi S. H. Estimation of surface-wave group velocity using slant stack in the generalized S-transform domain Surface-wave group velocity estimation // *Geophysics*. – 2015. – Vol. 80. – №. 4. – P. EN83-EN92.
11. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data / Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.V., Baranov V.D. // *Geophysics*. – 2019. – Vol. 84. – №. 1. – P. A19-A24.
12. Schimmel M., Gallart J. The inverse S-transform in filters with time-frequency localization // *IEEE Transactions on signal processing*. – 2005. – Vol. 53. – №. 11. – P. 4417-4422
13. Kulesh M. et al. Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms // *Pure and Applied Geophysics*. – 2005. – Vol. 162. – №. 5. – P. 843-855.
14. Hansen P. C. Truncated singular value decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. – 1990. – Vol. 11. – №. 3. – P. 503-518.

© А. С. Сердюков, А. В. Азаров, А. В. Яблоков, 2019