

## **Оптимальные кинематические фильтры в обработке сейсмических данных.**

**Рябинский Максим Андреевич, Фиников Дмитрий Борисович**

*Яндекс Терра (ООО «Сейсмотек»), Москва*

### **Введение**

Кинематическая фильтрация – известный инструмент для обработки сейсмических данных. Чаще всего этот инструмент применялся для разделения волновых полей по кинематическим параметрам, а также для прямого и обратного продолжения волновых полей. Впрочем, термин «кинематическая фильтрация» очень широк, под это понятие попадают все процедуры, построенные на селекции волн по кинематическим признакам. В данной работе речь идет о кинематических фильтрах, оптимизированных на локальную область данных и заданную геометрию наблюдений. В этом главное их отличие от широко практикуемых в обработке интегральных преобразований волновых полей. Свойство локальности обсуждаемых здесь преобразований является ключевым.

В силу ресурсоемкости и времяёмкости расчета оптимальных кинематических фильтров на локальных базах их применение на практике чаще всего ограничивалось обработкой 2D материалов. Заметим, что при работе с двумерными данными свойство оптимальности не так важно: оптимальные фильтры могут быть аппроксимированы большим количеством неоптимальных узконаправленных фильтров. Такая процедура соответствует локальному тау-пи преобразованию и используется в нашей компании довольно давно. В трехмерном случае необходимое количество узконаправленных фильтров растет квадратично (по сравнению с 2D), поэтому такой способ представляется крайне тяжело реализуемым. Естественным решением для обработки 3D данных являются кинематические фильтры с оптимизацией. Современный уровень развития компьютерных технологий и эффективные приёмы программирования позволяют создавать реализации модулей расчёта оптимальных кинематических фильтров, которые могут успешно применяться для решения задач обработки морских и наземных 3D материалов. В представляемой работе будет продемонстрировано несколько примеров использования таких программных модулей, созданных в компании Яндекс Терра.

### **Применение кинематической фильтрации для решения задач обработки**

Область приложения кинематических фильтров довольно широка. В частности, они могут быть использованы для решения таких задач, как подавление спутника при морских сейсмических исследованиях, интерполяция и регуляризация сейсмических данных, пересчет волнового поля с поверхности наблюдений на уровень дневной поверхности, подавление нерегулярных и регулярных помех, поляризация фильтрация и коррекция амплитуды за угол приёма. Для каждой из этих задач можно составить критерий для расчёта оптимального кинематического фильтра как в 2D, так и в 3D случае. Решением составленной оптимизационной задачи будет служить многоканальный фильтр, настроенный на заданную локальную базу наблюдений. Свертка зарегистрированных сейсмических трасс (выбранных на заданной локальной базе) с полученным оптимальным кинематическим фильтром доставляет решение поставленной задачи обработки в одной заданной точке на площади наблюдений.

Общая схема решения определенной задачи обработки методом кинематической фильтрации состоит из следующих этапов:

1. Вся площадь сейсмических исследований разбивается на набор перекрывающихся локальных пространственных баз заданного размера. Каждая база определяется одной выходной точкой площади и должна содержать хотя бы одну (а желательно несколько) входную трассу.
2. Для каждой локальной базы строится оптимальный кинематический фильтр, зависящий лишь от геометрии наблюдений (на данной базе), но не зависящий от

зарегистрированной сейсмической записи. Критерий оптимизации зависит от решаемой задачи обработки.

3. Для каждой локальной базы делается выборка исходных сейсмических трасс, и к ней применяется соответствующий оптимальный кинематический фильтр. В результате составляется выходной набор трасс, являющийся решением поставленной задачи обработки.
4. Фильтрация является линейной, стационарной по времени процедурой. Возможны элементы адаптивности, когда применяют несколько фильтров, получают несколько выходных наборов данных и для получения окончательного результата делают суперпозицию этих наборов с некоторым критерием адаптации. Так, например, поступают при интерполяции записей, когда нужно преодолевать естественную недостаточность информации с точки зрения теоремы отсчетов.

Основными преимуществами рассматриваемого подхода являются локальность применения и возможность расчета оптимальных кинематических фильтров для произвольной геометрии сейсмических наблюдений. Кроме того, в силу независимости критерия оптимизации от зарегистрированной записи данная методика может претендовать на возможность контроля влияния рассматриваемых процедур обработки на динамические характеристики исходных сейсмических данных, что крайне затруднительно при использовании адаптивных фильтров.

### Подавление регулярных помех методом кинематической фильтрации

Простейшим примером алгоритма обработки сейсмических данных, основанного на расчете оптимальных кинематических фильтров, является подавление регулярных помех. В данном случае задачу можно сформулировать следующим образом. Предположим, что исходное (зарегистрированное) поле с помехой  $s(x, t)$  может быть аппроксимировано набором плоских волн  $s(t - \alpha x)$  с лучевыми параметрами  $\alpha$ , лежащими в диапазоне  $[\alpha_1, \alpha_2]$ . При этом диапазон лучевых параметров, соответствующий «полезным» отражениям, равен  $[\alpha'_1, \alpha'_2]$ . Тогда критерий для поиска оптимального кинематического фильтра  $f(x, t)$ , подавляющего помеху на трассе, зарегистрированной в точке с локальной координатой  $x_0 = 0$ , используя все исходные трассы в пределах локальной базы  $x \in X$ , может быть сформулирован следующим образом:

$$J(f) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha \int_0^T dt \left( \sum_{x \in X} s(t - \alpha x) * f(x, t) - w(\alpha) s(t) \right)^2 \xrightarrow{f} \min \quad (1)$$

Здесь  $T$  – длина записи по времени,  $w(\alpha)$  – весовая функция, определяющая параметры пропускания «полезных» отражений, «\*» – означает операцию свертки по временной координате. В простейшем случае в качестве весовой функции может быть использована «прямоугольная» зависимость:  $w(\alpha) = 1$  при  $\alpha \in [\alpha'_1, \alpha'_2]$ ,  $w(\alpha) = 0$  при  $\alpha \notin [\alpha'_1, \alpha'_2]$ . Можно показать [Фиников, Рябинский, 2016, 1], что в этом случае решение оптимизационной задачи (1) сводится к решению следующей системы линейных уравнений на каждой временной частоте  $\omega$ :

$$\sum_x F(x, \omega) A(x, y, \omega) = B(y, \omega)$$

$$A(x, y, \omega) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{j\omega\alpha(y-x)} d\alpha = \frac{1}{j\omega(y-x)} \left( e^{j\omega\alpha_2(y-x)} - e^{j\omega\alpha_1(y-x)} \right)$$

$$B(y, \omega) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} w(\alpha) e^{j\omega\alpha y} d\alpha = \frac{1}{j\omega y} \left( e^{j\omega\alpha_2 y} - e^{j\omega\alpha_1 y} \right)$$

Здесь  $x, y \in X$  – пространственные координаты исходных трасс в пределах локальной базы,  $F(x, \omega)$  – преобразование Фурье искомого фильтра  $f(x, t)$  по временной координате.

Таким образом, путем решения задачи (1) для каждой пространственной координаты, соответствующей каждой входной трассе, получается набор кинематических фильтров  $f(x,t)$ , оптимизированных на заданных локальных базах, для пропускания заданного диапазона «полезных» отражений  $[a'1, a'2]$ . Далее, с целью подавления помехи каждый фильтр применяется на своей локальной базе к зарегистрированным сейсмическим трассам следующим образом:

$$V(x,t) = \sum_{y \in X} U(y,t) * f_x(y,t)$$

Здесь  $U(y,t)$  – исходные трассы,  $V(x,t)$  – результат подавления помехи, «\*» – означает операцию свертки по временной координате.

На рис.1 представлен результат применения описанной процедуры на примере сейсмограммы ОПВ (общего пункта возбуждения). Как видно из рис.1а, исходное поле заметно осложнено линейными низкоскоростными помехами, которые были сильно ослаблены в результате применения кинематической фильтрации (рис. 1б). При этом на разностной сейсмограмме до-после подавления помехи (рис.1в) можно отметить, что полезные отражения практически не были задеты.

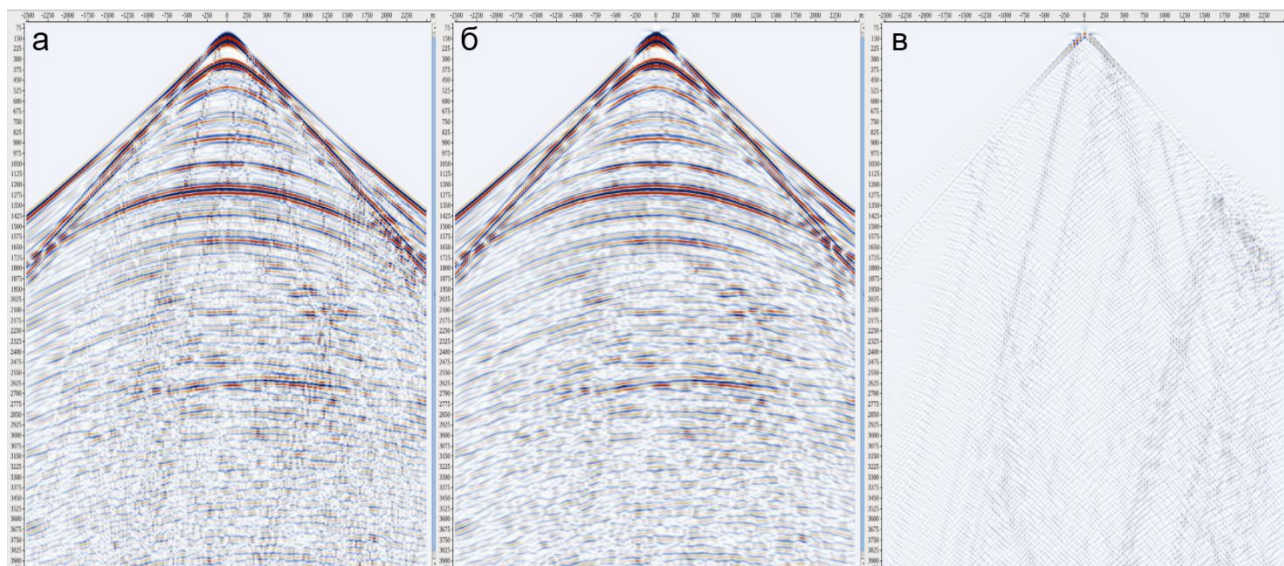


Рис 1. Исходная сейсмограмма ОПВ (а), результат подавления шума (б) и разность (в).

### Заключение

Кинематические фильтры являются достаточно гибким и в то же время довольно универсальным инструментом для обработки сейсмических данных. Так, например, в случае подавления помех в качестве функции  $w(\alpha)$  может быть задана произвольная весовая функция, что позволяет усиливать или ослаблять волны с заданными лучевыми параметрами, обеспечивая таким образом «подчеркивание» или подавление соответствующих линейных событий на исходных сейсмограммах. Кроме того, критерий типа (1) может быть расширен для учета не только линейных, но и параболических событий путем расширения базиса аппроксимации с плоских волн  $s(t-ax)$  до функций второго порядка  $s(t-ax-\beta x^2)$ . Еще раз подчеркнем, что это касается не только 2D, но и 3D данных, то есть во всех используемых в данной работе выражениях параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $x$  и  $y$  могут рассматриваться как двумерные пространственные координаты и параметры годографов.

Универсальность инструмента кинематической фильтрации вытекает из способа конструирования критерия для самого широкого круга задач. Это может быть проиллюстрировано примерами большого количества разнообразных задач обработки, которые можно решать с их помощью. Так в работах [Фиников, Рябинский, 2016, 1-3]

подробно рассматривается решение задачи подавления спутника (deghosting) при обработке морских данных, регистрируемых буксируемыми сейсмическими косами различной конфигурации (горизонтальной, наклонной и 2-х горизонтальных кос, буксируемых одна под другой). В работе [Фиников, Рябинский, 2016, 4] показан пример использования оптимальных кинематических фильтров для решения задачи интерполяции и регуляризации сейсмических данных.

Стоит также отметить, что в сочетании со стандартными процедурами обработки инструменты кинематической фильтрации становятся еще более гибкими, а их применение в некоторых случаях – более оправданным. Так в задаче подавления регулярных помех можно сначала предсказывать разные виды помех с помощью кинематических фильтров, а затем – адаптивно вычитать их из исходного поля. При решении задачи интерполяции и регуляризации данных во многих случаях стоит перед применением кинематической фильтрации сделать ввод нормальных кинематических поправок. Это позволит сузить диапазон наклонов полезных осей синфазности и стабилизировать, таким образом, решение задачи при наличии больших разрывов в геометрии исходных данных.

### **Список литературы**

*Фиников Д.Б., Рябинский М.А.* Подавление спутника при обработке морских наблюдений. Часть 1. // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 1. – С. 82–92.

*Фиников Д.Б., Рябинский М.А.* Подавление спутника при обработке морских наблюдений. Часть 2. // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 100–108.

*Фиников Д.Б., Рябинский М.А.* Подавление спутника при обработке морских наблюдений. Часть 3. // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 3. – С. 91–101.

*Фиников Д.Б., Рябинский М.А.* Кинематические фильтры для интерполяции и фильтрации морских сейсмических наблюдений. // Тезисы докладов конференции «Геокрым-2016» – 2016. – С. 131–135.