



КАКУЮ ЗАДАЧУ И КАК РЕШАЕТ АЛГОРИТМ ПРЕДСКАЗЫВАЮЩЕЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ С ЕДИНИЧНЫМ ИНТЕРВАЛОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Михаил Сергеевич Денисов

ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия

denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с обратной фильтрацией сейсмических записей. Показано, что традиционное обоснование деконволюции сжатия корректно только в случае минимально-фазового импульса. Для смешанно-фазового и неполночастотного импульса деконволюция решает задачу расширения амплитудного спектра в пределах рабочей полосы частот, причем это производится средствами авторегрессионного спектрального оценивания.

Ключевые слова: деконволюция, импульс, разрешающая способность, спектральное оценивание

Благодарности: автор благодарит В.С. Серебрякова (ООО «ГЕОЛАБ») за помощь в подготовке графических материалов.

Для цитирования: Денисов М.С. Какую задачу и как решает алгоритм предсказывающей деконволюции с единичным интервалом прогнозирования // Геофизические технологии. 2025. № 1. С. 23–42. doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.

WHAT PROBLEM AND HOW DOES THE SPIKING DECONVOLUTION ALGORITHM SOLVE

Mikhail S. Denisov

GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

Abstract. Some aspects of seismic deconvolution are considered. It is shown that the traditional justification of spiking deconvolution is correct only for a minimum-phase wavelet. For a mixed-phase and band-limited wavelet deconvolution solves the problem of expanding the amplitude spectrum within the signal frequency band, and this is achieved by means of autoregressive spectrum estimation.

Keywords: deconvolution, wavelet, resolution ability, spectrum estimation

Acknowledgments: the author thanks V.S. Serebryakov (GEOLAB Ltd) for assistance in preparing the figures.

For citation: Denisov M.S. What problem and how does the spiking deconvolution algorithm solve // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 1. P. 23–42. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.

ВВЕДЕНИЕ

Различные методики обратной фильтрации широко применяются при решении практических задач обработки данных сейсморазведки. Традиционная одномерная модель сейсмической трассы записывается в виде свертки последовательности коэффициентов отражения (также называемой импульсной трассой) с сейсмическим импульсом. Желаемым результатом обработки является именно последовательность коэффициентов отражения. Наличие импульса снижает временную разрешенность

записи, приводя к эффектам интерференции. Поэтому в данной ситуации импульс оказывается своеобразной помехой, которую следует устранить. Эту задачу призваны решать методы обратной фильтрации. Почти вся терминология, относящаяся к интересующей нас задаче, заимствована из англоязычной литературы. Так, если наблюдаемая трасса в одномерной модели является сверткой, по-английски *convolution*, последовательности коэффициентов отражения с импульсом, то процесс восстановления коэффициентов отражения реализуется как обратная свертка или *deconvolution* – *деконволюция*. Таким образом, *обратная фильтрация* и *деконволюция* – синонимы.

Известны две стратегии деконволюции, нацеленные на коррекцию сигнала [Робинсон, 1984]. В первой, детерминистической, на вход алгоритма поступает оценка формы импульса, по которой рассчитывается обратный фильтр. Затем этот фильтр применяется к исходной трассе. Во второй, статистической, импульс оценивается непосредственно по поступающим на вход алгоритма данным. После этого рассчитывается обратный фильтр и применяется к трассе. Очень часто такая последовательность действий реализуется неявно, и из нее непросто выделить эти этапы решения задачи. В статистическом алгоритме предсказывающей деконволюции с единичным интервалом прогноза вначале оценивается автокорреляционная функция (АКФ) трассы, после чего она используется для получения фильтра прогнозирования и соответствующего ему фильтра ошибки прогнозирования. Такие процедуры фактически реализуют оценивание формы импульса, при этом привлекается гипотеза о том, что он является минимально-фазовой дискретной функцией. (Ниже будут приведены два из нескольких необходимых и достаточных условий минимально-фазовости дискретной функции. Более подробно ознакомиться со свойствами и особенностями этих функций можно, например, в книге [Шерифф, Гелдарт, 1987].) Считается, что применение фильтрации ошибки предсказания удаляет все отсчеты импульса, кроме первого, или, что то же самое, отсчета нулевого момента времени. Таким образом, коррекция сигнала производится при помощи его сжатия до одного отсчета. Этим же фильтром устраняются кратные волны, волны-спутники, а также вторичные пульсации воздушного пузыря в морской сейсморазведке. В англоязычных источниках этот статистический алгоритм называют *spiking deconvolution*, от слова *spike* – предельно короткий импульс, он же – дельта-функция. Здесь, сделав все необходимые оговорки, будем называть алгоритм деконволюцией сжатия сигнала или просто деконволюцией сжатия (ДС). Изучению особенностей этого общеизвестного и хорошо зарекомендовавшего себя при решении практических задач обработки алгоритма посвящена настоящая работа.

МОДЕЛЬ

Все алгоритмы деконволюции так или иначе основаны на одномерной сверточной модели сейсмической трассы $z(t)$:

$$z(t) = w(t) * \xi(t), \quad (1)$$

где $w(t)$ – сейсмический импульс, $\xi(t)$ – последовательность коэффициентов отражения, t – индекс дискретного времени, звездочка обозначает свертку. Для простоты модель записана без учета аддитивной помехи. Если помимо сжатия импульса также решается задача подавления кратных волн, волн-спутников и вторичных пульсаций, то эти факторы включаются в $w(t)$. Относительно $\xi(t)$ делается предположение, что это реализация дискретного стационарного эргодического случайного процесса типа белого шума, состоящая из набора импульсов (дельта-функций $\delta(t)$), каждый из которых соответствует

коэффициенту отражения от некоторой глубинной границы: i -й импульс характеризуется амплитудой a_i и временем вступления θ_i

$$\xi(t) = \sum_i a_i \delta(t - \theta_i). \quad (2)$$

Тогда из (1) и (2) получим

$$z(t) = \sum_i a_i w(t - \theta_i). \quad (3)$$

ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АЛГОРИТМА ПРЕДСКАЗЫВАЮЩЕЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

Автор алгоритма [Robinson, 1957] приводит следующие соображения в качестве его обоснования. Пусть импульс является минимально-фазовым. Это в том числе означает, что он описывается причинной функцией: $w(t) \equiv 0$ при $t < 0$, т. е. обладает свойством каузальности. Процедура предсказания t -го отсчета трассы записывается в виде

$$\tilde{z}(t) = \sum_{m=1}^M z(t-m)b(m), \quad (4)$$

где $\tilde{z}(t)$ – прогнозное значение, $b(m)$, $m = 1, \dots, M$ – оператор прогнозирования. Ошибкой предсказания является $z(t) - \tilde{z}(t)$, тогда оператор ошибки предсказания $c(m)$ имеет вид

$$c(0) = 1, c(m) = -b(m), m = 1, \dots, M.$$

Таким образом, $c(m)$ – каузальный оператор длины $M + 1$ отсчетов.

Понятно, что, минимизируя дисперсию ошибки предсказания

$$E\{(z(t) - \tilde{z}(t))^2\}, \quad (5)$$

где E – символ математического ожидания, можно подобрать такой фильтр, что он будет идеально точно сжимать сигнал в дискретную дельта-функцию с амплитудой $w(0)$, устраняя хвост сигнала и оставляя только его первый отсчет. Это происходит в силу того, что $c(0) = 1$, т. е. отсчет нулевого времени импульса всегда остается неизменным в результате фильтрации, а оптимальный оператор ошибки прогнозирования, получаемый в результате минимизации функционала (5), обнуляет хвост сигнала, и это значение дисперсии уже не может быть уменьшено. Так как хвостовая часть каузального сигнала может быть предсказана по его головной части, то ошибки прогнозирования будут связаны только с тем, что на трассе непредсказуемым образом вступают импульсы. Каждое такое вступление связано с соответствующим коэффициентом отражения и имеет свое время вступления θ_i и амплитуду a_i .

В результате применения фильтра к трассе каждый элементарный импульс (включая волны-спутники, кратные волны и вторичные пульсации пузыря) будет преобразован в дельта-функцию, следовательно, будет получена искомая последовательность коэффициентов отражения. Именно такая интерпретация алгоритма содержится во множестве источников, в которых развиваются идеи, заложенные в упомянутой работе Робинсона [Peacock, Treitel, 1969; Козлов и др., 1973; Robinson, Treitel, 2008]. В том числе она вошла в учебные пособия и справочники [Yilmaz, 2001; Боганик, Гурвич, 2006] и др.

Однако любой геофизик, имеющий опыт использования процедуры, хорошо знает, что результат ее применения никогда не бывает похож на желаемую импульсную трассу. Тем не менее, этот результат обработки признается «успешным». В этом заключается первая проблема, связанная с интерпретацией алгоритма: на самом деле он не решает поставленную перед ним задачу.

Очень часто деконволюцию интерпретируют как средство повышения разрешенности сейсмических записей. Ниже следует почти дословная цитата из работы [Робинсон, Трейтел, 1980] (с сохранением особенностей этого перевода на русский язык), авторы которой рассуждают о предсказывающей деконволюции с произвольным интервалом прогнозирования. Обратный оператор, необходимый для инверсной фильтрации сейсмотрассы, совпадает с оператором ошибки предсказания. Поскольку такой оператор линейен, им можно воздействовать на принятый сейсмический сигнал (3), представляющий собой множество перекрывающихся колебаний, по форме повторяющих $w(t)$, причем их моменты прихода и амплитуды определяются импульсной трассой (2). В результате подавляются концевые участки всех колебаний, но сохраняются без изменения начальные участки, и тем самым повышается разрешающая способность сейсмического метода. Если требуется получить более высокое разрешение, то интервалы предсказания можно уменьшить, что приведет к еще большей концентрации энергии колебания. Когда интервал предсказания выбран равным единице, оператор ошибки предсказания, полученный с помощью метода наименьших квадратов, является обратным к минимально-фазовому колебанию, а ошибка предсказания совпадает со случайной последовательностью импульсов, определяемой моментами прихода и коэффициентами отражения сигналов.

Проблема такой интерпретации алгоритма связана с тем, что после деконволюции разрешающая способность может ухудшаться, причем значительно. Этот эффект известен и отмечен в том числе в работе [Li et al., 2009]. Ниже он будет проиллюстрирован на модельном примере. Теперь нам предстоит подробно проанализировать предложенные обоснования алгоритма ДС.

ДЕКОНВОЛЮЦИЯ КАК СРЕДСТВО СЖАТИЯ ИМПУЛЬСА

Первое из приведенных в предыдущем разделе рассуждений оказывается корректным только в ситуации, когда импульс является минимально-фазовым. В самом деле, предполагается, что импульс каузальный, и что существует обратный к нему устойчивый каузальный оператор, т. е. такой оператор, что

$$w(t) * c(t) = \delta(t),$$

а это свойство является необходимым и достаточным условием минимально-фазовости функции $w(t)$ [Berkhout, 1974]. По свидетельству Е. Робинсона и С. Трейтела [Робинсон, Трейтел, 1980], они обнаружили на практике, что оператор ошибки прогнозирования всегда оказывается минимально-фазовым. Позже это свойство было ими математически обосновано. Таким образом, если обратный фильтр по построению минимально-фазовый, то он обеспечивает сжатие в дельта-функцию только минимально-фазового импульса.

Не подлежит сомнению, что в полевых сейсмических данных минимально-фазовые импульсы не встречаются. Причина этого даже не в том, что, как показывают специальные исследования, например, [Гогоненков, 1987], в большинстве своем реальные импульсы оказываются смешанно-фазовыми, заметно отличающимися от своих минимально-фазовых аналогов, а в том, что трассы всегда имеют ограниченный частотный диапазон. Это происходит хотя бы потому, что при оцифровке аналоговых колебаний

применяется антиалайсинговая фильтрация. Если записать выражения для прямого и обратного преобразований Фурье, то станет очевидным, что у функции, которая на каком-либо временном интервале тождественно равна нулю, спектр не принимает нулевых значений ни на каком частотном интервале. И наоборот, если в спектре функции имеется нулевой интервал (в нашем случае это происходит за счет полосовой фильтрации), такая функция не принимает нулевых значений ни на каком временном промежутке. Иначе говоря, финитная функция имеет нефинитный спектр, а функция с финитным спектром сама является нефинитной [Хургин, Яковлев, 1971]. Следовательно, после аналоговой полосовой фильтрации импульс теряет свойство минимально-фазовости, в том числе становится некаузальным. (Со свойствами аналоговых и цифровых минимально-фазовых сигналов можно ознакомиться, например, в работе [Mitchell, Stokes, 1986]).

Проиллюстрируем описанные особенности минимально-фазовых и смешанно-фазовых сигналов на модельном примере. Пусть последовательность коэффициентов отражения содержит всего два импульса одинаковой амплитуды (рис. 1, а).

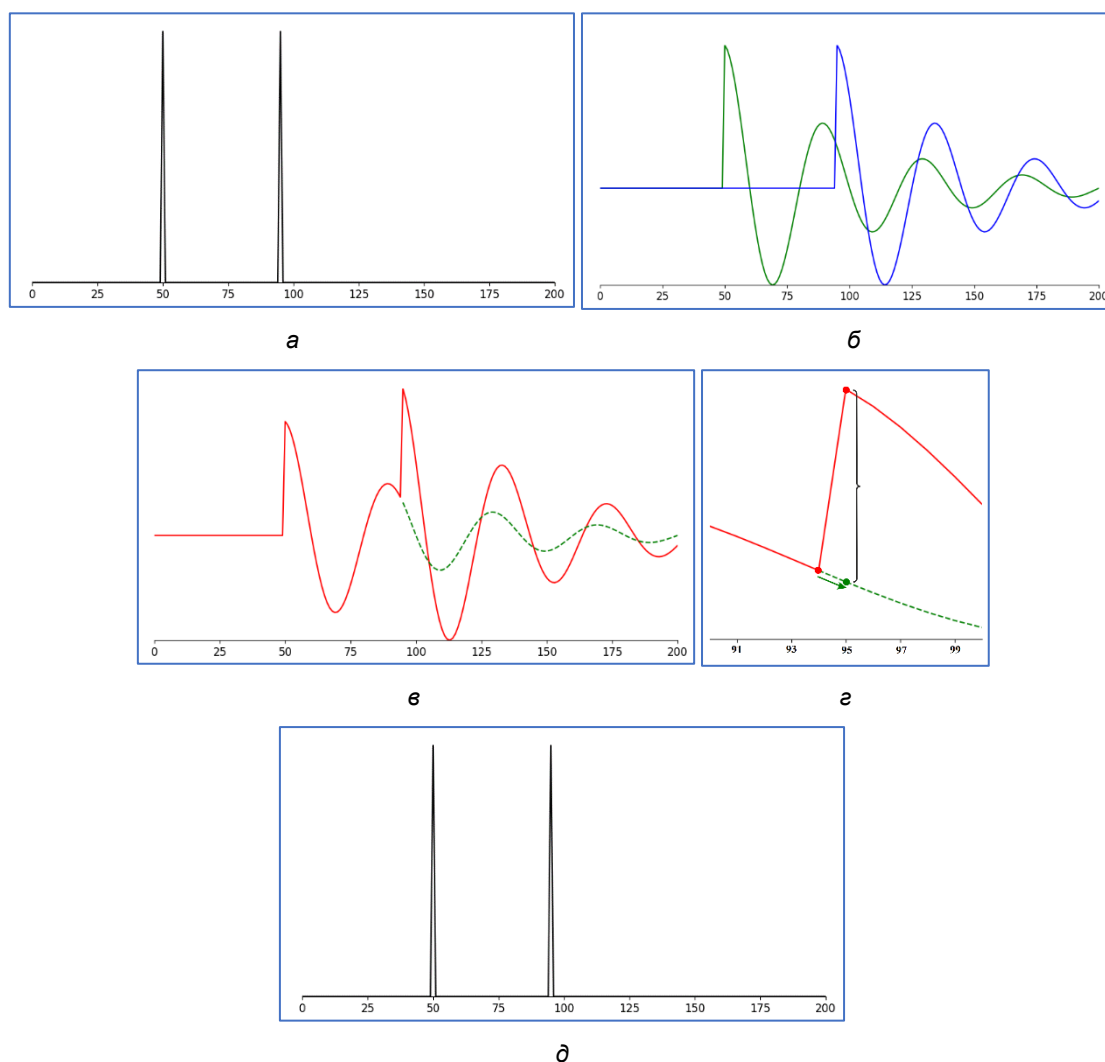


Рис. 1. Деконволюция как фильтрация ошибки предсказания. Используется минимально-фазовый импульс. По вертикальной оси отложены относительные амплитуды, по горизонтальной оси – условные номера отсчетов. Положение нуля вертикальной оси не указывается и на разных рисунках отличается; а – последовательность коэффициентов отражения, б – трасса как совокупность двух импульсов, в – трасса как суммарная интерференционная картина, г – принцип прогнозирования 95-го отсчета трассы по предыдущим отсчетам, д – результат деконволюции.

Рассмотрим ДС в случае минимально-фазового импульса. Представление (3) трассы как совокупности двух минимально-фазовых импульсов показано на рис. 1, б, а суммарная интерференционная картина – красная кривая на рис. 1, в. Одновременно с красной кривой на рисунке приведена зеленая пунктирная линия, показывающая положение хвоста первого импульса в области его интерференции со вторым импульсом. Понятно, что в этой области она совпадает с зеленой кривой на рис. 1, б. Так как импульсы каузальны, прогнозирование отсчетов трассы в области хвоста первого сигнала происходит с нулевой погрешностью до тех пор, пока не будет спрогнозирован отсчет, соответствующий времени вступления второго импульса. Тогда оператор по-прежнему слева направо прогнозирует хвост первого сигнала, а на самом деле в этом отсчете добавляется амплитуда нового импульса, которая не может быть спрогнозирована по предшествующим отсчетам. На рисунке 1, г схематически иллюстрируется этот принцип. В отсчете с порядковым номером 95 вступает второй импульс. Все показанные отсчеты с меньшими номерами прогнозируются с нулевой погрешностью. Зеленой стрелкой показано направление предсказания 95-го отсчета по предшествующим ему отсчетам: по-прежнему прогнозируется хвост первого сигнала, а вступающий второй сигнал не может быть спрогнозирован. Жирной зеленой точкой показан результат предсказания 95-го отсчета по 94-му и предшествующим ему отсчетам. Жирная красная точка в 95-м отсчете – истинное значение трассы. Ошибка предсказания показана фигурной скобкой. Нетрудно понять, что ее величина совпадает с амплитудой второго коэффициента отражения. Тогда и результат ДС будет представлять собой искомую последовательность коэффициентов отражения (рис. 1, д). Как видим, для такой ситуации традиционная интерпретация алгоритма корректна. В данном случае, чтобы не вдаваться в тонкости оценивания корреляционных функций, при реализации ДС мы считали, что АКФ известна. Поэтому оператор был рассчитан по изолированному сигналу, после чего был применен к интерференционной записи.

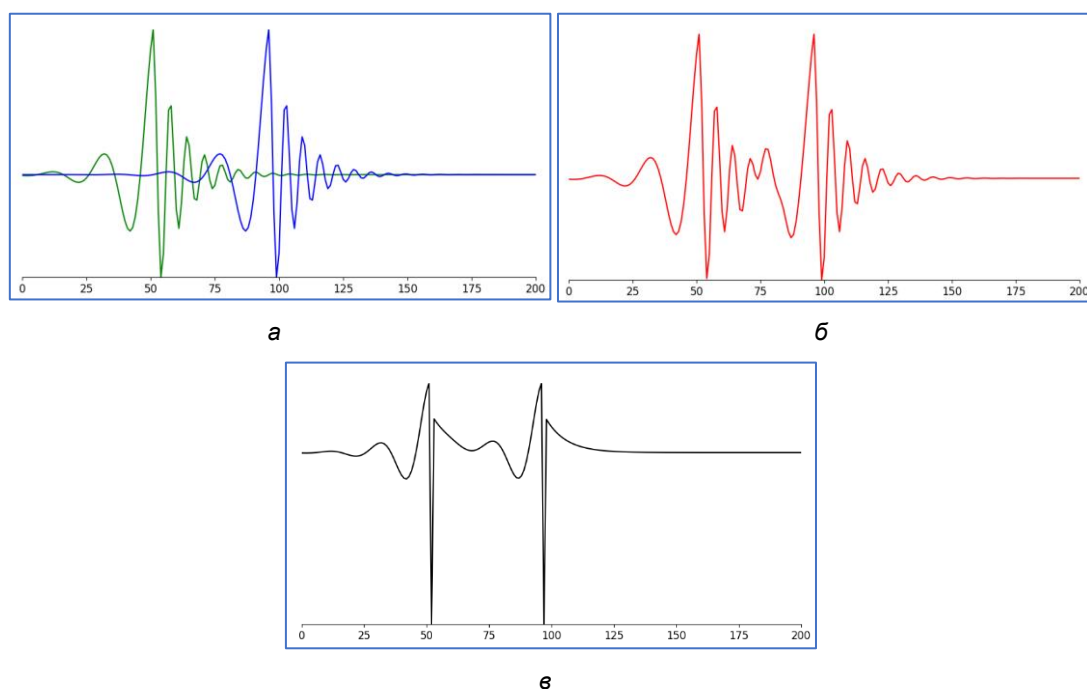


Рис. 2. Деконволюция как фильтрация ошибки предсказания. Используется полночастотный смешанно-фазовый импульс. По вертикальной оси отложены относительные амплитуды, по горизонтальной оси – условные номера отсчетов. Положение нуля вертикальной оси не указывается и на разных рисунках отличается; а – трасса как совокупность двух импульсов, б – трасса как суммарная интерференционная картина, в – результат деконволюции.

Если импульс смешанно-фазовый, складывается совсем иная ситуация. Используем показанную на рис. 1, а реализацию коэффициентов отражения для моделирования трассы с некаузальным смешанно-фазовым импульсом, причем импульс полночастотный.

На рисунке 2, а изображена трасса как совокупность двух импульсов, а суммарная интерференционная картина – на рис. 2, б. Теперь импульс имеет хвост в области отсчетов с отрицательными порядковыми номерами, и рассуждения, которые мы проводили при анализе рис. 1, теряют смысл. Ошибка прогнозирования становится малопохожей на искомую последовательность коэффициентов отражения, результат деконволюции показан на рис. 2, в.

ДЕКОНВОЛЮЦИЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Выше мы указали на тот факт, что деконволюция далеко не всегда приводит к повышению разрешенности трассы, и это не связано с хорошо известным эффектом увеличения уровня аддитивной помехи в результате обратной фильтрации. В книге [Варакин, 1970] доказано утверждение, что сложность формы сигнала $w(t)$ (величина, обратная к разрешающей способности), под которой понимают безразмерный параметр, называемый эффективной длительностью и вычисляемый как

$$T^{(\text{эфф})} = \sum_t w^2(t) t^2 / \sum_t t^2,$$

почти целиком определяется формой фазового спектра этого сигнала. Точнее говоря, она пропорциональна модулю максимального значения второй производной фазового спектра в сигнальном диапазоне частот, фактически – кривизне фазовой функции. Можно сказать, что чем более гладкий фазовый спектр имеет импульс, тем выше его разрешающая способность. В качестве примера приведем линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал, имеющий равномерный в заданном частотном диапазоне амплитудный спектр, но сложный параболический фазовый спектр [Гольдин, 1974]. Такой импульс характеризуется чрезвычайно большой эффективной длительностью, т. е. обладает минимальной разрешающей способностью. Если при сохранении его амплитудного спектра скомпенсировать фазовый спектр, сделав его нулевым, импульс фокусируется и приобретает минимальную длительность. В полночастотном случае он станет дельта-функцией, и его разрешающая способность будет максимальной. Если же варьировать амплитудный спектр нуль-фазового импульса, то на разрешающей способности это скажется несильно. Действительно, согласно теореме о свертке [Рапопорт, 1993], такие вариации во временной области тождественны свертке широкополосного нуль-фазового сигнала с нуль-фазовыми операторами. Все они имеют минимальную эффективную длительность, и свертка с ними не приведет к существенному увеличению эффективной длительности исходного импульса.

Так как оператор ДС по построению минимально-фазовый, то он будет сжимать исходный импульс в дельта-функцию, если последний также является минимально-фазовым, тем самым фактически преобразуя его к нуль-фазовому виду. Нулевой фазовый спектр имеет максимальную гладкость, а соответствующий ему импульс – максимальную разрешающую способность. Иначе обстоит дело в случае смешанно-фазовости исходного импульса. На практике не так уж редко встречаются ситуации, когда сложность фазовой характеристики импульса маскируется характером его амплитудного спектра. К примеру, осложнение фазы в виде высокой кривизны этой функции может иметь место в

высокочастотной части спектра, которая до деконволюции едва заметна в силу затухания амплитудного спектра на высоких частотах. Такой импульс имеет относительно высокую разрешающую способность. Обратная фильтрация расширяет спектр и повышает уровень частотных компонент, характеризующихся осложнением фазы. Тогда в результате деконволюции разрешающая способность импульса снижается. С подобными ситуациями мы почти всегда имеем дело при обработке вибросейсмических сигналов.

Сравним два импульса с одинаковым фазовым спектром, показанным на рис. 3, а. Приблизительно до половины частоты Найквиста фазовая функция равна константе $\pi/4$, после чего плавно переходит в параболу, которая соответствует фазовому спектру ЛЧМ сигнала. Амплитудные спектры представлены на рис. 3, б. Исходный импульс имеет затухающий на высоких частотах спектр (зеленая кривая), а результат деконволюции характеризуется расширенным спектром, равномерным во всем частотном диапазоне (горизонтальная синяя линия). Временные отклики импульсов изображены на рис. 3, в. Как следует из последнего рисунка, применение ДС приводит к значительному усложнению сигнала и снижению его разрешающей способности. Сигнал приобретает протяженный осциллирующий хвост. Эффективная длительность исходного импульса равна 122, а после применения деконволюции она увеличивается более чем в 20 раз, до величины 2581. Заметим, что для лучшей наглядности демонстрации рассматриваемого явления была использована не минимально-фазовая деконволюция, а ее нуль-фазовый аналог, сохраняющий фазовый спектр импульса. Особенности этого режима обработки будут обсуждаться ниже.

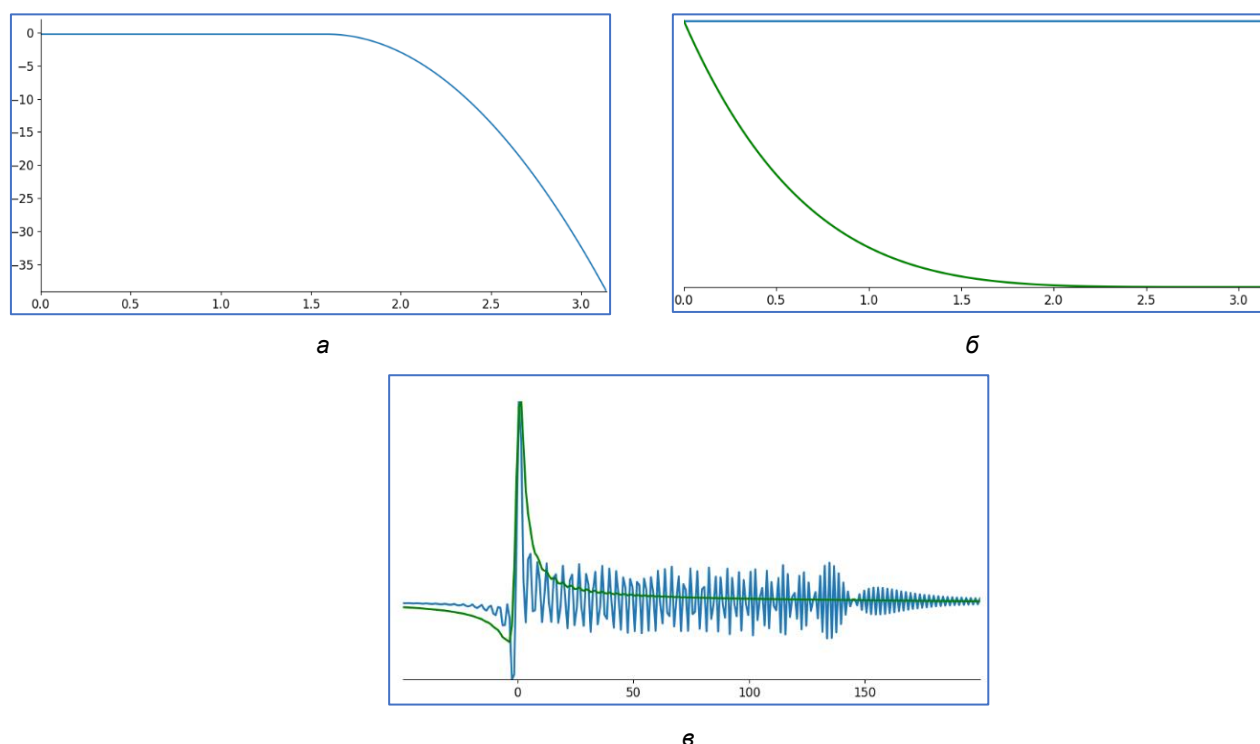


Рис. 3. Сравнение эффективной длительности двух сигналов с одинаковым фазовым спектром: а – фазовый спектр, по горизонтальной оси отложена круговая частота в радианах, по вертикальной – значения фазы; б – амплитудные спектры, зеленый – до деконволюции, синий – после деконволюции, по горизонтальной оси отложена круговая частота в радианах, по вертикальной – относительная амплитуда в условных единицах; в – приведенные к общей амплитуде временные характеристики импульсов, зеленый – до деконволюции, синий – после деконволюции, по горизонтальной оси отложены номера отсчетов дискретных функций, по вертикальной – относительная амплитуда в условных единицах.

ДЕКОНВОЛЮЦИЯ РЕШАЕТ ЗАДАЧУ РАСШИРЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА ИМПУЛЬСА

Мы убедились в том, что два традиционных понимания ДС, вообще говоря, некорректны. Последовательность коэффициентов отражения не может быть получена, а разрешающая способность импульса не всегда увеличивается. Тем не менее, этот алгоритм успешно применяется в производственных задачах обработки данных. Тогда каких же результатов от него ожидают? По свидетельству И.К. Кондратьева¹, почти сразу геофизики стали относиться к деконволюции как к средству расширения амплитудного спектра импульса в пределах рабочего диапазона частот. Действительно, этот эффект устойчиво наблюдается при всяком применении процедуры. Однако такая задача, как мы видели выше, не ставилась при разработке алгоритма. Восстановить в результате фильтрации последовательность коэффициентов отражения и расширить амплитудный спектр импульса – разные задачи. Почему инструмент, созданный для решения первой задачи, оказался подтвержденным на практике средством решения второй? Известная автору статьи литература не содержит ответа на этот вопрос. Поэтому в рамках настоящего исследования нам предстоит дать на него ответ, предварительно выведя алгоритм ДС как средство решения поставленной задачи расширения спектра и рассмотрев его особенности.

Двусторонняя авторегрессионная модель сейсмической трассы. Вначале потребуется преобразовать традиционную сверточную модель трассы (1) в авторегрессионную модель, и в логике рассуждений будем следовать ранней работе [Денисов, 1994]. Пусть $f(t)$ – обратный фильтр к импульсу $w(t)$, причем импульс может быть некаузальным смешанно-фазовым. Это означает, что

$$f(t) * w(t) = \delta(t). \quad (6)$$

Применим свертку с $f(t)$ к правой и левой частям равенства (1). С учетом (6) получим

$$z(t) * f(t) = \xi(t).$$

Фильтр, обратный к $w(t)$, является некаузальной дискретной функцией: $f(t)$, $t \in [-N, M]$. Поэтому, если раскрыть оператор свертки в виде суммы, последнее равенство запишется как

$$\sum_{m=-N}^M z(t-m)f(m) = \xi(t).$$

Перепишем сумму отдельно для отрицательных, положительных и нулевого индексов m :

$$\sum_{m=1}^N z(t+m)f(-m) + \sum_{m=1}^M z(t-m)f(m) + z(t)f(0) = \xi(t).$$

Перенесем суммы в правую часть, после чего разделим обе части на $f(0)$. Введя обозначения $g(m) = -f(m)/f(0)$ и $\rho(t) = \xi(t)/f(0)$, получим

$$z(t) = \sum_{m=1}^N z(t+m)g(-m) + \sum_{m=1}^M z(t-m)g(m) + \rho(t).$$

¹ Кондратьев И.К. Мой вклад в развитие способов цифровой обработки данных сейсморазведки. 2017. Электронная публикация, сайт www.seismic-info.ru.

Мы пришли к так называемой двусторонней авторегрессионной модели (ДАР) или некаузальной авторегрессионной (АР) модели, в ней каждый отсчет трассы $z(t)$ вычисляется как весовая сумма предыдущих и последующих отсчетов. В роли весов выступают нормированные на величину $-f(0)$ элементы обратного фильтра. Вычисление $z(t)$ по предыдущим отсчетам означает прогнозирование, а по последующим – ретроспекцию.

Если исходный импульс $w(t)$ минимально-фазовый, то обратный фильтр является каузальным. Тогда в ДАР модели остается только вторая сумма, отвечающая за прогнозирование, и мы приходим к традиционной АР модели случайного процесса [Бокс, Дженкинс, 1974]:

$$z(t) = \sum_{m=1}^M z(t-m)g(m) + \rho(t). \quad (7)$$

Как и прежде, параметры $g(m)$ АР модели являются нормированными отсчетами обратного фильтра и они же – веса прогнозирования.

Перед нами по-прежнему стоит задача расширения спектра импульса средствами ДС. Для этого предварительно получим оценку спектра, после чего построим оператор, имеющий в заданной полосе частот амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), обратную спектру импульса. Тогда применение оператора к данным будет означать расширение спектра. Мы ввели сверточную модель (1)–(3) как модель импульсного случайного процесса, т. е. потока импульсов, имеющих случайные времена вступления и амплитуды. Известно, что АКФ такого процесса, которую обозначим через $p_z(\tau)$, равна [Левин, 1989]

$$p_z(\tau) = \sigma_\xi^2 p_w(\tau), \quad (8)$$

где σ_ξ^2 – дисперсия процесса $\xi(t)$, а $p_w(\tau)$ – АКФ, определенная для детерминированного сигнала как

$$p_w(\tau) = \sum_t w(t)w(t+\tau),$$

т. е. АКФ сейсмической трассы с точностью до множителя совпадает с АКФ импульса.

Для анализа спектральных характеристик случайных процессов вводится спектральная плотность $P_z(\omega)$, которая, как это следует из теоремы Винера–Хинчина [Харкевич, 2009], связана с АКФ парой преобразований Фурье. Это в том числе означает, что спектральная плотность сейсмической трассы с точностью до множителя совпадает с квадратом амплитудного спектра импульса, и, оценив спектральную плотность трассы, придем к искомой оценке амплитудного спектра импульса. Получить оценку спектральной плотности можно разными способами, но здесь нас интересует то, как это реализуется в алгоритме предсказывающей деконволюции, где эти вычисления производятся неявно.

Понятно, что спектральная плотность импульсного случайного процесса (1) не зависит от фазового спектра импульса. Это следует хотя бы из выражения (8), в котором фигурирует только АКФ импульса, инвариантная относительно фазы. Поэтому в сверточной модели вместо исходного смешанно-фазового импульса будем использовать его минимально-фазовый аналог. Также заметим, что, хотя минимально-фазовая функция не бывает неполночастотной, при увеличении длины оператора прогнозирования (или, что то же самое, порядка АР модели) достигнем сколь угодно точной ее аппроксимации. Тогда

спектральную плотность можно оценивать по АР модели трассы (7), и методика такого оценивания хорошо известна [Льюнг, 1991]. Она сводится к формированию так называемой настраиваемой модели:

$$\tilde{z}(t) = \sum_{m=1}^L z(t-m)\tilde{g}(m),$$

где $\tilde{g}(m)$ – некоторые «пробные» коэффициенты. Порядок L модели АР должен выбираться как $L = M + N$, однако на практике величины M и N неизвестны, и порядок модели оценивается, для чего используется, например, информационный критерий Акаике [Кей, Марпл, 1981]. Последнее выражение производит прогнозирование t -го отсчета трассы по предыдущим отсчетам, прогнозное значение обозначено через $\tilde{z}(t)$. Можно посчитать ошибку прогноза $z(t) - \tilde{z}(t)$ и сформировать функционал (5) в виде дисперсии ошибки. Нетрудно показать, что этот функционал унимодален и имеет минимум на искомым параметрах. Поэтому производится его дифференцирование по каждому параметру, после чего производные приравниваются к нулю. В результате приходим к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$\begin{bmatrix} p_z(0) & \cdots & p_z(L-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_z(L-1) & \cdots & p_z(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{g}(1) \\ \cdots \\ \hat{g}(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_z(1) \\ \cdots \\ p_z(L) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

которую обычно называют уравнениями Юла–Уокера и решают при помощи рекурсивного метода Левинсона. Вместо истинных значений АКФ $p_z(\tau)$ в (9) подставляются их выборочные оценки. Решив эту СЛАУ, получим вектор оптимальных коэффициентов прогнозирования $(\hat{g}(1), \dots, \hat{g}(L))$, а оценка энергетического спектра процесса $z(t)$, которую обозначим через $\hat{P}_z(\omega)$, с точностью до несущественного в нашем случае коэффициента определяется по формуле

$$\hat{P}_z(\omega) = \left| 1 - \sum_{m=1}^L \hat{g}(m)e^{j\omega m} \right|^{-2}, \quad (10)$$

где $j = \sqrt{-1}$. Эти вычисления соответствуют спектральному оцениванию по методу Бурга [Никитин, 1986]. Очевидно, что в правой части равенства (10) в скобках фигурирует спектральная характеристика оптимального оператора ошибки предсказания. Тогда, сравнив выражения (8) и (10), увидим, что амплитудный спектр оптимального фильтра ошибки предсказания обратен к амплитудному спектру импульса.

Если вне рабочего диапазона частот АЧХ импульса стремится к нулю, то амплитудный спектр фильтра ошибки предсказания в этой области будет стремиться к бесконечности. Соответственно, энергия оператора станет неограниченно увеличиваться. Чтобы избежать неустойчивости фильтрации, применяют регуляризацию, которая сводится к введению в функционал (5) штрафной функции, пропорциональной энергии оператора прогнозирования [Василенко, Тараторин, 1986]. В результате дифференцирования такого модифицированного функционала и приравнивания производной к нулю приходят к СЛАУ, аналогичной (9), но в которой к диагональным элементам добавлена константа. На основании теоремы Винера–Хинчина можно сделать заключение, что в результате регуляризации функция спектральной плотности процесса наращивается на всех частотах, и теперь обратный фильтр не

будет иметь области неограниченного возрастания спектральной энергии. В пределах рабочего диапазона регуляризация тоже изменит спектр, но такие изменения обычно несут незначительные. Поэтому применение регуляризованного обратного фильтра больше не приводит к неконтролируемому росту энергии. В пределах заданного частотного диапазона спектр результата обработки расширяется, т. е. стремится к равномерному, а вне его остается пренебрежимо малым. Именно такие эффекты всегда наблюдаются при применении регуляризованной ДС к сейсмическим трассам.

Классический алгоритм ДС на первом этапе производит оценивание АКФ трассы [Сильвия, Робинсон, 1983]. Затем решается СЛАУ вида (9), после чего к данным применяется фильтр ошибки предсказания. Выше мы убедились в том, что эта процедура совпадает с получением оценки спектральной плотности по методу Бурга. В свою очередь, оценка спектральной плотности с точностью до множителя совпадает с оценкой амплитудного спектра импульса. Применение фильтра ошибки предсказания означает обратную фильтрацию неполночастотного и, вообще говоря, смешанно-фазового импульса. Это объясняет причину того, что ДС приводит не к получению импульсной трассы и не к повышению разрешенности, а к расширению спектра в пределах рабочего диапазона частот. При ДС спектральная характеристика (10) не вычисляется, но спектральное оценивание производится неявно.

На рисунке 4, а изображен неполночастотный импульс, полученный в результате применения полосовой фильтрации к минимально-фазовому сигналу, показанному на рис. 1. Верхняя частота среза полосового фильтра выбрана чуть выше половины частоты Найквиста. Амплитудный спектр импульса представлен на рис. 4, б.

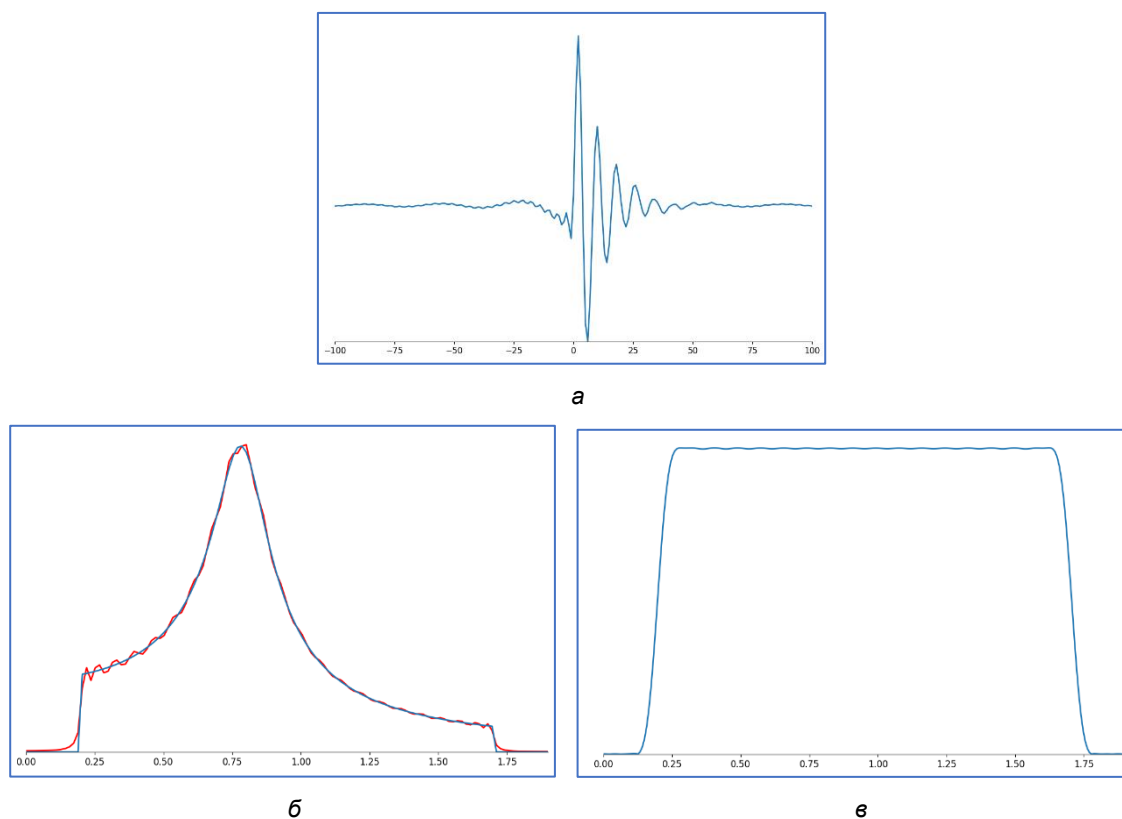


Рис. 4. Аппроксимация спектра неполночастотного импульса при ДС: а – исходный импульс, по вертикальной оси отложены относительные амплитуды, по горизонтальной оси – условные номера отсчетов; б – амплитудные спектры, синяя кривая – истинный спектр импульса, красная кривая – результат оценивания спектра при помощи ДС, по горизонтальной оси отложена круговая частота в радианах, по вертикальной – относительная амплитуда в условных единицах; в – амплитудный спектр результата применения ДС к исходному импульсу.

Функция построена не для всех частот, а в интервале приблизительно до половины частоты Найквиста, чтобы не показывать неинформативный протяженный нулевой участок. Результат его аппроксимации при помощи АР спектральной оценки, полученной как квадратный корень из функции (10), также показан на рис. 4, б. Для корректного описания спектра требуется завышать порядок АР модели относительно порядка модели, при котором точно описывается исходный минимально-фазовый импульс. В данном случае исходный импульс описывается моделью АР(3), а для получения спектральной оценки использовалось АР(80). Чем выше порядок, тем точнее спектральная оценка, получаемая по изолированному импульсу, и при неограниченном его увеличении можно сколь угодно точно описать спектральную характеристику сигнала с финитным спектром. Эффект расширения спектра сигнала демонстрируется на рис. 4, в, где представлен амплитудный спектр результата ДС с использованием регуляризации. Таким образом, мы обосновали и проиллюстрировали утверждение, что ДС является именно средством расширения амплитудного спектра импульса в рабочей полосе частот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Представление (10) является квадратом амплитудного спектра минимально-фазового сигнала, а такой сигнал, будучи каузальным, всегда полночастотный. Поэтому, чтобы аппроксимировать АЧХ неполночастотного сигнала, приходится наращивать порядок модели АР. Такой прием таит в себе потенциальную опасность. Если ДС применять не к изолированному сигналу, а к трассе, на которой импульсы всегда интерферируют, заведомо длинный оператор, настраиваемый при помощи адаптивной процедуры, имеет шансы проинтерпретировать всю трассу как единый протяженный сигнал, и в результате деконволюции расширить, сделав его равномерным, не спектр импульса, а спектр всей трассы. Тем самым в последовательность коэффициентов отражения будут внесены искажения. У протяженного прогнозирующего фильтра всегда наблюдается тенденция сосредоточить усилия на некоторой интенсивной интерференционной пачке, принимаемой им за отдельный сигнал [Киреева, Фиников, 2025]. По этой причине алгоритм ДС имеет смысл только для коротких фильтров. Тогда при некотором относительно небольшом порядке АР модели аппроксимация (10) амплитудного спектра исходного неполночастотного импульса окажется неидеальной, и это приведет к тому, что в пределах рабочего диапазона частот в результате деконволюции будет наблюдаться расширение спектра импульса, но не преобразование его к равномерному виду. Впрочем, этот эффект на практике почти незаметен в силу того, что истинный спектр импульса неизвестен, а геофизик всегда располагает лишь той или иной его оценкой.

Согласно теореме о свертке, спектр трассы является произведением спектров импульса и реализации последовательности коэффициентов отражения. Относительно последовательности коэффициентов сделано предположение о том, что она является случайным процессом типа белого шума, следовательно, обладает равномерным энергетическим спектром. Однако каждая отдельная реализация белого шума имеет ограниченную протяженность, поэтому характеризуется неравномерным спектром. По этой причине не следует стремиться к идеальному выравниванию спектральной оценки сейсмической записи, чтобы не деформировать коэффициенты отражения. Справедливо считается достаточным в результате ДС не преобразовать спектр к равномерному, а лишь расширить его. Именно по этой причине некоторые неточности описания трассы при помощи АР модели не будут ярко выраженными.

Значительно ослабить проблемы, связанные с ограниченностью частотного диапазона, позволяет так называемое полосовое преобразование [Tribolet, 1978], в результате применения которого к трассе получится новая трасса, частота Найквиста которой будет соответствовать верхней частоте рабочего диапазона исходной трассы, а нулевая частота – нижней частоте рабочего диапазона. Именно так мы поступили в нашем раннем исследовании [Денисов, 1995], посвященном проверке адекватности описания сейсмической трассы моделью AP.

2. Мы убедились в том, что алгоритм ДС вычисляет оценку амплитудного спектра импульса по методу Бурга, причем делает это неявным образом. Можно согласиться с тем, что такая оценка далеко не оптимальна, т. к. не учитывает особенности сейсмических записей. Известно множество методик оценивания спектра случайного процесса, и каждая из них разработана с учетом специфики задач, которые с ее помощью предстоит решать [Альтшулер и др., 1986; Марпл, 1990]. Соответственно, каждая обладает своими преимуществами и недостатками. Так, метод Бурга был предложен для обнаружения скрытых периодичностей во временных рядах и ориентирован на получение спектров, имеющих линейчатую структуру, т. е. характеризуемых наличием выбросов. При этом амплитудные спектры сейсмических импульсов всегда описываются гладкими функциями. На это мы указывали в работе [Денисов, Фиников, 1997], где предложили более устойчивый по сравнению с ДС метод расширения спектра, который в полной мере использует имеющуюся в нашем распоряжении априорную информацию о свойствах импульса и последовательности коэффициентов отражения.

3. Мы критиковали понимание деконволюции как средства повышения разрешенности. Тем не менее, на практике достаточно часто наблюдается именно такой эффект. Он имеет место, когда исходный сейсмический импульс близок к своему минимально-фазовому аналогу. Импульс не может быть минимально-фазовым хотя бы в силу ограниченности диапазона частот, поэтому последнее утверждение требует уточнения. Можно рассуждать о сигнале, являющимся «минимально-фазовым в частотном диапазоне». Это означает, что в пределах диапазона логарифм амплитудного спектра такого цифрового сигнала связан с его фазовым спектром сверткой с функцией котангенса [Сильвиа, Робинсон, 1983], а вне диапазона спектр пренебрежимо мал. Фильтр ошибки предсказания, о свойстве минимально-фазовости которого мы упоминали выше, представляет собой обратный фильтр такому сигналу «в пределах частотного диапазона». Это является следствием того, что фильтр, обратный к минимально-фазовому сигналу, сам оказывается минимально-фазовым, а по теореме о свертке процесс фильтрации может быть рассмотрен на каждой частоте. Таким образом, в пределах диапазона реализуется идеальная обратная фильтрация, в результате чего получим импульс с наилучшей для этого диапазона разрешающей способностью.

Если исходный импульс не обладает свойством минимально-фазовости в пределах частотного диапазона, но близок к такому сигналу, обратный минимально-фазовый фильтр ДС хоть и не скорректирует его АЧХ и фазовую характеристику, но упростит их. Тем самым разрешающая способность увеличится. В качестве аналогии приведем обработку вибросейсмических данных. Теоретический свип-сигнал никогда в точности не совпадает с реальным сигналом, уходящим в глубь среды. Тем не менее корреляция пусть даже с неточным свипом значительно упрощает запись и повышает разрешенность. В результате корреляции реальный сигнал преобразуется не в желаемый импульс с равномерной АЧХ и нулевым фазовым спектром, но все равно его фокусировка имеет место.

4. В упомянутой книге [Гогоненков, 1987] сейсмический импульс извлекается из прямой волны трасс ВСП, после чего приводится анализ его формы, включая сопоставление с минимально-фазовым аналогом. Делается вывод о том, что отклонение реального импульса от минимально-фазового может быть весьма существенным, и, как следствие, для повышения разрешенности необходимо применять специальные методики оценивания и коррекции его фазового спектра. Там же приводится обзор литературных источников, в которых обсуждаются соответствующие вопросы.

5. В соответствии с заявленной темой исследования, вынесенной в заголовок статьи, мы изучали особенности деконволюции сжатия сигнала, под которой понимается прогностическая деконволюция с единичным интервалом прогнозирования. Вопросы оценивания и коррекции фазового спектра импульса выходят за рамки этой темы. Тем не менее отметим, что приступать к оцениванию фазы целесообразно после применения к данным ДС, т. к. расширение амплитудного спектра позволит более устойчиво оценивать фазовый спектр. (На тех частотах, где амплитудный спектр исходного импульса ослаблен, фазовый спектр оценивается неустойчиво, а при нулевом амплитудном спектре фазовый спектр не определен.) В частности, использование статистических процедур приведения импульса к минимально-фазовому виду, подразумевающих предварительное оценивание и соответствующее преобразование его фазовой характеристики, может привести к неустойчивости решения.

В современных программных пакетах обработки сейсмических данных геофизику предоставляется возможность выбора между нуль-фазовым и минимально-фазовым режимами применения оператора ДС. Как мы видели, оператор ошибки предсказания оказывается минимально-фазовым по построению, но можно преобразовать такой оператор к его нуль-фазовому аналогу, после чего применить последний с целью расширения спектра. Выбор между режимами обработки, как правило, производится путем визуального контроля результата. Понятно, что амплитудный спектр обработанных данных не зависит от выбора фазовой характеристики оператора деконволюции, а предпочтение тому или иному оператору отдается на основании разрешенности получаемой с его помощью волновой картины. Если исходный импульс близок к минимально-фазовой функции, то применение минимально-фазового оператора ДС повысит разрешенность. Если, например, импульс близок к нуль-фазовой функции, то минимально-фазовая ДС «навяжет» ему фазовый спектр, и разрешенность ухудшится. В таком случае используют нуль-фазовую деконволюцию.

Выбрав результат с наилучшей разрешенностью, мы улучшим работу оптимизационного алгоритма оценивания фазы, т. к. легче оценивать более простую остаточную фазовую характеристику. Именно на этом этапе обработки происходит повышение разрешенности сейсмической записи за счет фокусировки импульса. Проблеме коррекции фазового спектра посвящен огромный объем литературы, с который читатель может ознакомиться самостоятельно.

6. Конечной целью (если не учитывать влияние шума) всех процедур обработки данных, нацеленных на коррекцию формы импульса, является построение и применение идеального обратного фильтра. В результате свертки исходного импульса с таким фильтром получим дельта-функцию, а если импульс имеет ограниченный диапазон частот, то придем к сигналу с равномерным в этом диапазоне амплитудным и нулевым фазовым спектрами. Оператор ДС может совпадать с искомым идеальным обратным фильтром (если импульс минимально-фазовый), а может и не совпадать с ним (если импульс смешанно-фазовый). Амплитудный спектр оператора ДС такой же, как у идеального фильтра, а фазовый оказывается всегда связанным с логарифмом амплитудного спектра преобразованием Гильберта, что

соответствует условию его минимально-фазовости. Это свойство объясняет устойчивость такого оператора, в то время как при попытке построения каузального обратного фильтра можно столкнуться с эффектом неустойчивости. В случае несовпадения оператора ДС с идеальным обратным фильтром требуется дополнительный этап коррекции фазового спектра после применения предсказывающей деконволюции.

7. Наконец заметим, что понятие ошибки предсказания вообще едва ли может быть применено к неполночастотным сигналам, что усугубляет проблемы традиционного толкования алгоритма как средства восстановления непредсказуемой компоненты сейсмической записи, под которой понимают последовательность коэффициентов отражения. Это утверждение требует пояснения. На основании теоремы Котельникова [Харкевич, 2009] из цифровой сейсмической трассы можно однозначно восстановить соответствующую ей аналоговую трассу, которая оказывается неполночастотной хотя бы по причине применения к ней антиаллисинговой фильтрации. Сигнал с финитным спектром является целой функцией [Хургин, Яковлев, 1971], а целая функция бесконечно дифференцируема. По любому сколь угодно малому отрезку такой функции можно построить всюду сходящийся ряд Тейлора, тем самым экстраполировать ее на произвольный временной интервал. Будущие значения целой функции предсказываются идеально точно [Финк, 1984]. Следовательно, при прогнозировании трассы вообще не может быть ошибки предсказания.

Пусть к исходной аналоговой сейсмической записи применен идеальный полосовой фильтр. (Понятно, что такой фильтр имеет импульсную характеристику бесконечной протяженности, и точность его практического использования связана с краевыми эффектами и особенностями усечения сигнала. Однако эти вопросы мы оставим без рассмотрения, считая, что можем выбирать сколь угодно протяженные функции.) Тогда полученная в результате фильтрации функция с финитным спектром является целой функцией, и это означает, что ее значения могут быть восстановлены на протяжении всей временной оси по любому сколь угодно малому интервалу. Понятно, что при этом сейсмическая трасса теряет свойство непредсказуемости, которое соблюдалось для исходной записи, а рассуждения об ошибке предсказания теряют смысл.

Такую особенность неполночастотной сейсмической трассы можно пояснить и при помощи следующих рассуждений. В исходной полночастотной аналоговой записи времена вступления и амплитуды импульсов носят произвольный, т. е. непредсказуемый (не могут быть спрогнозированы по предыдущему временному интервалу) характер. Это является следствием каузальности импульса. Применение к трассе полосовой фильтрации тождественно полосовой фильтрации каждого отдельного импульса. Это следует из модели трассы (3), представляющей собой совокупность отдельных импульсов, а также из свойства ассоциативности свертки. В результате каждый импульс приобретает финитный спектр, поэтому его временной оклик становится нефинитным и занимает всю временную ось, как бы размазываясь на интервал от минус бесконечности до бесконечности. Понятно, что теперь в каждой точке временной оси наблюдается интерференция всех импульсов. Иначе говоря, любой сколь угодно малый интервал записи содержит всю информацию о всех зарегистрированных импульсах.

Возникает мнимый парадокс, согласно которому сейсмическую трассу можно не записывать целиком, но при необходимости, имея только малый фрагмент, полностью восстановить по нему форму трассы. Дело в том, что при обработке данных в современной сейсморазведке мы имеем дело с цифровыми, а не аналоговыми сигналами. Первые получаются из вторых путем дискретизации в

соответствии с правилами, предписываемыми теоремой Котельникова. Имеющая после полосовой фильтрации финитную спектральную характеристику аналоговая трасса станет нефинитной. Следовательно, отсчеты у такой функции должны браться на протяжении всей временной оси, и именно только по такому бесконечному числу отсчетов можно будет восстановить аналоговую функцию с финитным спектром. В том числе восстановить малый фрагмент, по которому экстраполировать всю функцию целиком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известны два подхода к деконволюции сжатия. Детерминированный алгоритм использует ту или иную априорную оценку формы импульса, рассчитывает обратный фильтр, после чего применяет его к обрабатываемым данным. Альтернативная методика, основанная на применении фильтра ошибки предсказания, оценивания импульса в явном виде не производит. При этом, однако, анализ алгоритма позволяет сделать вывод, что в рамках процедуры осуществляется статистическое оценивание импульса в предположении о том, что он является минимально-фазовой функцией, и после этого к трассам применяется обратная фильтрация.

Мы рассмотрели традиционное понимание предсказывающей деконволюции с единичным интервалом прогнозирования и показали, что оно не всегда соответствует алгоритму, используемому при решении задач обработки сейсмических данных. В том числе, несмотря на свое название, деконволюция сжатия может и не сжимать сигнал. Алгоритм нацелен на расширение амплитудного спектра импульса и не следует ожидать от него восстановления последовательности коэффициентов отражения или повышения разрешенности записи. В результате применения процедуры спектр расширяется всегда, а увеличение разрешенности не гарантируется. Получаемый оператор обратной фильтрации по построению минимально-фазовый. Он вычисляется по АКФ исходной трассы, тем самым не зависит от фазовой характеристики импульса. Если импульс близок к минимально-фазовому в пределах рабочего диапазона частот, произойдет упрощение его фазовой характеристики, вследствие чего повысится разрешающая способность. Если это не так, то в результате деконволюции разрешенность может ухудшиться.

Алгоритм ДС является средством идентификации АР модели сейсмической трассы, а получаемая с его помощью спектральная оценка оказывается оценкой по методу максимальной энтропии или, что то же самое, методу Бурга. Этот подход в большинстве случаев неоптимален при анализе сейсмических трасс, и по этой причине почти никогда не используется в задаче спектрального оценивания. Его недостатки хорошо известны, поэтому делались попытки заменить ДС альтернативными методиками, более приспособленными для решения задач обратной фильтрации данных сейсморазведки.

В статье намеренно не освещались вопросы, связанные с наличием помехи. Аддитивная случайная помеха оказывается статистически независимой от сигнальной части процесса, поэтому АКФ трассы есть сумма их АКФ. Следовательно, спектральная плотность трассы также является суммой плотностей сигнальной компоненты и помехи. Это означает, что алгоритм ДС будет оценивать и расширять суммарный спектр. После расширения спектра результат обработки может оказаться зашумленным, если алгоритм усилит относительный уровень тех частот, которые в исходных данных характеризовались малым отношением сигнал/шум, и такой эффект очень часто наблюдается на практике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Альтшулер С.В., Лапан А.Б., Фиников Д.Б.** Параметрические методы спектрального анализа в сейсморазведке. М.: ВИЭМС, 1986. 48 с.
- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
- Бокс Дж., Дженкинс Г.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир, 1974. 406 с.
- Варакин Л.Е.** Теория сложных сигналов. М.: Советское радио, 1970. 376 с.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М.** Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 302 с.
- Гогоненков Г.Н.** Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. М.: Недра, 1987. 222 с.
- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.: Недра, 1974. 352 с.
- Денисов М.С.** Двусторонняя авторегрессионная модель сейсмической записи // Геофизика. 1994. № 3. С. 2–12. EDN:TIHPVT.
- Денисов М.С.** Как интерпретировать алгоритм предсказывающей деконволюции // Геофизика. 1995. № 3. С. 44–48. EDN:TJIYIB.
- Денисов М.С., Фиников Д.Б.** Способ оценивания амплитудного спектра сейсмического импульса и алгоритм «амплитудной деконволюции» // Геофизика. 1997. № 2. С. 17–23. EDN:TNKYRB.
- Кей С.М., Марпл С.Л.** Современные методы спектрального анализа. Обзор // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 10. С. 5–51.
- Киреева А.П., Фиников Д.Б.** АРУ (AGC) и деконволюция. Об искажениях формы сигнала в ходе нелинейных преобразований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 87–103. EDN:ZBRTAG.
- Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л., Мушин И.А., Мешбей В.И., Климович Н.И., Янковский И.И.** Цифровая обработка сейсмических данных. М.: Недра, 1973. 309 с.
- Левин Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 654 с.
- Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
- Марпл–мл. С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Никитин А.А.** Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 342 с.
- Рапопорт М.Б.** Вычислительная техника в полевой геофизике. М.: Недра, 1993. 352 с.
- Робинсон Е., Трейтел С.** Цифровая обработка сигналов в геофизике // Применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1980. С. 486–544.
- Робинсон Э.А.** Статистические методы сжатия сейсмического импульса // ТИИЭР. 1984. Т. 72, № 9. С. 52–68.
- Сильвия М.Т., Робинсон Э.А.** Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. М.: Недра, 1983. 447 с.
- Финк Л.М.** Сигналы, помехи, ошибки М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
- Харкевич А.А.** Спектры и анализ. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 236 с.
- Хургин Я.И., Яковлев В.П.** Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.
- Шерифф Р., Гелдарт Л.** Сейсморазведка. Т. 2. Обработка и интерпретация данных. М.: Мир, 1987. 400 с.
- Berkhout A.J.** Related properties of minimum-phase and zero-phase time functions // Geophysical Prospecting. 1974. Vol. 22 (4). P. 683–709. doi:10.1111/j.1365-2478.1974.tb00111.x.
- Li G.F., Zhou H., Zhao C.** Potential risks of spectrum whitening deconvolution – compared with well-driven deconvolution // Petroleum Science. 2009. Vol. 6 (2). P. 146–152. doi:10.1007/s12182-009-0023-y.

- Mitchell A.R., Stokes W.D.** Sampling and minimum phase from both a continuous and discrete point of view // *Geophysical Prospecting*. 1986. Vol. 34 (6). P. 807–821. doi:10.1111/j.1365-2478.1986.tb00494.x.
- Peacock K.L., Treitel S.** Predictive deconvolution: theory and practice // *Geophysics*. 1969. Vol. 34 (2). P. 155–169. doi:10.1190/1.1440003.
- Robinson E.A.** Predictive decomposition of seismic traces // *Geophysics*. 1957. Vol. 22 (4). P. 767–778. doi:10.1190/1.1438415.
- Robinson E.A., Treitel S.** Digital imaging and deconvolution: The ABCs of seismic exploration and processing. SEG, Tulsa, 2008. 424 p. doi:10.1190/1.9781560801610.
- Tribolet J.** Applications of short-time homomorphic signal analysis to seismic wavelet estimation // *Geoexploration*. 1978. Vol. 16 (1–2). P. 75–96. doi:10.1016/0016-7142(78)90008-X.
- Yilmaz Ö.** Seismic data analysis. SEG, Tulsa, 2001. Vol. 1. 1809 p.

REFERENCES

- Altshuler S.V., Lapan A.B., Finikov D.B.** Parametric methods of spectrum estimation in seismic exploration (In Russ.). VIEMS, Moscow, 1986. 48 p.
- Berkhout A.J.** Related properties of minimum-phase and zero-phase time functions // *Geophysical Prospecting*. 1974. Vol. 22 (4). P. 683–709. doi:10.1111/j.1365-2478.1974.tb00111.x.
- Boganik G.N., Gurvich I.I.** Seismic exploration (In Russ.). AIS, Tver, 2006. 744 p.
- Box G.E.P., Jenkins G.M.** Time series analysis: Forecasting and control. Holden-day, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, 1970.
- Denisov M.S.** Two-sided autoregressive model of a seismic trace // *Geofizika*. 1994. No. 3. P. 2–12. (In Russ.). EDN:TIHPVT.
- Denisov M.S.** How to interpret the prediction deconvolution algorithm // *Geofizika*. 1995. No. 3. P. 44–48. (In Russ.). EDN:TJIYIB.
- Denisov M.S., Finikov D.B.** A method for seismic wavelet amplitude spectrum estimation and the algorithm of "amplitude deconvolution" // *Geofizika*. 1997. No. 2. P. 17–23. (In Russ.). EDN:TNKYRB.
- Fink L.M.** Signals, noise, errors (In Russ.). Radio and Communication, Moscow, 1984. 256 p.
- Gogonenkov G.N.** Study of the detailed structure of sedimentary strata by seismic exploration (In Russ.). Nedra, Moscow, 1987. 222 p.
- Goldin S.V.** Linear transformations of seismic signals (In Russ.). Nedra, Moscow, 1974. 352 p.
- Harkevich A.A.** Spectra and analysis (In Russ.). LIBROKOM, Moscow, 2009, 236 p.
- Hurgin Ya.I., Yakovlev V.P.** Finite functions in physics and technics (In Russ.). Nauka, Moscow, 1971. 408 p.
- Kay S.M., Marple S.L.** Spectrum analysis – A modern perspective // *Proceeding of the IEEE*. 1981. Vol. 69 (11). P. 1380–1419. doi:10.1109/PROC.1981.12184.
- Kireeva A.P., Finikov D.B.** AGC and deconvolution. Wavelet shape distortions during nonlinear transformations // *Instruments and Systems of Exploration Geophysics*. 2025. No. 1 (84). P. 87–103. (In Russ.). EDN:ZBRTAG.
- Kozlov E.A., Gogonenkov G.N., Lerner B.L., Mushin I.A., Meshbey V.I., Klimovich N.I., Yankovkij I.I.** Digital processing of seismic data (In Russ.). Nedra, Moscow, 1973. 309 p.
- Levin B.R.** Theoretical fundamentals of statistical radio engineering (In Russ.). Radio and communication, Moscow, 1989. 654 p.

- Li G.F., Zhou H., Zhao C.** Potential risks of spectrum whitening deconvolution – compared with well-driven deconvolution // *Petroleum Science*. 2009. Vol. 6 (2). P. 146–152. doi:10.1007/s12182-009-0023-y.
- Ljung L.** System identification: Theory for the user. Prentice-Hall, 1999. 609 p.
- Marple S.L., Jr.** Digital spectral analysis with applications. Prentice-Hall, 1987. 495 p.
- Mitchell A.R., Stokes W.D.** Sampling and minimum phase from both a continuous and discrete point of view // *Geophysical Prospecting*. 1986. Vol. 34 (6). P. 807–821. doi:10.1111/j.1365-2478.1986.tb00494.x.
- Nikitin A.A.** Theoretical foundations of geophysical information processing (In Russ.). Nedra, Moscow, 1986. 342 p.
- Peacock K.L., Treitel S.** Predictive deconvolution: theory and practice // *Geophysics*. 1969. Vol. 34 (2). P. 155–169. doi:10.1190/1.1440003.
- Rapoport M.B.** Computing technologies in field geophysics (In Russ.). Nedra, Moscow, 1993. 352 p.
- Robinson E.A.** Predictive decomposition of seismic traces // *Geophysics*. 1957. Vol. 22 (4). P. 767–778. doi:10.1190/1.1438415.
- Robinson E.A.** Statistical pulse compression // *Proceeding of the IEEE*. 1984. Vol. 72 (10). P. 1276–1289. doi:10.1109/PROC.1984.13017.
- Robinson E., Treitel S.** Digital signal processing in geophysics // *Application of digital signal processing* (In Russ.) Mir, Moscow, 1980. P. 486–544.
- Robinson E.A., Treitel S.** Digital imaging and deconvolution: The ABCs of seismic exploration and processing. SEG, Tulsa, 2008. 424 p. doi:10.1190/1.9781560801610.
- Sheriff R.E., Geldart L.P.** Exploration seismology. 2nd ed. Cambridge University Press, 2012. 592 p. doi:10.1017/CBO9781139168359.
- Sylvia M.T., Robinson E.A.** Deconvolution of geophysical time series in the exploration for oil and natural gas. Elsevier Science, 1979. 252 p.
- Tribolet J.** Applications of short-time homomorphic signal analysis to seismic wavelet estimation // *Geoexploration*. 1978. Vol. 16 (1–2). P. 75–96. doi:10.1016/0016-7142(78)90008-X.
- Varakin L.E.** Theory of complex signals (In Russ.). Soviet Radio, Moscow, 1970. 376 p.
- Vasilenko G.I., Taratorin A.M.** Reconstruction of images (In Russ.). Radio and communication, Moscow, 1986. 302 p.
- Yilmaz Ö.** Seismic data analysis. SEG, Tulsa, 2001. Vol. 1. 1809 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки геофизических сигналов.

*Статья поступила в редакцию 11 апреля 2025 г.,
одобрена после рецензирования 15 мая 2025 г.,
принята к публикации 16 мая 2025 г.*