

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НАПРАВЛЕННОГО СУММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ. II**

**М. С. Денисов, Д. Б. Фиников**

Процедура пересчета данных, зарегистрированных на дневной поверхности, на произвольный уровень приведения называется экстраполяцией волнового поля. Наиболее типичное ее применение - погружение волнового поля и моделирование кратных волн. Подход к решению этой задачи, основанный на выводе алгоритма преобразования из двумерного или трехмерного волнового уравнения, рассмотрен, в частности, в работах [6, 7, 8]. Оператор, получаемый таким способом, осуществляет взвешенное суммирование исходных трасс с последующей одноканальной фильтрацией результата и имеет высокое быстродействие. Наиболее существенные недостатки такого алгоритма - неоптимальность условий накапливания полезного сигнала и низкая помехоустойчивость.

Понятно, что наилучшими динамическими свойствами, но минимальным быстродействием обладает оптимальный многоканальный фильтр, рассчитываемый в соответствии с требуемой кинематикой преобразования.

В первой части статьи был предложен подход, осуществляющий локальное направленное накапливание трасс в окрестности каждой точки линии суммирования оператора и компенсирующую фильтрацию суммотрассы [1]. Это позволяет существенно улучшить условия накапливания сигнала при разумном увеличении объема вычислений, т. е. обеспечивается компромиссное решение.

В силу стационарности по времени операторов продолжения поля затраты на реализацию алгоритма обычно приемлемы, а сама вычислительная схема может быть реализована в спектральной области. Подготовительным этапом к процедуре экстраполяции может быть локальное  $t$ - $p$ -разложение исходных данных (направленное суммирование в пределах ограниченной базы). На следующем этапе оператор использует результаты такого преобразования.

Как и при применении любого алгоритма, осуществляющего селекцию данных в соответствии с заданным скоростным законом, в нашем случае приходится рассматривать проблему аляйсинг-эффекта, вызванного обработкой. Особенно важным с этой точки зрения представляется первый шаг - локальное направленное суммирование. В силу специфики разрабатываемого подхода оператор экстраполяции позволяет включить весьма гибкий и эффективный метод подавления аляйсинга.

### **АЛГОРИТМ ПОДАВЛЕНИЯ АЛЯЙСИНГОВЫХ ШУМОВ**

Одним из традиционных методов, используемых для ослабления аляйсинг-эффекта, является применение так

называемого *dip filter*. На практике встречаются две основных модификации этого алгоритма: им оснащается оператор миграционного преобразования [10] или он встраивается в прямое разложение поля по плоским волнам. Основной принцип этого метода заключается в применении к исходным трассам полосового фильтра с верхней частотой среза, зависящей от производной линии суммирования (параметра  $p$  в  $t$ - $p$ -преобразовании), при этом в силу отсутствия априорной информации об углах наклона годографов полезных отражений обычно используется гипотеза их горизонтальности (если кинематика известна, наиболее эффективным становится применение оператора с тонкой настройкой апертуры). Отметим, что, хотя такой подход иногда и помогает ослабить нежелательные шумы преобразования, он обедняет спектральный состав сигнала, принадлежащего крутым синфазностям. Кроме того, малоэффективность такого подхода становится очевидной из следующего хорошо известного соображения: суммотрасса в  $t$ - $p$ -области для малого, пусть нулевого  $p$ , уже содержит аляйсинговые шумы, обычно накопленные с больших удалений в сортировке ОГТ и со всех удалений в сортировке ОПП или ОПВ, в то время как верхняя частота среза полосового фильтра равна частоте Найквиста, т. е. *dip filter* пропускает все частоты накопленного сигнала.

Таким образом, хотя реализация операторов продолжения волнового поля в  $t$ - $p$ -области улучшает условия суммирования, результат может оказаться неприемлемым в силу интенсивных шумов самого преобразования, вызванных неограниченностью базы суммирования по пространственной координате.

В этой ситуации хорошие результаты дает модификация алгоритма, использующая локальное суммирование сигналов в окрестности точек касания [12], но и такой подход имеет свои недостатки, в частности, требуется точная априорная информация о кинематике волн, что, вообще говоря, неприемлемо в задачах экстраполяции.

Преодоление проблемы аляйсинга связано либо с использованием априорной информации, которая обычно недоступна, либо с привлечением нелинейных алгоритмов анализа волнового поля. Нелинейные алгоритмы в миграционных преобразованиях имеют заслуженную репутацию весьма опасных и ненадежных, однако без них в борьбе с шумами, вызванными дискретностью наблюдений, обойтись принципиально невозможно. Суть аляйсинга, как известно, состоит в том, что в дискретном случае плоские монохромные волны определенных час-

тот и наклонов становятся неразличимыми. Поэтому приходится либо привлекать какую-либо информацию об этих наклонах, либо распознавать их при помощи решающих правил на основе гипотез о локальном, например линейном [13], поведении синфазностей.

Оператор продолжения, основанный на локальном  $\tau$ - $p$ -преобразовании (рассмотренный в первой части статьи), может быть оснащен двумя алгоритмами ослабления аляйсинговых шумов: во-первых, традиционным *dir filter*, обеспечивающим подавление высокочастотных компонент сигнала в зависимости от наклона локального суммирования и, во-вторых, схемой с адаптивным разделением сигнальной и шумовой компонент волнового поля. В основу последнего подхода положен очень простой и наглядный принцип: максимумы характеристики суммирования линейной синфазности вдоль прямолинейного направления образуют монотонно затухающую последовательность для данных, непрерывных по пространственной координате, но периодическую в дискретном случае. По положению побочных максимумов последней можно судить о тех частотных компонентах сигнала, которые осложнены пространственным аляйсингом. Таким образом, в результате направленного суммирования синфазности, годограф которой в пределах базы близок к линейному, оценка соотношения энергии входных трасс к суммотрассе, полученная в некотором низкочастотном диапазоне, не может превосходить аналогичного соотношения для высоких частот. Иными словами, зная, что аляйсинг-эффект проявляется на суммотрассе в виде локальных разрастаний ее энергетического спектра в области высоких частот и сделав предположение, что некоторый низкочастотный диапазон спектра сигнала не порождает аляйсинга, можно контролировать и редактировать соотношение амплитуд спектральных компонент трасс до и после направленного суммирования.

Теперь перейдем к формальному описанию метода. Для оценивания амплитудного спектра сигнала после суммирования нам потребуется вспомогательный алгоритм разделения волнового поля на шумовую и сигнальную составляющие. Данные до суммирования обычно содержат весьма интенсивную аддитивную помеху. Даже синфазное накопление полезного сигнала на ограниченной базе, ослабляющее нерегулярный шум, может приводить к результату с низким соотношением сигнал/помеха, тем самым оценка спектра, производимая по суммотрассе, может сильно отличаться от искомого амплитудного спектра сигнала.

Напомним, что оператор, предложенный в первой части статьи [1], осуществляет локальное направленное суммирование трасс исходного волнового поля  $w_{z_1 z_1}(x_s, x_r, t)$  в окрестности  $(-L, L)$  каждой точки  $\hat{x}$  в пределах сейсмограммы в сортировке ОПВ (ОПП):

$$d(x_s, x_r, t) = \sum_{x=-L}^L w_{z_1 z_1}(x_s, x_r - x, t + k(x)),$$

где  $z_1$  – исходный уровень наблюдения;  $x_s$  и  $x_r$  – координаты пункта взрыва и пункта

приема;  $d(x_s, x_r, t)$  – суммотрасса;  $k(x)$  – касательная к линии суммирования оператора в точке  $x_r$ , имеющая угловой коэффициент  $\alpha$ .

Так как схема реализации преобразования включает процедуру “выделения сигнала” путем локального накопления трасс с линейными сдвигами и весами  $(1, 1, \dots, 1)$ , то будем считать, что “выделение шума” вдоль этого же направления может быть осуществлено суммированием с весами  $(1, -1, \dots, 1)$ , т. е. будем считать характеристику

$$|A_{x_s x_r}^\alpha(\omega)| = \frac{1}{2L+1} \left| \sum_{x=-L}^L W_{z_1 z_1}(x_s, x_r - x, \omega) e^{j\omega \alpha x} \right| \quad (1)$$

оценкой спектра сигнала и шума в направлении  $\alpha$ , а

$$|N_{x_s x_r}^\alpha(\omega)| = \frac{1}{2L+1} \left| \sum_{x=-L}^L (-1)^x W_{z_1 z_1}(x_s, x_r - x, \omega) e^{j\omega \alpha x} \right| \quad (2)$$

оценкой шума в том же направлении, положив шаг между трассами  $\Delta x$  равным единице. Очевидно, что при наличии нерегулярного аддитивного шума оба суммирования – (1) и (2) – имеют одинаковую дисперсию шумовой компоненты, т. е. разность их квадратов

$$|G_{x_s x_r}^\alpha(\omega)|^2 = |A_{x_s x_r}^\alpha(\omega)|^2 - |N_{x_s x_r}^\alpha(\omega)|^2 \quad (3)$$

обеспечивает несмещенную оценку формы энергетического спектра сигнала.

Теперь рассмотрим, как преобразования (1) и (2) действуют на полезный сигнал. Если волновое поле состоит из линейной синфазности вида

$$w_{z_1 z_1}(x_s, x_r, t) = s(t - px_r), \quad (4)$$

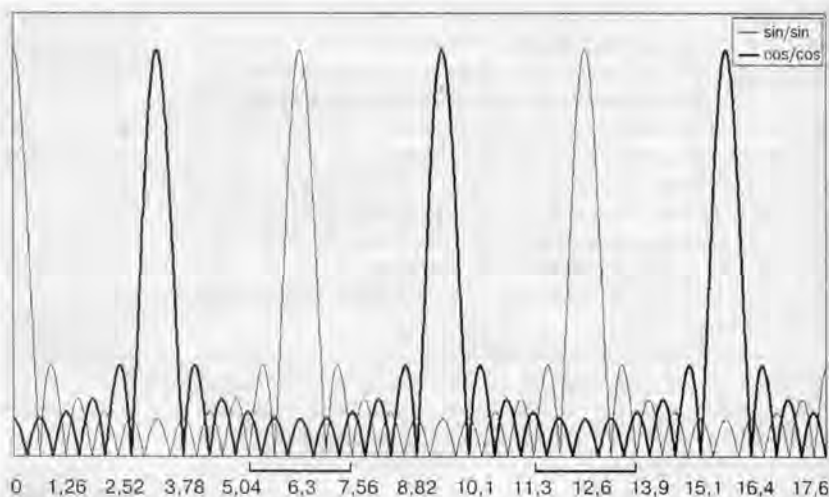


Рис. 1. Графики частотных характеристик (5) (тонкая линия) и (6) (жирная линия):

по оси абсцисс отложены значения аргумента  $\omega(\alpha - p)$ ; квадратные скобки – интервалы, подлежащие фильтрации с целью подавления аляйсинга. Частоты, на которых при суммировании сигнала (4) возникает пространственный аляйсинг соответствуют побочным максимумам функции (5) и минимумам функции (6), что позволяет получать достоверные оценки амплитудного спектра сигнала на этих частотах

то легко получить, что

$$|A_{x_s x_r}^\alpha(\omega)| = \frac{1}{2L+1} \left| S(\omega) \frac{\sin[\omega(\alpha-p)(2L+1)/2]}{\sin[\omega(\alpha-p)/2]} \right| \quad (5)$$

и

$$|N_{x_s x_r}^\alpha(\omega)| = \frac{1}{2L+1} \left| S(\omega) \frac{\cos[\omega(\alpha-p)(2L+1)/2]}{\cos[\omega(\alpha-p)/2]} \right|. \quad (6)$$

Последние частотные характеристики, как и само сочетание знакопостоянной и знакопеременной весовых функций при локальном направленном суммировании трасс, известны в теории регулируемого направленного приема (РНП), но использовались для решения несколько иных задач [8].

При синфазном суммировании сигнала ( $\alpha = p$ ) первое выражение становится равным  $S(\omega)$ , в то время как второе -  $S(\omega)/(2L+1)$ , поэтому оно обеспечивает смещенную оценку спектра шума по направлению суммирования, сходящуюся к истинному значению при увеличении базы. Однако и это смещение несущественно, так как используемая далее разность (3) обеспечивает

оценку  $|S(\omega)|^2 \left( 1 - \left( \frac{1}{2L+1} \right)^2 \right)$ , а множитель при оцени-

вании энергетического спектра не важен для анализа его аляйсинговых разрастаний в высоких частотах. Кроме того, легко видеть, что (5) отличается от (6) сдвигом аргумента на  $\pi/(\alpha-p)$ . В силу дискретности данных по латерали, обе частотных характеристики являются периодическими, что отражает эффект появления аляйсинговых шумов на высоких частотах и при больших наклонах суммирования, т. е. при больших значениях аргумента  $\omega/(\alpha-p)$ . На рис. 1 изображен пример расчета характеристик (5) и (6) для  $\alpha-p=6$  дискретов за канал,  $L=5$  и  $|S(\omega)|=1$ . Побочные максимумы функции (5), соответствующие аляйсинговым частотам, совпадают по положению с побочными минимумами выражения (6). Таким образом, будучи вычтена из оценки сигнала (5), оценка шума (6), сама порождающая аляйсинг в пределах рабочего диапазона, не искажает спектральных интервалов, подлежащих редактированию (их приблизительно положение отмечено квадратными скобками). Побочные же максимумы спектра (6) приходятся на те области характеристики (5), которые свободны от аляйсинга и не подлежат редактированию.

Отсюда получим следующий алгоритм. Выбрав некоторый низкочастотный интервал ( $\omega_1, \omega_2$ ) в области, не подверженной аляйсингу, т. е. в ней значение аргумента  $\omega_2(\alpha-p)$  не переходит в побочный максимум характеристики (5) ни при каких  $(\alpha-p)$ , будем иметь для всех наклонов  $\alpha$ , используемых при локальном  $\tau$ - $p$ -преобразовании, спектр (3) в этом диапазоне как оценку амплитудного спектра сигнала после применения направленного суммирования. Пусть нам приблизительно известен амплитудный спектр сигнала  $|U_{x_s x_r}(\omega)|$  в исходной сейсмограмме<sup>1</sup>. Получим соотношение энергий в выбранном диапазоне:

<sup>1</sup> Надо сказать, что описываемый алгоритм довольно устойчив по отношению к точности задания амплитудного спектра сигнала. На практике мы используем один спектр для всех сейсмограмм, оценку которого получаем по предварительному временному разрезу. Здесь могут использоваться способы, описанные в [9], а также и более грубые оценки

$$R_{x_s x_r}^\alpha = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |G_{x_s x_r}^\alpha(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |U_{x_s x_r}(\omega)|^2 d\omega}.$$

Тогда, если на какой-либо частоте, большей  $\omega_2$ , соотношение  $\tilde{R}_{x_s x_r}^\alpha(\omega) = |G_{x_s x_r}^\alpha(\omega)|^2 / |U_{x_s x_r}(\omega)|^2$  превосходит  $R_{x_s x_r}^\alpha$ , то будем считать, что это свидетельствует о наличии аляйсинга, и применим такое редактирование спектра суммотрассы на этой частоте, что данное условие будет выполнено, или, иначе говоря, применим к трассе-результату направленного суммирования оператор, имеющий частотную характеристику

$$F_{x_s x_r}^\alpha(\omega) = \begin{cases} 1, & \tilde{R}_{x_s x_r}^\alpha(\omega) \leq R_{x_s x_r}^\alpha \\ \sqrt{R_{x_s x_r}^\alpha} \left| U_{x_s x_r}(\omega) \right| / \left| A_{x_s x_r}^\alpha(\omega) \right|, & \tilde{R}_{x_s x_r}^\alpha(\omega) > R_{x_s x_r}^\alpha \end{cases}, \quad \omega > \omega_2$$

$$F_{x_s x_r}^\alpha(\omega) = 1, \quad \omega \in [0, \omega_2].$$

Поскольку предлагается применять не жесткое приведение к эталонному спектру, а решающее правило с пороговым значением, такой алгоритм не может внести частотных искажений, т. е. он скорее оставит часть аляйсинговых шумов, чем исказит полезный сигнал.

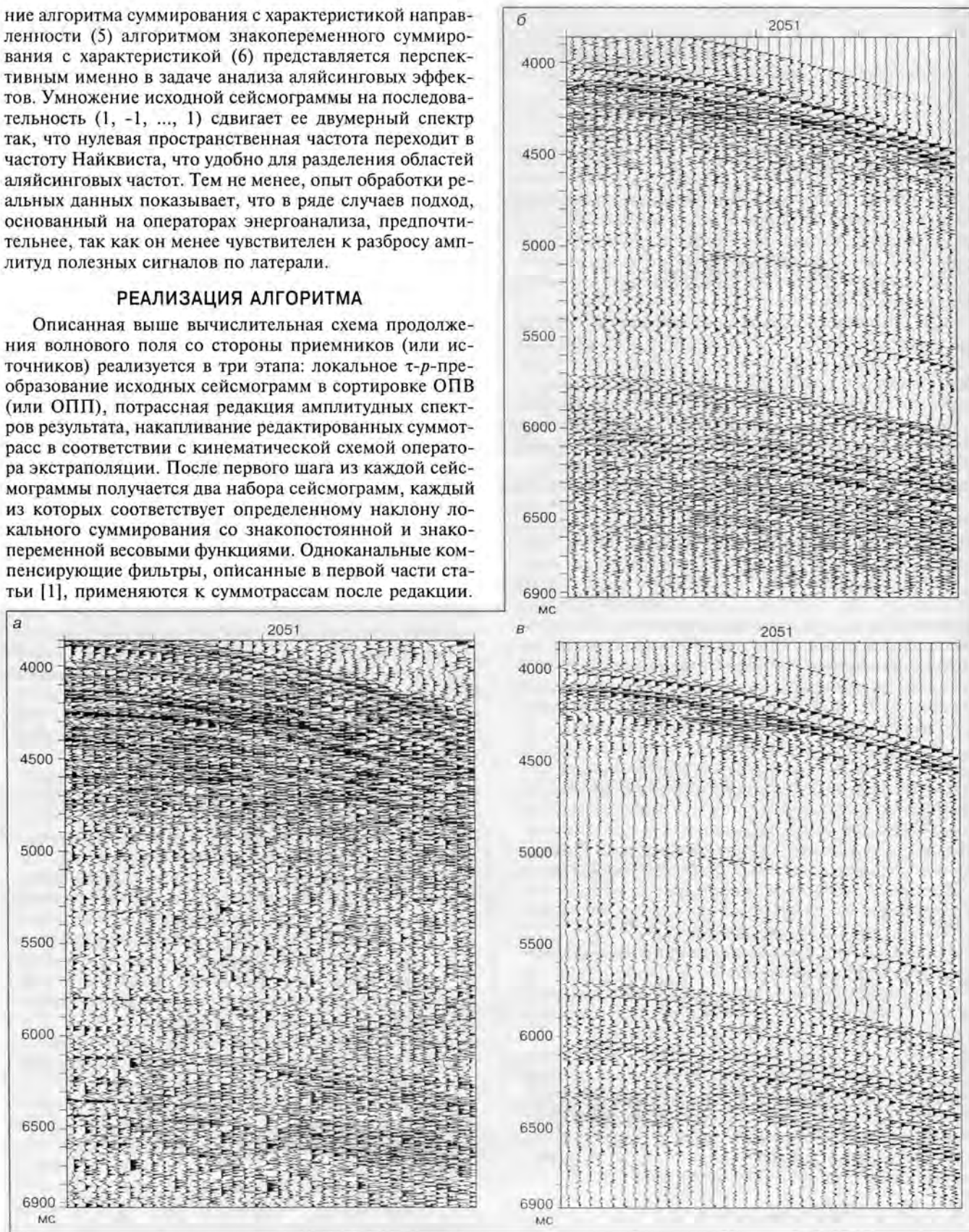
Важно иметь в виду, что, вообще говоря, на суммотрассах - элементах  $\tau$ - $p$ -разложения, в т. ч. и локального, нарушается сверточная модель: в отличие от исходной трассы накопленная суммотрасса содержит вступления сигналов различного спектрального состава. Форма каждого сигнала зависит в первую очередь от кривизны годографа синфазности, к которой он принадлежит. Можно сказать, что суммотрасса состоит из совокупности вступлений, представляющих собой исходный сигнал, свернутый с временными характеристиками суммирования годографов вдоль линейного направления. Поэтому антиаляйсинговая схема производит не деконволюцию суммотрассы, а редакцию выбросов ее амплитудного спектра с сохранением особенностей суммотрассы в той области частот, которая не подвержена аляйсингу. Кроме того, остается неизменным и фазовый спектр результата, который в основном и определяет кинематические свойства оператора экстраполяции.

В заключение этого раздела отметим, что для выделения сигнальной компоненты суммотрассы применен не вполне традиционный в этой задаче алгоритм: в таких случаях обычно используются операторы энергоанализа [5] и их модификации. Применение таких операторов возможно и в нашей задаче, опробовано нами, и результаты тестирования свидетельствуют о том, что это приводит к более жесткой редакции спектра, чем при использовании алгоритма, описанного выше. Дело в том, что, хотя все рассуждения проводятся для нерегулярного шума и регулярного сигнала, принадлежащего линейной синфазности, нужно иметь в виду, что преобразованию подвергаются сложные интерференционные записи, содержащие когерентный шум и полезный сигнал с различной формой годографа. Поэтому дополне-

ние алгоритма суммирования с характеристикой направленности (5) алгоритмом знакопеременного суммирования с характеристикой (6) представляется перспективным именно в задаче анализа аляйсинговых эффектов. Умножение исходной сейсмограммы на последовательность  $(1, -1, \dots, 1)$  сдвигает ее двумерный спектр так, что нулевая пространственная частота переходит в частоту Найквиста, что удобно для разделения областей аляйсинговых частот. Тем не менее, опыт обработки реальных данных показывает, что в ряде случаев подход, основанный на операторах энергоанализа, предпочтительнее, так как он менее чувствителен к разбросу амплитуд полезных сигналов по латерали.

### РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

Описанная выше вычислительная схема продолжения волнового поля со стороны приемников (или источников) реализуется в три этапа: локальное  $\tau$ - $p$ -преобразование исходных сейсмограмм в сортировке ОПВ (или ОПП), потрассная редакция амплитудных спектров результата, накопление отредактированных суммограмм в соответствии с кинематической схемой оператора экстраполяции. После первого шага из каждой сейсмограммы получается два набора сейсмограмм, каждый из которых соответствует определенному наклону локального суммирования со знакопостоянной и знакопеременной весовыми функциями. Одноканальные компенсирующие фильтры, описанные в первой части статьи [1], применяются к суммограммам после редакции.



**Рис. 2.** Фрагмент сейсмограммы исходного профиля (а), результат экстраполяции поля вверх, через водный слой, т. е. моделирования цуга кратных волн, связанных с дном моря при помощи традиционного алгоритма (б), и результат, полученный при помощи оператора, предложенного в настоящей статье (в)

### Результаты опробования алгоритма на реальных данных

На рис. 2, а показана часть исходной сейсмограммы ОГТ, полученной при морской сейсморазведке. Верх изображенного фрагмента соответствует вступлению первой кратной волны, отраженной от дна. При помощи двукратной экстраполяции данных через водный слой можно смоделировать поле кратных волн [8]. При этом получаются только те кратные волны, которые обусловлены наличием водного слоя, т. е. в ходе распространения которых первое или последнее отражение происходило на дне. Этот подход обобщается и на случай неоднородного приповерхностного слоя с заданной глубино-скоростной моделью, хотя в этом случае интерпретация процедуры построения модели кратных как задачи экстраполяции волнового поля не столь прозрачна. Мы не имеем возможности обсуждать здесь в подробностях эту задачу. Заметим лишь, что в сложных средах приходится рассчитывать весьма изощренную кинематическую характеристику оператора. Как и раньше, она целиком определяет фильтры преобразования.

Качество алгоритма, используемого для построения модели поля кратных волн, может существенно сказаться на эффективности следующего шага обработки - вычитания полученной модели из исходного волнового поля. Такие эффекты, вносимые процедурой экстраполяции, как нарушение соотношения амплитуд, помехи преобразования, в частности, аляйсинг затрудняют адаптацию. Современные источники сигналов, как правило,

обеспечивают широкополосный импульс, порождающий пространственный аляйсинг, особенно четко проявляющийся при обработке с использованием скоростных фильтров или их аналогов.

В данном случае модель кратных волн была образована при помощи двух алгоритмов: традиционной схемы Кирхгоффа, упомянутой в первой части статьи (взвешенное суммирование с последующей одноканальной компенсирующей фильтрацией), и алгоритма, предложенного в настоящей работе. Полученные фрагменты сейсмограмм соответственно показаны на рис. 2, б и в. Кинематически оба результата эквивалентны, и их отличие заключается лишь в динамике волнового поля. Новый алгоритм обеспечивает эффективное подавление шумов преобразования и, как следствие, более правильное соотношение амплитуд исходного поля и модели, а также лучшую динамическую выраженность записи.

Анализ спектрального состава результатов (рис. 3, б) показывает, что данные, полученные при помощи оператора Кирхгоффа, содержат больше высокочастотных компонент, которые, как видно из сопоставления изображений волновых полей, соответствуют интенсивным аляйсинговым шумам (см. также спектр, полученный по фрагменту исходных данных, представленный на рис. 3, а).

К этому же набору данных была применена процедура экстраполяции вниз, на дно моря. Традиционно такая задача решается также при помощи оператора Кирхгоффа [7], и результат этого преобразования показан на рис. 4, а. Обычно именно эти данные используются для глубинных построений ниже уровня их приведения, т. е. высокое их качество необходимо для скоростного анализа, суммирования, миграции, интерпретации и т. п. [3]. Результат, полученный при помощи нового алгоритма, отличается от традиционного лучшей динамикой отражений и низким уровнем помех (рис. 4, б).

Заметим, что так как результат экстраполяции поля вниз рассматривается как новый набор данных, то такие параметры, как максимальное и минимальное удаление, шаг между пунктами приема и другие, могут, по желанию обработчика, отличаться от соответствующих параметров исходных данных. Именно этим объясняется различное количество трасс в пределах одной сейсмограммы ОГТ до и после преобразования (здесь погружение данных сопровождалось их интерполяцией).

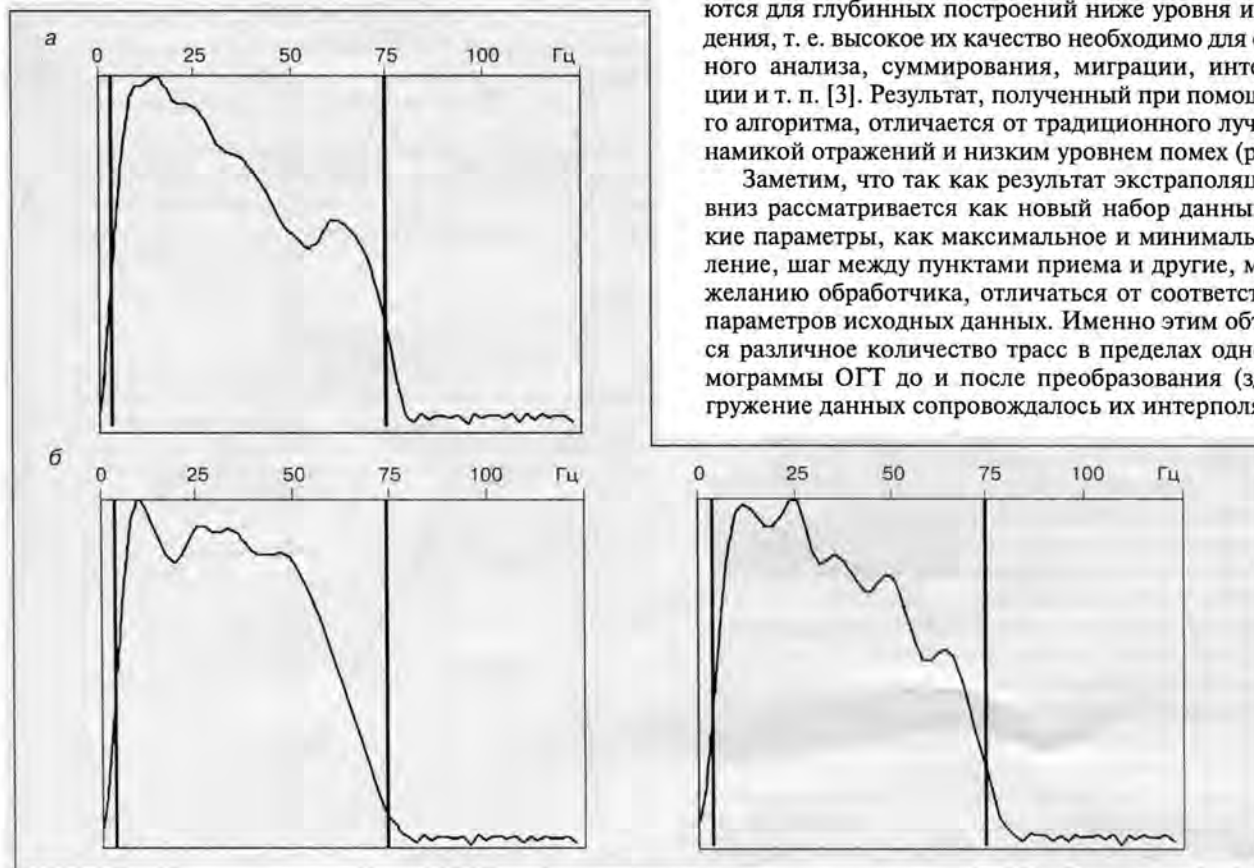
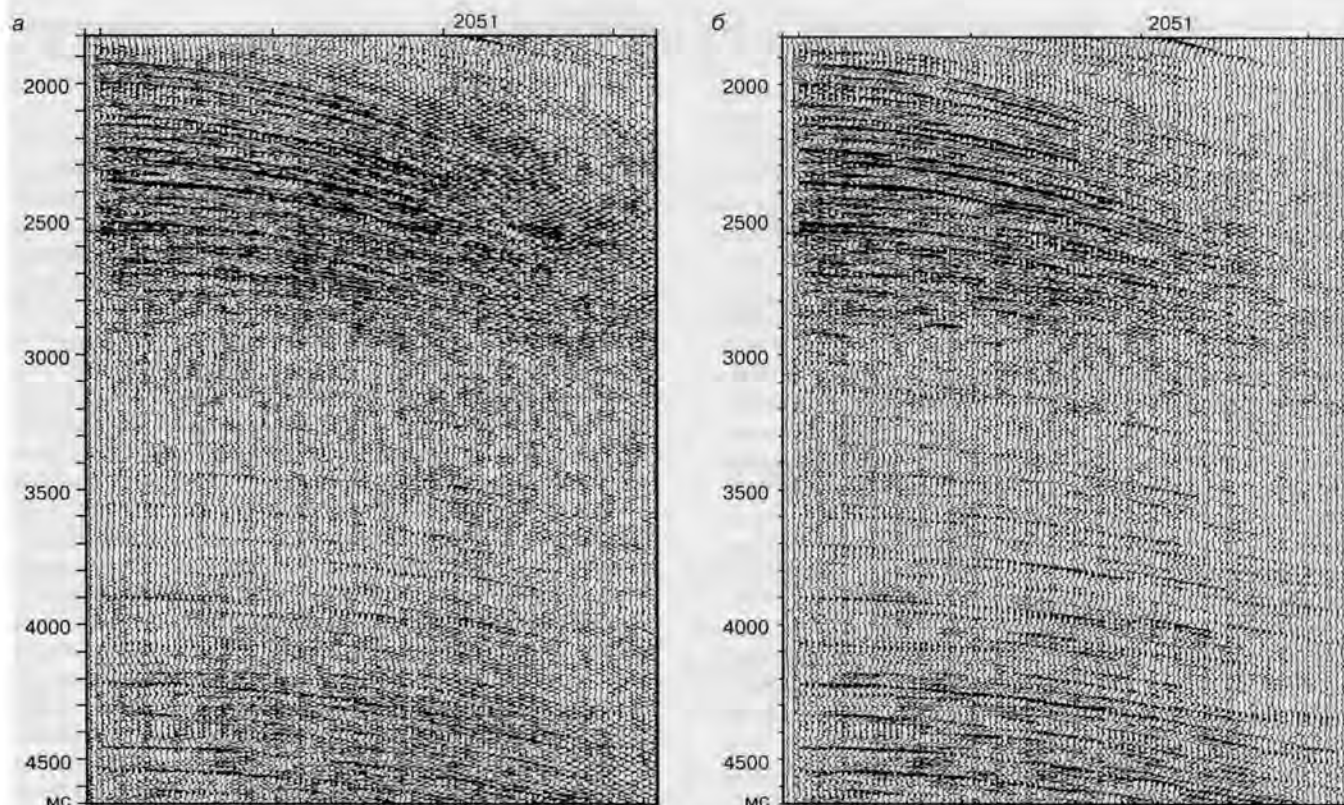


Рис. 3. Амплитудный спектр фрагмента исходной сейсмограммы (а) и оценки амплитудного спектра импульса (б), полученные по сейсмограммам, представленным на рис. 2, б (слева) и рис. 2, в (справа)



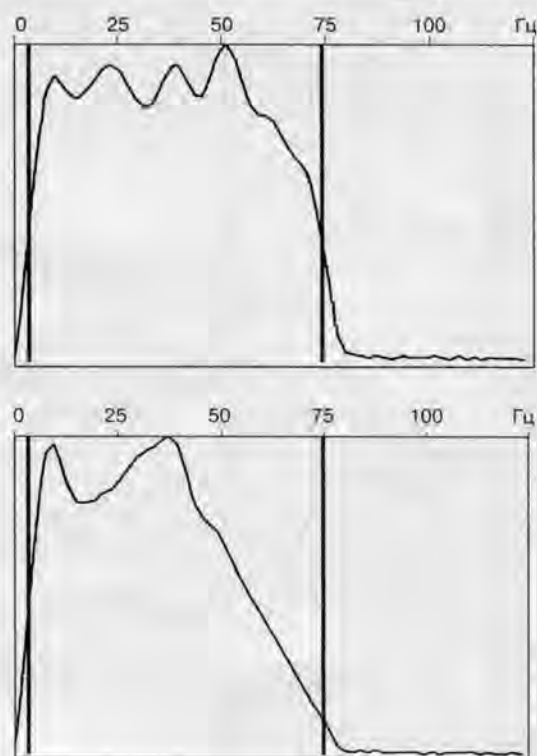
**Рис. 4.** Результат экстраполяции поля вниз, на дно моря, с помощью традиционного алгоритма (а) и оператора, предложенного в настоящей статье (б)

Спектры изображенных фрагментов (рис. 5) свидетельствуют о большей насыщенности волнового поля высокочастотными компонентами (см. рис. 4, а). Но из визуального сопоставления рис. 4, а и б следует, что этот эффект является лишь следствием интенсивных шумов преобразования, сопровождающий применение традиционного алгоритма.

Заметим также, что результат действия предлагаемой антиаляйсинговой схемы не приводит к заметному эффекту “зарегулированности записи”, т. е. подчеркиванию каких-либо синфазностей за счет подавления слабых отражений и обеднению спектрального состава, что является обычной опасностью нелинейных алгоритмов анализа и селекции волн.

В работе [3] основной акцент делался на упрощение кинематических характеристик отраженных волн после погружения волнового поля, что важно для решения обратной кинематической задачи и, в конечном счете, интерпретации сейсмических данных. Здесь уместно отметить такие свойства преобразования, как возможность интерполяции, разделения полезных волн и регулярных помех, улучшение прослеживаемости отражений. Все это, конечно, проявляется в полной мере, если удастся успешно справиться со специфическими помехами скоростных фильтров, обусловленными дискретностью наблюдений.

Описанная схема подавления аляйсинговых шумов также была включена в алгоритм преобразования Радона [9], а несколько упрощенная ее модификация позволила значительно улучшить качество результатов подавления кратных волн и экстраполяции волнового поля по данным, зарегистрированным на дне моря [11].



**Рис. 5.** Оценки амплитудного спектра импульса, полученные по сейсмограммам, представленным на рис. 3, а (сверху) и на рис. 2, б (снизу)

**Заключение**

В первой части статьи [1] был описан, а во второй опробован новый подход к построению оператора экстраполяции волнового поля. Способ занимает промежуточное положение между двумя хорошо изученными и применяемыми на практике алгоритмами, проанализированными в первой части статьи. Один из них заключается в разложении исходного поля по плоским волнам и последующей экстраполяции компонент разложения. Другой соответствует высокочастотной аппроксимации первого, а соответствующий оператор получается методом стационарной фазы. Нами предложен способ расчета оператора с использованием локальных направленных суммотрасс. Подход описан в самом общем виде, он может быть применен в любых задачах экстраполяции волновых полей. Его основные преимущества заключаются в лучшем (близком к синфазному) суммированию полезного сигнала в точках касания, а также в возможности применения эффективного алгоритма ослабления шумов преобразования. При разработке специальных приемов подавления аляйсинговых шумов был применен нетрадиционный способ разделения спектров сигналов и помех. Этот подход представляется нам весьма перспективным, хотя и требующим дальнейших исследований, дополнением стандартного  $\tau$ - $p$ -преобразования.

Получаемые данные обладают лучшими динамическими характеристиками, что делает возможным проведение более детальных глубинных построений и повышает эффективность вычитания кратных волн. Формулы для оператора выведены без использования явного выражения для годографов отражений, что позволяет учитывать различные эффекты, в частности, преломление, возникающее при распространении волн.

*Авторы признательны С. Лангману ("Геотехсистем") и Д. Локштанову (Norsk Hydro) за плодотворное сотрудничество в процессе работы, а также Ю. Харитонову ("Геотехсистем") за программную реализацию алгоритма в системе VELINK.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Денисов М. С., Фиников Д. Б., 2002, Использование локального наклонного суммирования для экстраполяции волнового поля. I: Геофизика, 1.
2. Денисов М. С., Фиников Д. Б., 1997, Способ оценивания амплитудного спектра сейсмического импульса и алгоритм "амплитудной деконволюции": Геофизика, 4, 25 - 29.
3. Глоговский В. М., Лангман С. Л., Фиников Д. Б., 1998, Погружение волнового поля - альтернатива миграции до суммирования: Нефтегаз, 165 - 171.

4. Гольцман Ф. М., 1964, Основы теории интерференционного приема регулярных волн: М., Наука.
5. Кац С. А., Птецов С. Н., 1978, Спектральный анализ поля регулярных сейсмических сигналов и помех, Изв. АН СССР, Физика земли, 1, 110 - 115.
6. Berryhill J. R., 1979, Wave - equation datuming: Geophysics, 44, 1329 - 1344.
7. Berryhill J. R., 1984, Wave - equation datuming before stack: Geophysics, 49, 2064 - 2066.
8. Berryhill J. R. And Kim Y. C., 1986, Deep-water peg legs and multiples: Emulation and suppression: Geophysics, 51, 2177 - 2184.
9. Denisov M., And Finikov D., 2002, An alias protection scheme for Radon transform: 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg. EAGE.
10. Gray S., 1992, Frequency-selective design of the Kirchhoff migration operator: Geophysical Prospecting, 40, 565 - 571.
11. Lokshantov D., Denisov M., And Finikov D., 2002, Multiple suppression and datuming with an antialiased Radon transform for sea-floor data: 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg. EAGE.
12. Schultz P. S., Claerbout J. F., 1978, Velocity estimation and downward continuation by wavefront synthesis: Geophysics, 43, 691 - 714.
13. Spitz S., 1991, Seismic trace interpolation in the f-x domain: Geophysics, 56, 785 - 794.

**ОБ АВТОРАХ****Михаил Сергеевич  
ДЕНИСОВ**

*В 1993 году окончил факультет экспериментальной и теоретической физики Московского инженерно-физического института, кандидат физико-математических наук. Работает в ООО "Геотехсистем". Занимается исследованиями в области разработки алгоритмов обработки данных сейсморазведки.*

**Дмитрий Борисович  
ФИНИКОВ**

*В 1979 году окончил Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. Губкина, кандидат технических наук. Работает в ООО "Геотехсистем". Занимается исследованиями в области разработки алгоритмов обработки данных сейсморазведки.*