

3D кинематические фильтры в обработке сейсмических данных.
Рябинский Максим Андреевич, Фиников Дмитрий Борисович.
Яндекс.Терра (ООО "Сейсмотек"), Москва.

Кинематические фильтры – один из способов многоканальной фильтрации, предложенный в 80-е годы прошлого века В.М. Глоговским и Д.Б. Финиковым для решения задач миграционных преобразований, интерполяции данных и подавления помех. Расчет кинематических фильтров является неадаптивным (не зависящим от входных сейсмических данных) и полностью определяется кинематикой полезных волн и помех.

На прошлогодней конференции «Сейсмические технологии - 2015» был представлен доклад М.А. Рябинского, Д.Б. Финикова «Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений», в котором обсуждалось применение аппарата кинематической фильтрации для решения задачи подавления спутника при морских сейсмических наблюдениях. Был проведен анализ результатов работы данного подхода при различных системах наблюдений (с горизонтальной и наклонной приемными косами, с двумя горизонтально заглубленными косами) и в присутствии разного рода регулярных и нерегулярных помех. Кроме того, был проведен анализ зависимости результатов применения кинематической фильтрации от погрешностей в задании параметров системы наблюдений (глубины приемников и скорости в водном слое).

Для составления критерия кинематической фильтрации волны-спутника в 2D случае используется предположение о том, что регистрируемое сейсмическое поле локально (в пределах заданного числа каналов) может быть представлено в виде суммы плоских волн с лучевыми параметрами α , лежащими в заданном диапазоне $[\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}]$. Тогда каждая полезная отраженная плоская волна $s(x, t) = s(t - \alpha x)$ порождает спутник со стороны приемника $s'(x, t) = s(t - \gamma_\alpha x - \beta_\alpha)$, где γ_α – лучевой параметр волны-спутника, β_α – постоянная временная задержка спутника относительно полезного сигнала при заданном лучевом параметре α . Таким образом, зарегистрированный сигнал при каждом α представляет собой разность $s(x, t) - s'(x, t)$. Для подавления волны-спутника необходимо найти многоканальный фильтр $f(x, t)$, при свертке зарегистрированной записи с которым получится сейсмическая трасса, содержащая только полезный сигнал $s(t)$. При этом свертка производится на заданной локальной пространственной базе $x \in X$, а результирующая трасса ищется в центре данной базы, т.е. при $x = 0$. Итак, задача поиска наилучшего (в смысле среднеквадратического отклонения) фильтра на заданной пространственной базе $x \in X$ по всей длине трассы $t \in [0, T]$ в заданном диапазоне наклонов $\alpha \in [\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}]$ может быть сформулирована следующим образом:

$$J(f) = \int_{\alpha^{(1)}}^{\alpha^{(2)}} d\alpha \int_0^T dt \left(\sum_{x \in X} (s(t - \alpha x) - \sigma s(t - \gamma_\alpha x - \beta_\alpha)) * f(x, t) - s(t) \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Здесь σ – коэффициент учета спутника, соответствующий коэффициенту отражения от дневной поверхности.

Решением оптимизационной задачи (1) для каждой выходной трассы является многоканальный фильтр $f(x,t)$, который применяется ко входным сейсмограммам. В результате сейсмограмма со спутником преобразуется в сейсмограмму без спутника (рис. 1).

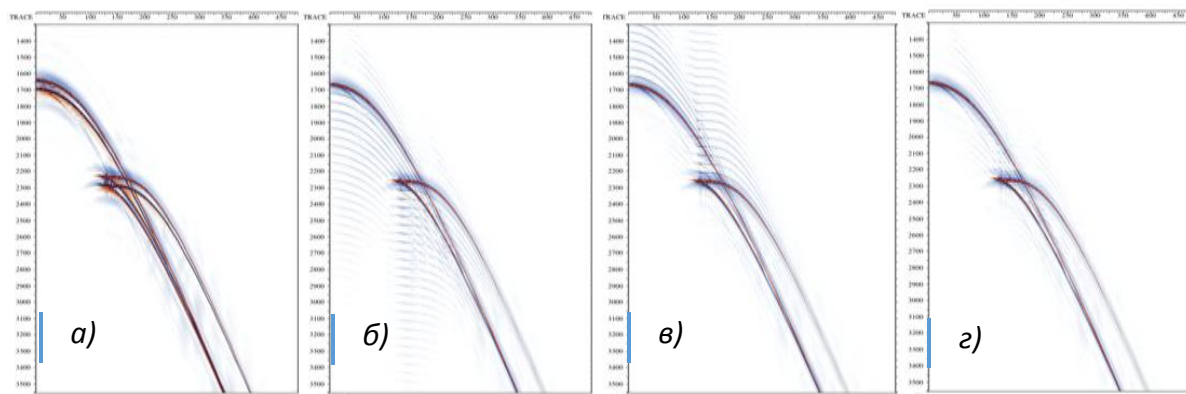


Рис. 1. Результаты кинематической фильтрации волны-спутника: а – исходная сейсмограмма со спутником, б – результат фильтрации в прямом времени, в – результат фильтрации в обратном времени, г – комбинированный результат.

На Рис. 1а представлена сейсмограмма ОПВ, рассчитанная для довольно сложной модели среды, порождающей «петлю», и содержащая некоторый уровень шума. На Рис. 1б изображен результат применения к этой сейсмограмме кинематического фильтра, полученного решением задачи (1). Здесь можно заметить, что спутник подавлен, однако проявились артефакты фильтрации, связанные с шумами на исходных данных. Эти артефакты можно подавить путем конструирования кинематического фильтра в обратном времени и адаптивного сложения получаемого с его помощью результата (рис. 1в) с результатом в прямом времени (рис. 1г).

Одновременно с подавлением спутника, методика кинематической фильтрации позволяет выполнять поднятие зарегистрированного волнового поля на дневную поверхность, что может быть полезным для дальнейшей обработки полученных данных, в частности, подавления кратных волн. Это достигается путем замены в функционале (1) выражения $s(t)$ на $s\left(t - \frac{\beta_\alpha}{2}\right)$. Кроме того, рассмотренным методом можно выполнить поднятие поля на дневную поверхность уже после подавления спутника, задав параметр ($\sigma = 0$). Аналогично имеется возможность преобразовать полученный полезный сигнал в спутник, а затем вычесть его из исходных данных с целью предотвратить потерю слабых полезных отражений, которая может возникнуть после адаптивного суммирования результатов фильтрации.

Рассмотренная методика легко обобщается на случай 3D морских наблюдений. Вид функционала (1) при этом останется без изменений, однако под лучевыми параметрами $\alpha = (\alpha_1 \ \alpha_2)$ и $\gamma_\alpha = (\gamma_{\alpha 1} \ \gamma_{\alpha 2})$, а также координатами $x = (x_1 \ x_2) \in X$ в данном случае будут пониматься двумерные величины, их произведение означает скалярное произведение

соответствующих векторов. Кроме того, для расчета задержки β_α используется более сложная зависимость, учитывающая трехмерность распространения волн.

В случае горизонтального погружения всех линий приема на заданную глубину H равенство лучевых параметров полезной волны и спутника сохраняется, т.е. $\gamma_{\alpha 1} = \alpha_1$; $\gamma_{\alpha 2} = \alpha_2$, а задержка может быть вычислена следующим образом:

$$\beta_\alpha = \frac{2H}{v} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2} - \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 \sin \varphi_2 \right)$$

где:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\alpha_1 v}{\sqrt{1 - \alpha_1^2 v^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\alpha_2 v}{\sqrt{1 - \alpha_2^2 v^2}}; \quad \sin \varphi_1 = \alpha_1 v; \quad \sin \varphi_2 = \alpha_2 v.$$

φ_1 и φ_2 – углы подхода отраженной плоской волны в проекциях на плоскость инлайна и кросслайна, соответственно.

Многоканальная фильтрация в 3D случае осложняется еще и тем, что шаг между линиями приема, как правило, существенно больше, чем расстояние между соседними приемниками, лежащими на одной линии. Следовательно, во избежание эффектов наложения пространственных частот (aliasing), перед подавлением спутника требуется выполнить интерполяцию исходных данных. Эта процедура также может быть осуществлена при помощи кинематической фильтрации путем замены в функционале (1) выражения $s(t)$ на $s\left(t - \frac{\alpha \Delta x}{k}\right)$ и комбинирования результатов, получаемых в разных диапазонах наклонов $[\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}]$. Здесь Δx – расстояние между соседними линиями приема, которое требуется проинтерполировать в k раз.

Важной особенностью алгоритма интерполяции сейсмических данных методом кинематической фильтрации является отсутствие требования регулярности исходных данных, т.е. с его помощью может быть выполнена не только интерполяция, но и регуляризация зарегистрированных сейсмограмм. Данный алгоритм состоит в следующем:

1. Рассчитать набор оптимальных кинематических фильтров, соответствующий заданному набору диапазонов наклонов. Каждый фильтр предназначен для регуляризации и интерполяции исходных данных в соответствующем диапазоне наклонов.
2. Применить каждый фильтр из рассчитанного набора к исходным нерегулярным данным. В результате будут получены наборы регулярных данных, отфильтрованные в заданных диапазонах наклонов.
3. В каждом наборе выбрать трассы, соответствующие (геометрически) исходным нерегулярным данным. Подобрать коэффициенты проецирования выбранных данных на исходные трассы.

4. Полученные коэффициенты проинтерполировать на регулярную геометрию.
5. Результирующее поле коэффициентов применить для комбинирования ответов п.2 в окончательный результат интерполяции.

На Рис. 2 представлены результаты последовательного применения процедур интерполяции и подавления спутника к модельной сейсмограмме ОПВ. Исходная сейсмограмма со спутником была рассчитана с шагом 100 метров между пунктами приема (Рис. 2а). На первом этапе проводилась интерполяция в 4 раза, в результате была получена сейсмограмма со спутником с шагом 25 метров между каналами (Рис. 4б). На втором этапе к проинтерполированным данным применялась кинематическая фильтрация волны-спутника (Рис. 4в).

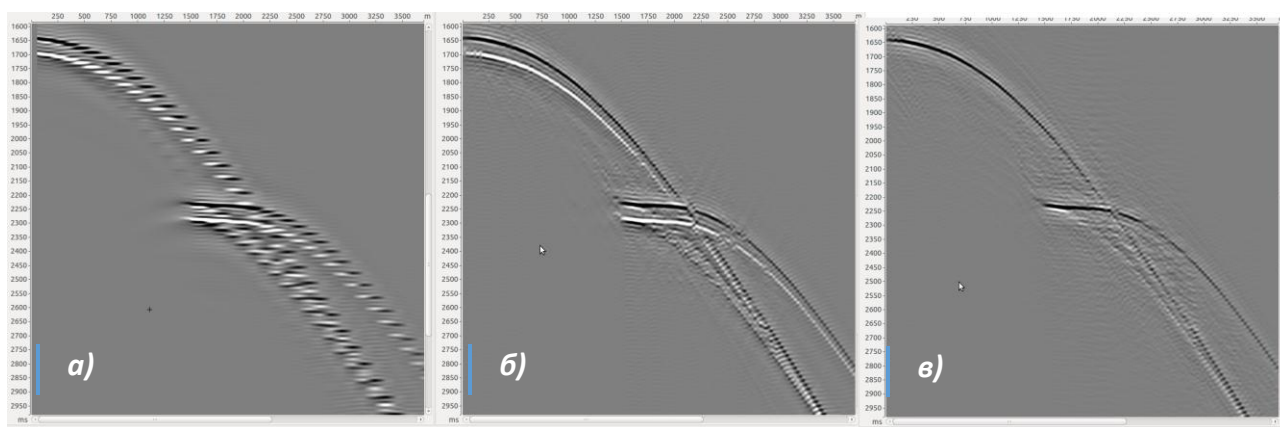


Рис. 2. Результаты интерполяции и подавления спутника методом кинематической фильтрации: а – исходная сейсмограмма со спутником и шагом 100м между каналами, б – результат интерполяции с шагом 25м, в – результат фильтрации спутника по интерполированным данным.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что методика кинематической фильтрации позволяет решать задачи интерполяции и регуляризации сейсмических данных, а также подавления спутника со стороны приёмника, при любой из наиболее применяемых в настоящее время систем однокомпонентных морских наблюдений (с горизонтальными, наклонными и парами горизонтальных кос), причём как в 2D, так и в 3D случае. Аналогичным образом кинематические фильтры могут применяться для подавления спутника со стороны источника, с той лишь разницей, что обработку следует проводить по сейсмограммам ОПП. Помимо этого, данная методика может быть использована для поляризационной фильтрации и обработки донных наблюдений.