

Самонастраивающаяся сигнатурная деконволюция в задаче повышения разрешающей способности сейсмических трасс

DOI 10.24411/2076-6785-2019-10014

М.С. Денисов

д.ф.-м.н. директор по науке
denisovms@gmail.com

ООО «ГЕОЛАБ», Москва, Россия

Современный уровень развития сейсмической разведки и ожидания заказчиков геофизических работ требуют повышения разрешающей способности сейсмических трасс. Это необходимо для получения более детальных картин глубинного строения фрагмента земной коры, а также для повышения точности инверсионных и миграционных преобразований. С этой целью следует расширять диапазон частот сигнала, а также корректировать осложнения формы сейсмического импульса средствами обратной фильтрации. В статье описан оптимизационный способ сигнатурной деконволюции. Оператор обратной фильтрации рассчитывается по заданному сигналу, а затем производится самонастраивающаяся фильтрация исходных данных. Алгоритм является устойчивым в том смысле, что его применение не приводит к росту уровня случайных и регулярных помех. Адаптация реализуется в скользящем окне прямоугольной формы.

Материалы и методы

Исходными материалами являются сейсмические трассы, зарегистрированные в процессе проведения сейсмической разведки, а также оценка формы импульса. Методом обработки является нестационарная самонастраивающаяся обратная фильтрация в скользящем окне.

Ключевые слова

морская сейсморазведка, импульс, адаптация, деконволюция

Введение

При решении практических задач обработки материалов сейсмических наблюдений всегда проводится повышение разрешенности сейсмических трасс. С этой целью применяются различные алгоритмы, которые объединены общим названием: обратная фильтрация или деконволюция. Последний термин, хотя и является калькой англоязычного deconvolution, но прижился в отечественной литературе [1]. Алгоритмы деконволюции принято разделять на статистические и детерминированные. Первые производят оценивание формы сейсмического импульса непосредственно по исходным сейсмограммам. При их построении делаются те или иные предположения о статистических свойствах регистрируемых сигналов. Чаще всего последовательность коэффициентов отражения рассматривается как реализация случайного процесса типа белого шума. Вторые требуют наличия оценки формы импульса, которую можно получить либо непосредственно в процессе возбуждения и регистрации колебаний при помощи специальных измерений, либо теоретически рассчитывать в соответствующем программном обеспечении. Именно этот способ деконволюции, которую также называют сигнатурной деконволюцией или деконволюцией по форме импульса, будет нас интересовать.

Как правило, сигнатурная деконволюция применяется для фильтрации данных, полученных в результате морской сейсморазведки, характеризуемой стабильностью условий возбуждения и регистрации колебаний. Кроме того, наличие относительно надежных способов моделирования импульса морского пневмоисточника [2] способствует популярности этого способа обработки. Впрочем, применение процедуры не ограничивается лишь случаем морских наблюдений, и сигнатурная деконволюция используется также и в наземной сейсморазведке. В частности, известные методики обработки данных вибросейсмических наблюдений, дана вместо корреляции с опорным свип-сигналом производится деконволюция [3], или когда форма импульса извлекается в процессе инверсии [4], и затем обратный фильтр применяется к данным.

Здесь мы акцентируем внимание на проблемах, связанных с морскими наблюдениями, когда рассчитанная сигнатура включает в себя, помимо прочих факторов, волны-спутники со стороны источника и приемника. Наличие спутников, устранение которых является одной из основных целей деконволюции, затрудняет ее использование. Анализируя эту ситуацию, Л. Хаттон и его соавторы [5] приходят к следующему неутешительному выводу: «Волны-спутники – это камень преткновения детерминистической деконволюции. На

первый взгляд кажется, что для подавления волн-спутников достаточно просто рассчитать обратный фильтр и применить его к данным. На самом деле это не так по нескольким причинам.

1. Амплитудный спектр имеет глубокий провал на частоте, определяемой глубиной источника. Полная компенсация такого провала потребует резкого усиления компонента в узком частотном диапазоне.
2. Вариации глубины источника в ходе разведки приводят к смещениям провала в спектре.
3. Возможны также значительные вариации коэффициента отражения водной поверхности, которые зависят от волнении моря и других факторов.

Приведенные соображения способны охладить пыл самого ревностного приверженца детерминистической деконволюции».

Проблема, о которой рассуждают авторы книги, справедливо указывая на недостатки известных методов обработки, известна большинству геофизиков. Не раз попытки применения детерминированной деконволюции терпели неудачу по указанным причинам. В самом деле, настройка фильтра происходит по модельному или измеренному импульсу, а применение этого фильтра производится к реальным сейсмограммам. В последних могут содержаться помехи различной природы, которые невозможно учесть при получении импульса. Фильтр рассчитывается при помощи средств решения обратных задач, тем самым его применение может приводить к неустойчивости. В частности, в приведенной выше цитате указывается на наличие глубоких провалов в спектре исходного импульса, обусловленных волнами-спутниками. Обратный фильтр, стремясь выровнять амплитудный спектр, будет обеспечивать значительный рост энергии соответствующих спектральных компонент. Вполне вероятно, что всегда присутствующие в сейсмограммах случайные и когерентные шумы не имеют провала в спектре на этих частотах, поэтому применение оператора сигнатурной деконволюции приведет к росту помех. Проявление таких помех зачастую носит локальный характер, однако даже из-за небольших некогерентных фрагментов приходится отбраковывать весь результат обработки, который оказался бы востребованным геофизиком.

Способ деконволюции, разработке которого посвящено настоящее исследование, является модификацией традиционного алгоритма, использующего одну форму импульса. При такой реализации не учитываются локальные особенности волнового поля, что может приводить к описанным выше осложнениям. Поэтому на этапе применения фильтра мы будем осуществлять адаптацию, контролируя

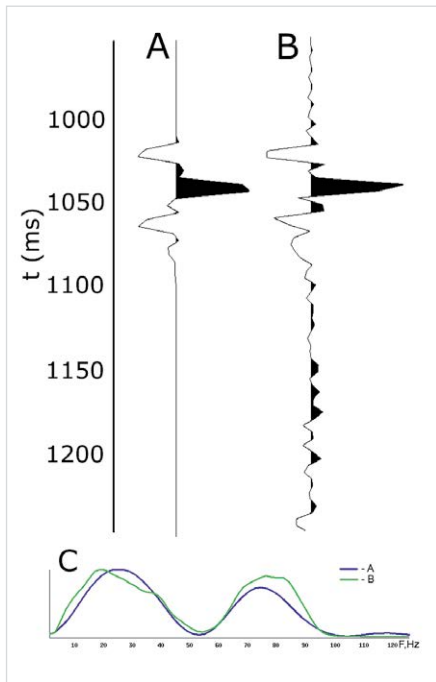


Рис. 1 – Модельный сигнал группового пневмоисточника (A), реальный импульс в сейсмической трассе (B) и их амплитудные спектры (C)

Fig. 1 – Synthetic signal of an air-gun array (A), air-gun signal in the field data (B), and their amplitude spectra (C)

уровень помех, которые не учитывались в процессе настройки фильтра, что повысит устойчивость процедуры. В соответствии с изложенными выше принципами, алгоритм получил название *самонастраивающаяся устойчивая сигнатурная деконволюция*.

Метод

Традиционно задача сигнатурной деконволюции формулируется следующим образом. Пусть имеется оценка формы импульса, которую обозначим через $w(t)$, где t – индекс дискретного времени. Пусть $g(t)$ – желаемый импульс, к которому требуется преобразовать $w(t)$, а $f(t)$ – искомый оператор преобразования. Если в качестве критерия использовать среднеквадратическое отклонение фильтрованного сигнала $w(t) * f(t)$ от желаемого, то приходим к оптимизационной задаче

$$f(t) = \arg \min_{\tilde{f}(t)} \sum_t (w(t) * \tilde{f}(t) - g(t))^2,$$

которая сводится к решению известной системы линейных уравнений с квадратной симметричной матрицей. Звездочка обозначает свертку. Спектральный аналог последнего выражения записывается как

$$F(\omega) = \frac{G(\omega)\overline{W}(\omega)}{|W(\omega)|^2},$$

где ω – круговая частота, а через $W(\omega)$, $F(\omega)$ и $G(\omega)$ соответственно обозначены спектральные характеристики функций $w(t)$, $f(t)$ и $g(t)$. $\overline{W}(\omega)$ – спектр, комплексно сопряженный к $W(\omega)$. При необходимости применения регуляризации вводится соответствующий параметр и используется в виде аддитивной добавки в знаменателе последнего выражения.

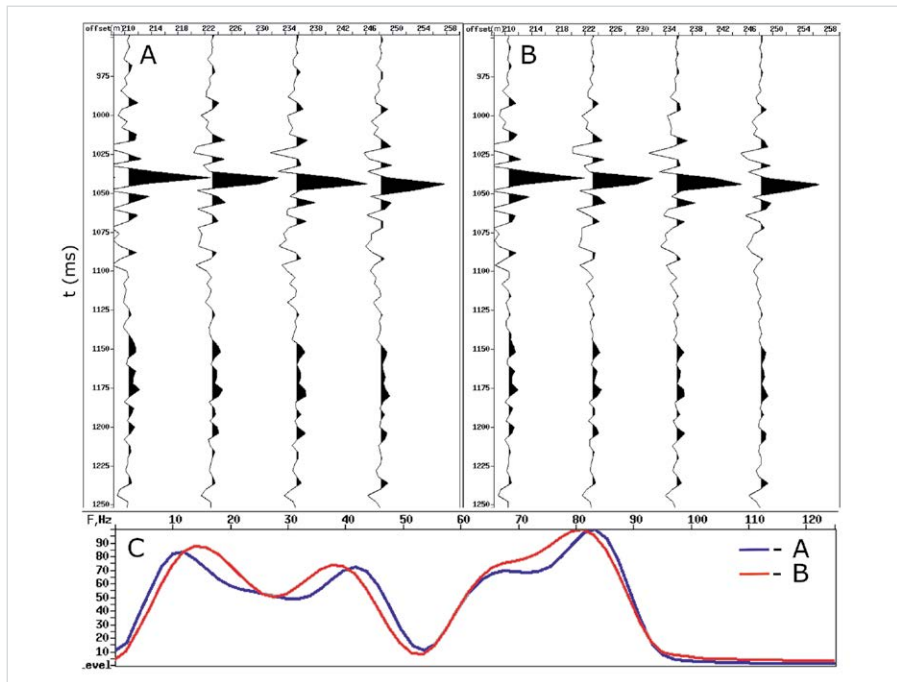


Рис. 2 – Результат применения традиционной сигнатурной деконволюции в окрестности отражения от морского дна с использованием регуляризации 2% (A), 5% (B) и их амплитудные спектры (C)

Fig. 2 – Conventional signature deconvolution results for seabottom reflection with 2% regularization (A), 5% regularization (B), and their amplitude spectra (C)

Целью устойчивой адаптивной сигнатурной деконволюции является дополнительная подстройка оператора к исходному зарегистрированному волновому полю. Для этого используем скользящее пространственно-временное окно прямоугольной формы, в котором будем вычислять оценку амплитудного спектра фрагмента волнового поля $|D(\omega)|$. Решение о наличии или отсутствии помехи, препятствующей получению достоверного результата сигнатурной деконволюции, будем принимать на основании сопоставления характеристик $|W(\omega)|$ и $|D(\omega)|$ на каждой частоте ω в пределах рабочего диапазона (ω_1, ω_2) . Очевидно, что эти характеристики могут отличаться по масштабу, поэтому алгоритм требует предварительного выравнивания коэффициента усиления амплитудных спектров $|W(\omega)|$ и $|D(\omega)|$. С этой целью выбирается диапазон частот (ω_a, ω_b) , в котором по результатам предварительного анализа волнового поля не ожидается появления помех. Вычисляется коэффициент

$$\gamma = \frac{\int_{\omega_a}^{\omega_b} |W(\omega)| d\omega}{\int_{\omega_a}^{\omega_b} |D(\omega)| d\omega},$$

после чего производится нормировка

$$|\tilde{D}(\omega)| = \gamma |D(\omega)|, \omega \in (\omega_1, \omega_2).$$

Расчитанный ранее фильтр $f(t)$ следует скорректировать так, чтобы его применение не усилило помеху. С этой целью используем пороговый алгоритм обнаружения

помехи на каждой частоте в пределах рабочего диапазона. Выбрав величину порога p , производим сравнение: если $|\tilde{D}(\omega)| < p|W(\omega)|$, то помехи нет. В противном случае принимается решение о наличии помехи. Во избежание ее возрастания в результате применения фильтрации модуль спектральной характеристики оператора ограничивается сверху. Таким образом, амплитудный спектр преобразуется в соответствии со следующим правилом:

$$|\tilde{F}(\omega)| = \begin{cases} |F(\omega)|, & \text{если } |\tilde{D}(\omega)| < p|W(\omega)| \\ p|F(\omega)| \frac{|W(\omega)|}{|\tilde{D}(\omega)|}, & \text{если } |\tilde{D}(\omega)| \geq p|W(\omega)| \end{cases}$$

$$\omega \in (\omega_1, \omega_2),$$

при этом фазовый спектр фильтра \tilde{F} совпадает с фазовым спектром фильтра F . Полученная спектральная характеристика \tilde{F} соответствует оператору нестационарной адаптивной устойчивой фильтрации. Более подробную информацию об особенностях фильтра и принципах вывода алгоритма фильтрации читатель может почерпнуть из статьи [6].

Результаты обработки

Продemonстрируем возможности описанного выше метода на примере обработки данных морской сейсморазведки. При проведении наблюдений использовалась буксируемая коса, расположенная на глубине ≈ 15 м. Источник находился на глубине ≈ 14 м. Таким образом, за счет влияния волн-спутников со стороны источника и приемника ожидается наличие провалов в спектральной характеристике сигнала на частотах соответственно ≈ 53 Гц и ≈ 48 Гц.

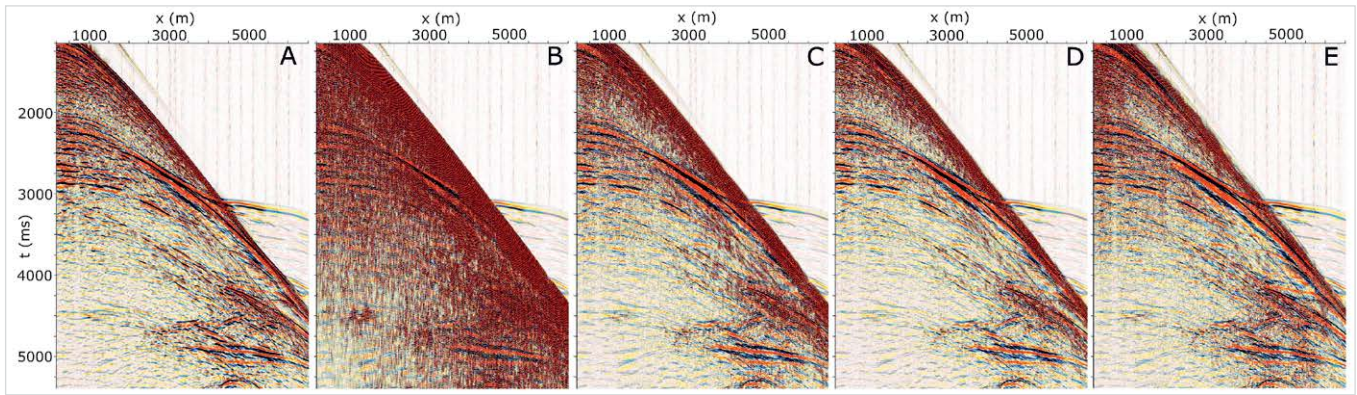


Рис. 3 – Реальная сейсмограмма, полученная в результате морской сейсморазведки. Исходное волновое поле (A), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 0,1% (B), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 2% (C), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 5% (D), после применения устойчивой адаптивной деконволюции (E). Соответствующие амплитудные спектры приведены на рис. 4

Fig. 3 – Marine seismic gathers before signature deconvolution (A), after conventional signature deconvolution with 0,1% regularization (B), after conventional signature deconvolution with 2% regularization (C), after conventional signature deconvolution with 5% regularization (D), after robust non-stationary adaptive signature deconvolution (E). Corresponding amplitude spectra are shown in Figure 4

На рис.1, A показана форма импульса, посчитанного при помощи специального программного обеспечения, а на рис. 1, B – фрагмент ближней к источнику трассы в области отражения от морского дна. Амплитудные спектры этих импульсов представлены на рис. 1, C. Очевидно, что форма теоретического сигнала и его спектр близки к соответствующим характеристикам реального сигнала.

В данном случае сигнал содержит две волны-спутника: со стороны источника и со

стороны приемника. Как правило, для устранения спутников применяют специальные алгоритмы. Однако в данной ситуации мы намеренно нагружаем сигнатурную деконволюцию этой не вполне свойственной ей обязанностью, так как это поможет нам лучше выявить недостатки обычных вычислительных схем и продемонстрировать преимущества описанной выше методики.

Вначале мы применим обычный алгоритм сигнатурной деконволюции с использованием регуляризации. Этот же фрагмент трассы, полученный при регуляризации 2% показан на рис. 2, A, а при регуляризации 5% – на рис. 2, B. Их спектры изображены на рис. 2, C. Очевидно, что использование регуляризации позволяет избежать неконтролируемого разрастания шума на сейсмограмме (такой эффект будет продемонстрирован на рис. 3), однако качество результата деконволюции при этом снижается. Действительно, как следует из рис. 2, амплитудный спектр импульса не выровняется, и сохраняется провал спектральной характеристики в области 48–53 Гц. Результат, полученный с использованием регуляризации 5% больше похож на исходный сигнал, чем на желаемый импульс.

На рис. 3 представлен общий вид этой же сейсмограммы. Исходная сейсмограмма изображена на рис. 3, A. Результаты традиционной сигнатурной деконволюции с применением регуляризации 0,1%, 2% и 5% показаны соответственно на рис. 3, B, C и D. На рис. 3, E показан результат применения устойчивой адаптивной деконволюции. Видно, что на рис. 3, B и C проявляется эффект неконтролируемого разрастания уровня помех, в особенности в области больших удалений источник-приемник. Это объясняется изменением запаздывания волны-спутника относительно первичного импульса за счет увеличения углов входа и выхода луча волны, а также нестабильностью глубины источника и приемника в процессе буксировки (вероятно, имело место волнение моря).

Как было показано на рис. 2, используемый оператор традиционной сигнатурной деконволюции успешно трансформирует исходный импульс в нуль-фазовый сигнал. Но этот же оператор разрушает сигнал в области больших удалений (рис. 3, B и C). Главной причиной этого является нестационарность

импульса, обусловленная, в первую очередь, изменением времени запаздывания волн-спутников. Более того, как следует из рис. 2, спектр импульса имеет провал в окрестности 50 Гц, и обратный фильтр усиливает эти частоты. При наличии в этом диапазоне аддитивного шума, фильтр деконволюции неизбежно будет его усиливать.

С таким усилением помехи призвано справляться наращивание уровня регуляризации, однако это ухудшает результат обратной фильтрации импульса. Как видно из рис. 4, на котором показаны спектры импульсов на больших удалениях, увеличение регуляризации не позволяет выровнять спектр (рис. 4, B, C и D).

Так как сигнал в исходных сейсмограммах нестационарен, его обработка требует применения нестационарной фильтрации. Именно для этих целей была разработана устойчивая адаптивная деконволюция. Применим ее к сейсмограмме, показанной на рис. 3, A. Как следует из полученного волнового поля (рис. 3, E) обеспечивается корректное преобразование импульса на трассах как малых, так и больших удалений. Также видно, что трассы больших удалений свободны от эффекта неконтролируемого разрастания помехи в окрестности провала частотной характеристики сигнала, и амплитудный спектр выровнен. В любой ситуации новый фильтр оказывается более устойчивым, и алгоритм обеспечивает получение более надежных результатов. Эти эффекты наиболее ярко проявляются, когда заметны отличия модельного импульса от реального импульса.

На рис. 4, B отмечается возрастание уровня помехи в области провала частотной характеристики импульса. Использование устойчивого оператора позволяет устранить этот эффект (рис. 4, E).

Выводы

Неустойчивость традиционной сигнатурной деконволюции общеизвестна и является главной проблемой, с которой сталкивается геофизик-обработчик при попытке применить этот алгоритм для решения практических задач обработки сейсмических данных. Оператор деконволюции рассчитывается на основании некоторого

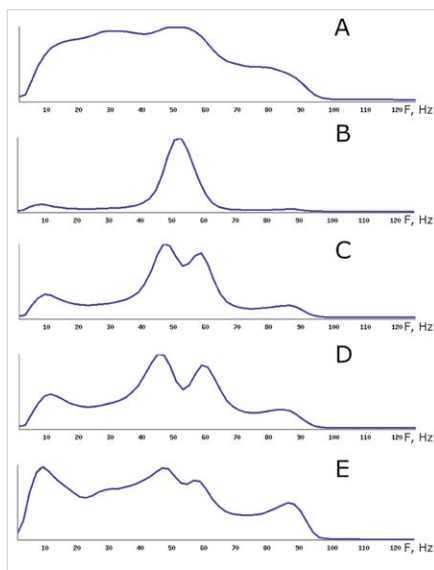


Рис. 4 – Амплитудные спектры, полученные по исходной сейсмограмме (A), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 0,1% (B), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 2% (C), после применения традиционной сигнатурной деконволюции с регуляризацией 5% (D), после применения устойчивой адаптивной деконволюции (E)

Fig. 4 – Amplitude spectra before signature deconvolution (A), after conventional signature deconvolution with 0,1% regularization (B), after conventional signature deconvolution with 2% regularization (C), after conventional signature deconvolution with 5% regularization (D), after robust non-stationary adaptive signature deconvolution (E)

модельного сигнала, имеющего единую форму для всех трасс. Таким фильтром затем обрабатываются все сейсмограммы без учета реальных локальных изменений импульса. Это приводит к появлению помех, и возрастание их уровня не может контролироваться в процессе деконволюции.

С целью достижения устойчивости алгоритма предложен нестационарный самонастраивающийся фильтр, обладающий возможностью локального (в пределах скользящего пространственно-временного окна) обнаружения помех на каждой частоте в пределах рабочего диапазона с последующей регулировкой усиления на этой частоте. Такой подход позволяет успешно применять желаемый оператор деконволюции там, где это не приводит к росту амплитуды помех, и контролировать уровень шума в тех областях, где возможно его усиление. Эта особенность выгодно отличает его от традиционной сигнатурной деконволюции, когда устойчивость решения достигается наращиванием

уровня регуляризации. Если сейсмограмма характеризуется низким уровнем помех, то результат устойчивой адаптивной деконволюции совпадает с результатом традиционной обработки.

Предложенный алгоритм является локально-адаптивным в том смысле, что амплитудный спектр оператора деконволюции рассчитывается с учетом отношения сигнал/шум в каждом локальном фрагменте сейсмограммы. При этом фазовый спектр оператора не изменяется и на всей сейсмограмме остается согласованным с фазовой характеристикой сигнатуры. Такая особенность метода позволяет получать сигнал с наилучшей разрешающей способностью, при этом не увеличивая уровень шума.

Литература

1. Череповский А.В. *Англо-русский и русско-английский словарь по прикладной геофизике*. М.: Академия горных наук, 1997. 478 с.

2. Ziolkowski A., Parkes G.E., Hatton L., Haugland T. The signature of an air gun array: computation from near-field measurements including interactions // *Geophysics*, 1982, V.47, issue 10, pp. 1413–1421.
3. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М. Корреляция или деконволюция виброграмм — что лучше? // *ВСП и трехмерные системы наблюдений в сейсморазведке: Гальперинские чтения-2005*. М.: Geovers, 2005. С. 44–47.
4. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии // *Технологии сейсморазведки*. 2009. №4. С. 3–16.
5. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. *Обработка сейсмических данных. Теория и практика*. М.: Мир, 1989. 216 с.
6. Денисов М.С. *Алгоритм устойчивой адаптивной сигнатурной деконволюции* // *Технологии сейсморазведки*. 2017. №1. С. 48–55.

Adaptive signature deconvolution in the problem of increasing the resolution of seismic traces

Author

Mikhail S. Denisov — Sc.D., R&D Director; denisovms@gmail.com

“GEOLAB” LLC, Moscow, Russian Federation

Abstract

The current level of seismic exploration and the expectations of geophysical customers require an increase in the seismic resolution. This is necessary to obtain more detailed depth images of a fragment of the earth's crust are to be obtained, as well as the accuracy of inversion and migration transformations is to be improved. For this purpose, the frequency range of the signal should be extended, and the complications of the seismic wavelet shape should be corrected by means of inverse filtering. The paper describes the signature deconvolution optimization method. The inverse filtering operator is calculated from a known signal, and then adaptive filtering of the input data is performed. The algorithm is robust in the sense that it does not lead to an increase of the random and the regular noise. Adaptation is applied in a sliding rectangular window.

Materials and methods

The source materials are the seismic traces recorded during seismic surveys and the source signature. The processing method is non-stationary adaptive deconvolution in a sliding window.

Keywords

marine seismic, wavelet, adaptation, deconvolution

Results

An adaptive non-stationary robust signature deconvolution method is proposed. The efficiency of the algorithm is proved by the results of a marine real dataset processing. The new method will be an alternative data processing scheme that replenish the arsenal of deconvolution tools for a geophysicist. The parameters of the procedure are such that a simple choice of a deliberately large threshold value transforms the algorithm into the conventional and well known signature deconvolution.

Conclusions

Instability of the signature deconvolution can be considered one of its main problems. The signature deconvolution operator is designed using only the estimated source signature. It is then applied to the seismic gathers that may be contaminated by noise. As the operator does not take into account the existence of noise, the noise may be amplified as a result of such deconvolution. To deal with that problem, we introduce a data-driven component into the commonly deterministic signature deconvolution algorithm. To ensure the signature deconvolution is stable, we propose a self-tuning filter that is capable of detecting noise for a given frequency in a sliding window and modifying the amplitude spectrum of a deconvolution operator for that frequency. This approach makes it possible to obtain the sought-for deconvolution result for noiseless data windows and limit noise amplification for noisy parts of the data, which we prove using a real marine dataset.

References

1. Cherepovskiy A.V. *Anglo-russkiy i russko-angliyskiy slovar' po prikladnoy geofizike* [English-Russian and Russian-English dictionary of exploration geophysics]. Moscow: Academy of mining sciences, 1997, 478 p.
2. Ziolkowski A., Parkes G.E., Hatton L., Haugland T. The signature of an air gun array: computation from near-field measurements including interactions // *Geophysics*, 1982, V.47, issue 10, pp. 1413–1421.
3. Shekhtman G.A., Kuznetsov V.M. *Korrelyatsiya ili dekonvolutsiya vibrogramm – chto luchshe?* [Correlation or deconvolution of vibrograms – what is better?] VSP and 3D seismic acquisition systems: Galperin readings-2005. M.: Geovers, 2005. p. 44–47.
4. Ampilov Y.P., Barkov A.Y., Yakovlev I.V., Filippova K.E., Priezhev I.I. *Pochti vse o seismicheskoy inversii* [Almost everything about seismic inversion] // *Seismic technology*, 2009, issue 4, pp. 3–16.
5. Hatton L., Worthington M., Makin J. *Seismic data processing. Theory and practice*. Oxford: Blackwell Scientific, 1986. 177 p.
6. Denisov M.S. *Algoritm ustoychivoy adaptivnoy signaturnoy dekonvolutsii* [Stable adaptive signature deconvolution] // *Seismic technology*, 2017, issue 1, pp. 48–55.