

## О способах интерполяции сейсмограмм, традиционные методы и новые алгоритмы

Денисов М.С., Патрикеев П.В., Фиников Д.Б. (ООО Геотехсистем)

### **Аннотация**

Многие процедуры обработки материалов сейсморазведки основаны на суммировании трасс. Применение соответствующих алгоритмов к данным, характеризуемым редким шагом дискретизации по пространственным координатам, приводит к появлению артефактов, обычно называемых аляйсинг- шумом. Помехи такого вида снижают качество результата обработки и могут маскировать сигнал. Одним из способов ослабления аляйсинг- шума является предварительная интерполяция, т.е. пересчёт поля на более подробный пространственный шаг дискретизации. В докладе приводится краткий обзор известных методов интерполяции, анализируются их преимущества и недостатки. Предлагается новый алгоритм интерполяции, основанный на суммировании трасс по криволинейной траектории. Алгоритм снабжён схемой, позволяющей в процессе накопления сумм отделять локальные области, в которых доминирует сигнал, от областей, в которых преобладает энергия помех, и подавлять последние. Разработан оптимальный фильтр, компенсирующий искажения сигнала за счёт несинфазного суммирования, учитывающий пространственную дискретность данных. Алгоритм интерполяции может быть включён непосредственно в схемы продолжения волновых полей или миграции, применяемым к данным как 2D, так и 3D сейсморазведки. Приводятся примеры обработки модельных и реальных данных.

### Seismic data interpolation, conventional methods and new approaches

#### **Abstract**

Many seismic data processing procedures involve a spatial data summation step. Application of such schemes to coarse sampled data produces artifacts that are usually called alias noise. This noise can substantially degrade the quality might mask the signal. A possible solution to this problem is preliminary trace interpolation, i.e. decreasing of the spatial sampling increment. The presentation contains a brief review of the known interpolation schemes, their advantages and drawbacks are outlined. A new method based on trace summation along a curved trajectory is proposed. This algorithm is equipped with an alias protection tool: the zones with artifacts domination are distinguished from the zones with signal domination and are subsequently attenuated. An optimal filter to compensate for non-coherent signal summation is developed with spatial data sampling accounted for. The data interpolation algorithm proposed can be incorporated into the 2D and 3D wavefield extrapolation and migration schemes. The performance of the algorithm is demonstrated on both synthetic and real data.

### **Введение**

Пространственное суммирование сейсмических трасс является элементом многих алгоритмов обработки данных сейсморазведки. Его содержат такие процедуры, как построение разреза, миграция, продолжение волнового поля, веерная и скоростная фильтрации, прогнозирование кратных волн и др. Хорошо известно, что при этом, в силу дискретности данных по пространственной координате, результат суммирования обычно содержит так называемый аляйсинг – шум, который особенно заметен при обработке материалов, полученных с редкой или нерегулярной сетью наблюдений и, в особенности, сейсморазведки 3D.

Естественным способом улучшения качества результатов обработки является интерполяция исходных данных. Подходы к решению этой проблемы разнообразны и многочисленны. Например, в работе [6] предложено использовать локальное разложение волнового поля по плоским волнам методом подгонки модели авторегрессии в пространственно-частотной области. Недостатком процедуры является, в первую очередь, требование регулярности исходной сети наблюдений, однако сам принцип локальной аппроксимации моделью авторегрессии лег в основу целого ряда методов

интерполяции (интерполяция при помощи фильтра  $f$ - $x$  деконволюции и т.п.). Распространённым способом интерполяции является использование веерной фильтрации. Такой метод может быть реализован в  $f$ - $k$  области [5], где он обладает повышенным быстродействием, однако рассчитан на регулярный шаг между трассами в пространственно-временной области. Если расчёты производятся в  $t$ - $x$  области [4], то ограничение на регулярность шага пространственной дискретизации может быть ослаблено. Рядом преимуществ обладают способы интерполяции на основании применения операторов миграционного типа [1], [7], для реализации которых не требуется регулярности шага пространственной дискретизации.

Для всех методов важной оказывается проблема аляйсинг-помех, которые порождаются в процессе интерполяции. Эта задача решается отдельно в каждом из перечисленных алгоритмов. Хорошую работоспособность в разнообразных условиях демонстрирует подход, предложенный в работе [3]. Предлагаемый здесь алгоритм оснащён этой схемой и обладает всеми преимуществами способов, основанных на применении операторов миграционного типа, позволяя интерполировать данные, полученные на нерегулярной сети наблюдений, а также улучшать условия накопления сигнала. Пространственное суммирование трасс производится по нелинейной траектории, что может повышать качество конструктивной суммы.

### Алгоритм

Пусть необходимо осуществить интерполяцию сейсмограммы  $U(x, t)$ , сформированной в результате бинирования исходных сейсмических данных. Минимальное расстояние между соседними трассами сейсмограммы постоянно и равно  $\Delta x$ , однако реальное расстояние может быть произвольным и нерегулярным. Требуется восстановить отсутствующие трассы, добившись равномерной пространственной дискретности с шагом  $\Delta x$ . Способ интерполирования трассы  $W(\tilde{x}, t)$  имеющей пространственную координату  $\tilde{x} = n\Delta x$ , где  $n$  - целое число, заключается в следующем. Построим оператор преобразования миграционного типа, который осуществляет взвешенное суммирование трасс исходного поля с последующей одноканальной фильтрацией

$$W(\tilde{x}, t) = g(t) * \sum_{m=A_1}^{A_2} U(\tilde{x} - m\Delta x, t + \tau(m\Delta x))h(m\Delta x), \quad (1)$$

где  $g$  - фильтр,  $(A_1, A_2)$  – апертура,  $h$  - веса,  $\tau$  - траектория суммирования. Звёздочка обозначает свёртку. В качестве  $\tau$  рекомендуется использовать параболу или гиперболу. Функция  $h$  рассчитывается на основании выбранной траектории суммирования.

Интерполяция при помощи направленного суммирования (веерный фильтр) также основана на преобразовании (1), но в качестве  $\tau$  в такой схеме фигурирует линейная функция. Преимуществом параболы или гиперболы является заложенное в них свойство разделения сигнала и аляйсинг-помехи: эффект достигается за счёт односторонности характеристики суммирования локально-плоской волны по такой траектории. Проиллюстрируем это свойство алгоритма на модельных данных. На рис. 1 слева показан исходный временной разрез, в котором средствами интерполяции требуется восстановить по три отсутствующих трассы между двумя имеющимися в наличии. Результат преобразования (1), в котором в качестве  $\tau$  использовалась параболу, показан в центре. Очевидно,

что область, в которой сформирована конструктивная сумма, т.е. накоплен сигнал, отделена от области несинфазного суммирования, т.е. аляйсинг-помехи.

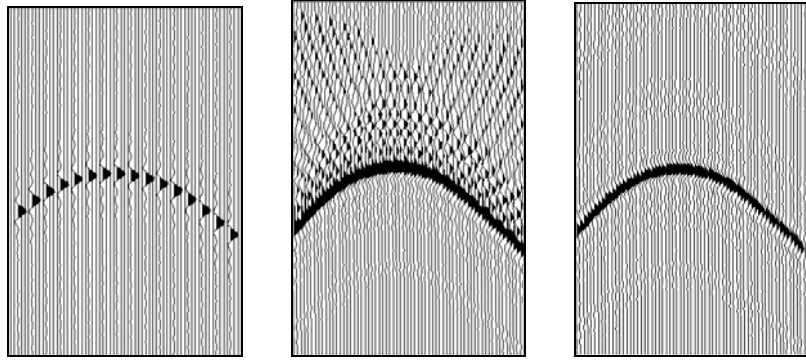


Рис. 1.

Такая специфика суммирования по криволинейной траектории обуславливает возможность разработки эффективного алгоритма подавления артефактов преобразования. С этой целью мы заимствуем метод ослабления аляйсинг-помех, предложенный в работе [3]. Алгоритм основан на замене глобального суммирования по всей апертуре на предварительный расчёт двух локальных сумм  $v^+$ ,  $v^-$  в пределах малой апертуры  $(b_1, b_2)$

$$v^+(\tilde{x}, m, t) = \sum_{n=\tilde{x}-m\Delta x+b_1}^{\tilde{x}-m\Delta x+b_2} U(n\Delta x, t + \tau(n\Delta x))h(n\Delta x), \quad v^-(\tilde{x}, m, t) = \sum_{n=\tilde{x}-m\Delta x+b_1}^{n=\tilde{x}-m\Delta x+b_2} U(n\Delta x, t + \tau(n\Delta x))\tilde{h}(n\Delta x),$$

где  $v^-$  - результат знакопеременного суммирования, т.е.  $\tilde{h}(n\Delta x) = (-1)^n h(n\Delta x)$ . Критерием для принятия решения о том, что на некотором временном интервале локальной суммы  $v^+$  артефакты доминируют над сигналом является преобладание энергии последовательности  $v^-$  над энергией  $v^+$  на этом интервале. Введём весовую функцию  $\eta(\tilde{x}, m, t)$ , амплитуда которой стремится к нулю в области, где доминирует помеха, и к единице в области, где доминирует сигнал. Применим её к  $v^+$ :  $\mathfrak{E}^+(\tilde{x}, m, t) = \eta(\tilde{x}, m, t)v^+(\tilde{x}, m, t)$ , производя умножение по координате  $t$ . Тогда перепишем (1) в виде

$$W(\tilde{x}, t) = g(t) * \sum_{m=A_1}^{A_2} \mathfrak{E}^+(\tilde{x}, m, t), \quad (2)$$

что приводит к результату, в котором подавлены артефакты. Волновое поле, полученное при помощи (2), показано на рис. 1 справа. Для получения интерполированных сейсмограмм с исходной кинематикой волн следует произвести суммирование трасс  $W(\tilde{x}, t)$  по траектории  $-\tau$ . Такую схему интерполяции мы называем «погружение-поднятие».

Отдельного обсуждения заслуживают вопросы, касающиеся построения фильтра  $g(t)$ , компенсирующего искажения формы сигнала, обусловленные несинфазным накоплением. Как правило, этот оператор получается на основании анализа высокочастотной асимптотики интегрального аналога выражения (1). Однако при его применении к данным, полученным на дискретной сети наблюдений, результаты зачастую оказываются неудовлетворительными. В работе [2] предложен метод расчёта оптимального компенсирующего фильтра, который учитывает как пространственную дискретность данных, так и свойства самого оператора преобразования (траекторию суммирования и веса). Предлагается оснастить схему (1) таким оптимальным фильтром.

На рис. 2 слева показан фрагмент исходного реального временного разреза после его прореживания (из исходного набора трасс сохранены каждая 4-я трасса, остальные трассы обнулены). Требуется восстановить обнулённые трассы.

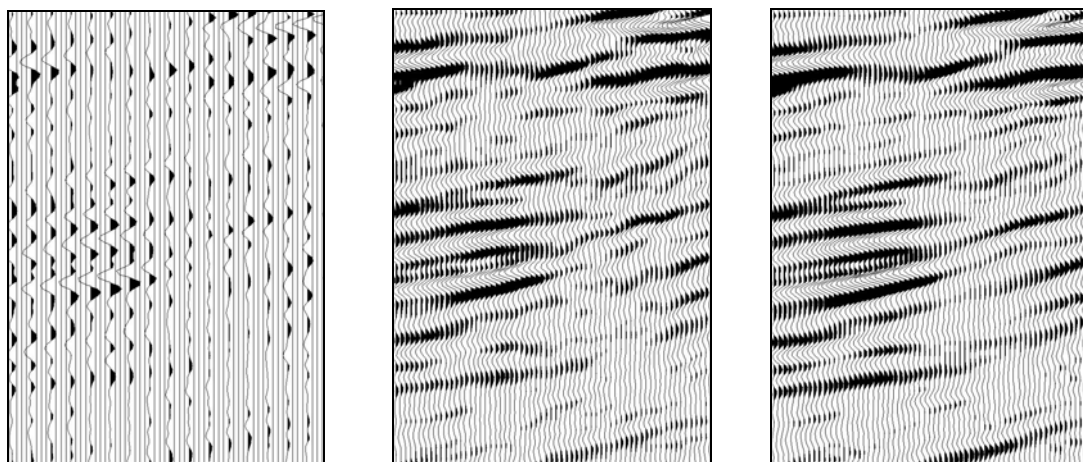


Рис. 2.

В центре представлен результат интерполяции, полученный с использованием суммирования по параболической траектории (методом «погружения-поднятия»), с применением схемы подавления аляйсинг-помехи и фильтрацией оптимальным оператором. Справа показан этот же фрагмент исходного разреза до прореживания нулевыми трассами. Очевидно, что средствами интерполяции удалось с достаточной степенью точности восстановить сигнал, сохранив все динамические и кинематические особенности волновой картины.

При обработке результатов 3D сейсморазведки важным фактором является объём исходных данных, поэтому предварительная интерполяция площадных сейсмограмм нежелательна. Предложенные средства интерполяции и оптимальной фильтрации могут быть включены непосредственно в схемы преобразования: модифицируются те фазы вычислений, на которых производится пространственное суммирование трасс: накопление (1) предлагается заменить процедурой (2).

### Литература

1. Глоговский В.М., Фиников Д.Б., 1987, Кинематические фильтры миграционных преобразований реальных сейсмических наблюдений: Сборник докладов III научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике, М., СЭВ, 338 – 344.
2. Денисов М.С., Лангман С.Л., Фиников Д.Б., 2006, Компенсирующие фильтры для трёхмерных миграционных преобразований сейсмических сигналов: Технологии сейсморазведки, **3**, 4-11.
3. Денисов М.С., Фиников Д.Б., 2005, Способ подавления шумов дискретизации при суммировании сейсмических трасс (на примере моделирования кратных волн): Геофизика, **1**, 12 - 16.
4. Bardan V., 1987, Trace interpolation in seismic data processing: Geophysical Prospecting, **35**, 343 - 358.
5. Gulunay N., 2003, Seismic trace interpolation in the Fourier domain: Geophysics, **68**, 355 – 369.
6. Spitz S., 1991, Seismic trace interpolation in the f-x domain: Geophysics, **56**, 785 - 794.
7. Trad D., 2003, Interpolation and multiple attenuation with migration operators: Geophysics, **68**, 2043 – 2054.