

Д. А. Неклюдов¹✉

Повышение качества данных до суммирования на основе частотно-временных масок в области комплексных вейвлетов

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сейсмические данные, полученные в условиях сложноустроенной верхней части разреза (ВЧР), зачастую характеризуются крайне низким отношением сигнал/шум. Традиционные процедуры локального суммирования, применяемые для подавления помех, приводят к существенной потере высокочастотной составляющей сигнала. В данной работе предложен метод коррекции амплитудных и фазовых спектров исходных данных в области комплексного вейвлет-преобразования. Предложенный подход позволяет сохранить полный частотный состав полезного сигнала, одновременно повышая когерентность целевых отражающих горизонтов.

Ключевые слова: локальное суммирование, комплексные вейвлеты, сейсморазведка

D. A. Neklyudov¹✉

Prestack data enhancement using time-frequency masks in the complex wavelet domain

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Abstract. Seismic data acquired in the complex environments are often very challenging for processing. Although data enhancement procedures based on local stacking mitigate the effects of noise, they result in a significant loss of higher frequencies. We propose a method to correct phase and amplitude spectra of original data in the complex wavelet domain. As a result, the full frequency content remains intact and the coherence of desired reflected events is enhanced.

Keywords: local stacking, complex wavelet transform, seismic exploration

Введение

Данные современной наземной сейсморазведки, регистрируемые одиночными датчиками или малыми группами, нуждаются в существенной предварительной обработке для повышения отношения сигнал/помеха перед переходом к основным процедурам графа обработки, таким как деконволюция и коррекция статики. Эффективным инструментом выделения и усиления слабых когерентных сигналов отраженных волн в сейсмических данных является локальное многомерное суммирование. К настоящему времени разработано множество алгоритмов, базирующихся на этом принципе, например, [1], а также подходы, использующие концепции общей отражающей поверхности (CRS) [2] и мультифокусинга [3]. Все указанные методы, по сути, являются модификациями метода регулируемого направленного

приема (РПП). В их основе лежит введение временных сдвигов в локальных выборках трасс с последующим суммированием, результатом которого является «усиленная» трасса, приписанная к центру апертуры выборки. В данной работе для построения усиленных трасс применяется нелинейный бимформинг (non-linear beamforming, NLBF). Эффективность этого подхода при обработке сложных данных наземной сейсморазведки была продемонстрирована ранее [1]. Несмотря на то, что масштабированное локальное суммирование трасс вдоль оцененных локальных годографов отраженных волн позволяет успешно выделять сигналы на фоне интенсивных помех, результаты такой обработки подвержены нежелательным побочным эффектам: 1) Происходит существенное осреднение исходных амплитуд, 2) Подавляются высокочастотные составляющие спектра из-за неоптимального суммирования. В то же время было показано [4], что бимформинг позволяет получить надежную оценку фазовых спектров (времен вступлений) полезных сигналов. Для сохранения частотных характеристик был предложен метод замещения фаз [5], основанный на комбинировании фазовых спектров трасс после бимформинга с амплитудными спектрами исходных трасс в частотно-временной (TF) области. Такой подход полностью сохраняет исходный частотный состав исходных данных, однако оставляет шум, содержащийся в амплитудном спектре, что при наличии интенсивных помех препятствует достижению необходимого качества данных. В работе [6] было предложено использовать амплитудные частотно-временные маски, как одно из возможных решений этой проблемы. При этом был адаптирован для применения к сейсмическим данным метод минимальной статистики (MS). Частотно-временные маски и MS широко применяются в области обработки речи. Ключевой момент состоит в том, что данные после бимформинга служат исходной моделью сигнала – фаза и оценка снизу амплитудного спектра полезного сигнала, которая в дальнейшем уточняется для получения более достоверной оценки характеристик реального сигнала. В данной работе представлен усовершенствованный подход, развивающий идею комбинирования спектральных характеристик в области комплексного вейвлет-преобразования с предварительной коррекцией фаз на основе фазового фильтра приведения [7].

Метод: коррекция фаз фазовым фильтром приведения + частотно-временные маски в области комплексных вейвлетов.

Ниже приведено детальное описание предлагаемого подхода. Входными данными процедуры являются два набора сейсмических трасс: исходные $x(t)$ и усиленные (после бимформинга) $s(t)$. Обработка выполняется в потрассовом режиме. Каждой исходной трассе соответствует усиленная трасса с идентичными атрибутами (координатами и др.). Задача состоит в извлечении полезного сигнала из исходных данных, при этом результат бимформинга используется в качестве априорной оценки искомого сигнала.

Первый этап – корректировка фаз исходных данных на основе фазового фильтра приведения. Усиленная трасса является эталоном (пилотной трассой), к которому приводится соответствующая ей трасса исходного набора данных.

1. В скользящих временных окнах длиной 300-400 мс вычисляется функция взаимной корреляции (ФВК) двух трасс $CCF = x(t) * s(t)$. Длина расчета ФВК является важным входным параметром (по умолчанию ~50-100 мс).

2. От каждого временного окна и соответствующей ФВК берется преобразование Фурье. Фазовая компонента ФВК имеет вид $Phase = \exp[i\{\varphi_s(\omega) - \varphi_x(\omega)\}]$. Где $\varphi_s(\omega)$ и $\varphi_x(\omega)$ – фазовые спектры усиленной и исходной трассы (окна).

3. Абсолютный спектр $|X(\omega)|$ окна исходной трассы сглаживается фильтром Савицкого — Голея [8].

4. К фурье-образу окна исходной трассы (со сглаженным абс. спектром) применяется фазовый фильтр приведения $Phase = \exp[i\{\varphi_s(\omega) - \varphi_x(\omega)\}]$. При этом происходит приведение фазы исходной трассы к фазе эталонной трассы. Очевидно, что при использовании ФВК, рассчитанной по всему временному окну, это процедура сводится в фазовой подстановке, т.е. замене фазового спектра исходной трассы на фазовый спектр эталона. Зачастую такая замена может оказаться слишком радикальной, поэтому длину расчета ФВК рекомендуется ограничивать.

5. Выполняется обратное преобразование Фурье от приведенной трассы (окна). Процедура повторяется для всех перекрывающихся временных окон. В результате получается скорректированная по фазе исходная трасса $\tilde{x}(t)$. Отметим, что ее амплитудный спектр сохранен.

Второй этап – очистка от помех абсолютного спектра $\tilde{x}(t)$ в области комплексных вейвлетов. Наша конечная цель на этом этапе построить частотно-временную маску (фильтр).

Частотно-временные маски (TFM) широко применяются в области обработки речи для одноканального выделения полезного сигнала из шума. Изначально они были введены в области оконного преобразования Фурье (STFT), но в настоящее время широко применяются и в области вейвлет-преобразований. Общая идея остается неизменной. TFM позволяет получить оценку спектра целевого сигнала $S(k, l)$ в частотно-временной области путем поэлементного перемножения

$$\hat{S}(k, l) = M(k, l) \cdot X(k, l). \quad (1)$$

где фильтр $M(k, l)$, как правило, представляет собой вещественную функцию, принимающую значения в диапазоне $0 \leq M(k, l) \leq 1$. Традиционно маска $M(k, l)$ строится исходя из соотношения сигнал/шум: значения $M(k, l)$ близки к единице в областях доминирования полезного сигнала и стремятся к нулю в зонах преобладания помех. Такие маски принято называть «амплитудными». Одной из наиболее распространенных «мягких» масок является так называемая идеальная рациональная маска (Ideal Ratio Mask, IRM):

$$IRM(k, l) = \sqrt{\frac{|S_{est}(k, l)|^2}{|S_{est}(k, l)|^2 + |N_{est}(k, l)|^2}}, \quad (2)$$

где $|S_{est}(k, l)|^2$ and $|N_{est}(k, l)|^2$ оценки энергетических спектров полезного сигнала и шума соответственно. Для построения IRM необходимо предварительно оценить мощности сигнала и помехи. В задачах обработки речи за последние десятилетия разработано множество подобных алгоритмов. Одним из наиболее востребованных является метод минимальной статистики (minimal statistics, MS), предложенный в работах [9,10] и развитый в [11] и множестве других.

6. К скорректированной по фазе трассе $\tilde{x}(t)$ и усиленной трассе $s(t)$ применяется непрерывное вейвлет-преобразование (CWT). В результате формируются два комплексных спектра $X(k, l)$, $S(k, l)$, где индекс k соответствует масштабу вейвлета, а индекс l — временному сдвигу (положению вейвлета на временной оси)

7. Оценка энергетического спектра остаточной компоненты $|R(k, l)|^2$ вычисляется методом спектрального вычитания в области комплексных вейвлет-коэффициентов $|R(k, l)|^2 = |X(k, l)|^2 - |S(k, l)|^2$.

8. Для оценки энергетического спектра шума $|N_{est}(k, l)|^2$ к остаточной компоненте $|R(k, l)|^2$ применяется метод минимальной статистики (MS). Данная процедура выполняется независимо для каждого масштаба вейвлета k .

9. Повторная оценка энергетического спектра сигнала методом спектрального вычитания $|\check{S}_{est}(k, l)|^2 = |X(k, l)|^2 - |N_{est}(k, l)|^2$.

10. Расчет маски IRM по формуле (2) с использованием полученных оценок энергетических спектров сигнала и шума $|S_{est}(k, l)|^2$ and $|N_{est}(k, l)|^2$. Фильтрация спектра исходной трассы путем наложения маски IRM (выражение (1)).

11. Дополнительно подавление аддитивного шума методом мягкого порогового ограничения (soft thresholding) вейвлет-коэффициентов [12].

12. Восстановление отфильтрованной трассы с помощью обратного непрерывного вейвлет-преобразования (ICWT), $\hat{s}(t) = ICWT[\hat{S}(k, l)]$.

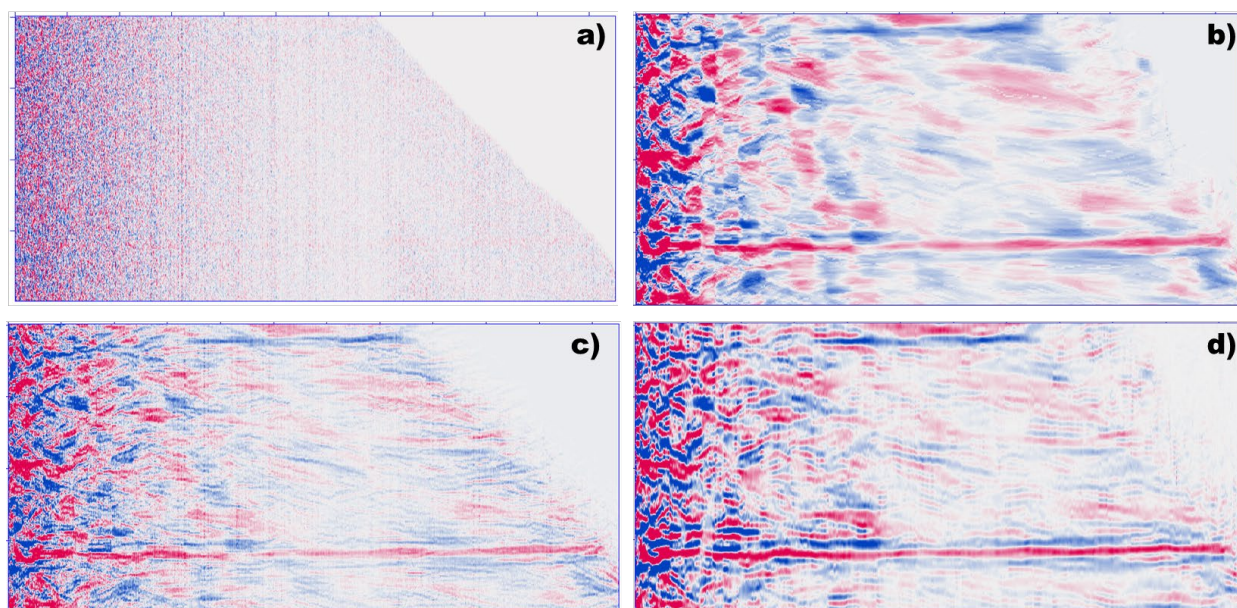


Рис. 1. (а) Исходные данные (фрагмент сейсмограммы ОСТ после NMO); (б) Данные после усиления на основе локального суммирования; (с) данные после применения STFMv1; (д) данные после применения STFMv3 (предлагаемый здесь подход).

Результаты

В данном примере проводится результат применения предложенного подхода на сейсмический данных, зарегистрированных для одиночного датчика (Рис. 1а). Представленный набор данных является весьма сложным, поскольку видимые отражения отсутствуют даже после интенсивной обработки. Для выделения полезного сигнала мы применили нелинейный бимформинг (NLBF) в области "ОГТ—вынос" (Рис.1б). Апертура суммирования составила 100x100 м. Каждая усиленная трасса является результатом суммирования примерно 800 исходных трасс. Локальное суммирование приводит к смещению амплитудного спектра вниз со значительной потерей высоких частот (Рис.2). Для корректировки данных бимформинга мы применили два подхода. Первый (обозначен на рисунках как STFMv1) был предложен ранее [6]. Результат, полученный с помощью описанного в данной работе подхода обозначен как STFMv3. Здесь была выполнена дополнительная фильтрация аддитивного шума с помощью мягкого порогового ограничения вейвлет-коэффициентов. В данном примере это привело к подавлению частот выше 45 Гц, так как отношение сигнал/шум в этом диапазоне оказалось слишком низким. Сравнение временных разрезов ОГТ, полученных по обработанным данным, представлено на Рис.3. Предложенный подход демонстрирует лучшие результаты в сравнении с первой версией, что наглядно подтверждается приведенными разрезами.

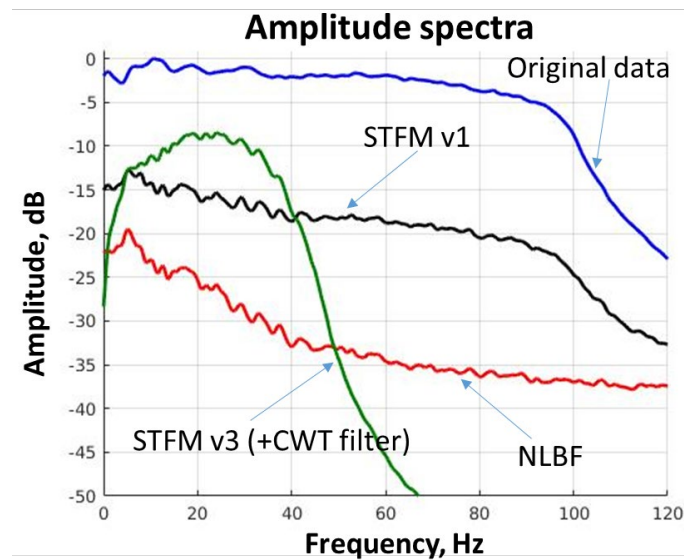


Рис. 2. Усредненные амплитудные спектры данных с Рис.1.

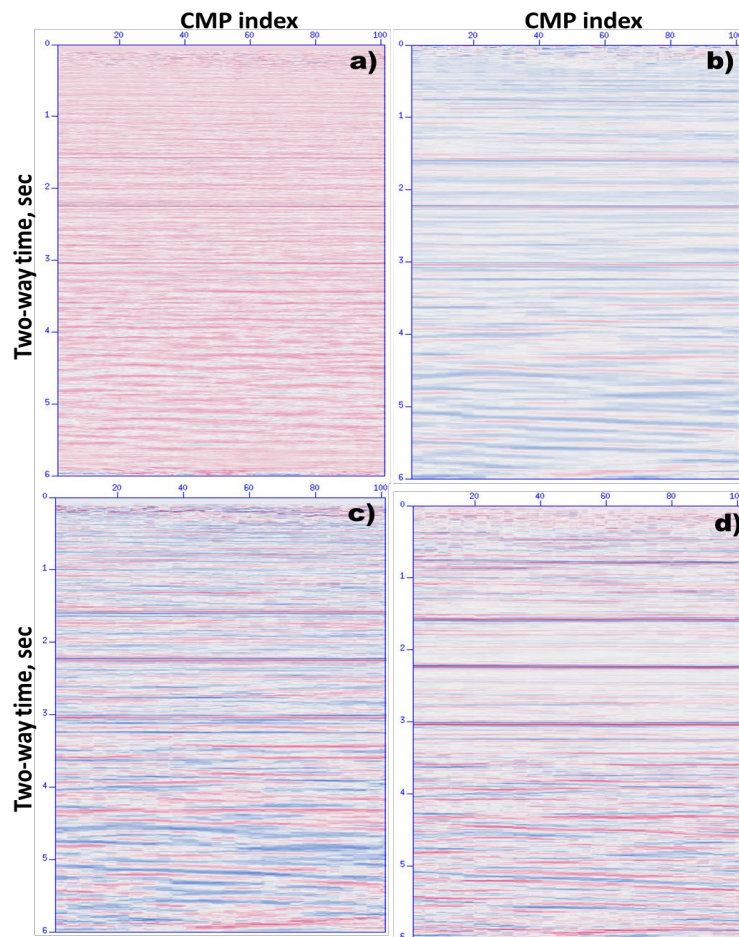


Рис. 3. Фрагменты временных разрезов ОГТ (для визуализации применена автоматическая регулировка усиления (APY) во временном окне 2 с), построенных: (а) по исходным данным; (б) по данным после локального суммирования; (с) после применения STFMv1; (д) после применения STFMv3 (предлагаемый здесь подход).

Заключение

В работе представлен метод коррекции амплитудных и фазовых характеристик сейсмических записей, обладающий достаточной эффективностью для обработки сложных данных наземной сейсморазведки и позволяющий при этом сохранять высокочастотный состав сигнала. Метод основан на использовании локального суммирования трасс для выделения скрытых вступлений отраженных волн. Полученные таким образом данные служат априорной моделью полезного сигнала, на основе которой выполняется коррекция исходных записей с помощью частотно-временных масок в области комплексных вейвлетов. Подчеркивается, что применение адаптивных частотно-зависимых фазовых поправок является критически важным условием для восстановления когерентности отражений. Для подавления аддитивных помех предложены амплитудные маски (TFM), которые строятся на базе результатов бимформинга. Это позволяет избирательно подавлять шум в зонах его доминирования, не искажая при этом области с преобладанием полезного сигнала. Для расчета амплитудной составляющей TFM адаптирован метод минимальной статистики, заимствованный из области обработки речевых сигналов; он обеспечивает достоверную оценку энергетического спектра шума. Эффективность предложенного подхода подтверждена на реальных данных.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bakulin A., Silvestrov I., Dmitriev M., Neklyudov D., Protasov M., Gadylshin K., Dolgov V. Nonlinear beamforming for enhancement of 3D prestack land seismic data // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85, № 3. – P. V283–V296.
2. Buzlukov V., Landa E. Imaging improvement by prestack signal enhancement // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – Vol. 61. – P. 1150–1158.
3. Curia D., Borghi P., Noble J., Berkovitch A., Justo D., Alayón M. The impact of multifocusing in the processing of land 3D seismic data in a fold and thrust belt setting: Ranquil Norte Block, Neuquén Basin, Argentina // *The Leading Edge*. – 2017. – Vol. 36. – P. 770–774.
4. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Multiplicative seismic noise caused by small-scale near-surface scattering and its transformation during stacking // *Geophysics*. – 2022. – Vol. 87, № 5. – P. V419–V435.
5. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Prestack data enhancement with phase corrections in time-frequency domain guided by local multidimensional stacking // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 68. – P. 1811–1818.
6. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Seismic time-frequency masking for suppression of seismic speckle noise // *Geophysics*. – 2023. – Vol. 88, № 5. – P. V371–V385.
7. Каныгин М. Ю., Петрова Н. В. Согласование фазовых спектров сигналов при формировании обобщенных сейсмических проектов // *Технологии сейсморазведки*. – 2009. – № 1. – С. 56–59.
8. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. – 1964. – Vol. 36, № 8. – P. 1627–1639.
9. Martin R. Spectral subtraction based on minimum statistics // *Proc. 7th Eur. Signal Processing Conf. (EUSIPCO'94)*. – Edinburgh, UK, 1994. – P. 1182–1185.

10. Martin R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics // IEEE Transaction on Speech and Audio Processing. – 2001. – Vol. 9. – P. 504–512.
11. Dobliger G. Computationally efficient speech enhancement by spectral minima tracking in subbands // Proc. 4th Eur. Conf. speech, Communication, and Technology, EUROSPEECH'95. – Madrid, Spain, 1995. – P. 1513–1516.
12. Ergen B. Signal and Image Denoising Using Wavelet Transform in Advances // Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology. – 2012. – DOI: 10.5772/36434.

© Д. А. Неклюдов, 2026