

Кинематические фильтры для интерполяции и фильтрации морских сейсмических наблюдений.

Рябинский Максим Андреевич, Фиников Дмитрий Борисович.

Яндекс.Терра (ООО "Сейсмотек"), Москва.

В последние годы при проведении морских сейсмических исследований все чаще ставится задача получить данные, содержащие энергию полезных отражений во всей значимой полосе частот (как правило, от 1 до 100 и более Гц). В западной литературе такие данные принято называть «broadband seismic» («широкополосная сейсмика»). Основная проблема, возникающая при решении данной задачи, состоит в следующем: традиционная схема морских сейсмических наблюдений предполагает использование заглаблений как источников акустических колебаний, так и их приемников. В результате на каждом пункте приема регистрируются два вида регулярных помех, названных «волнами-спутниками» (“ghost”).

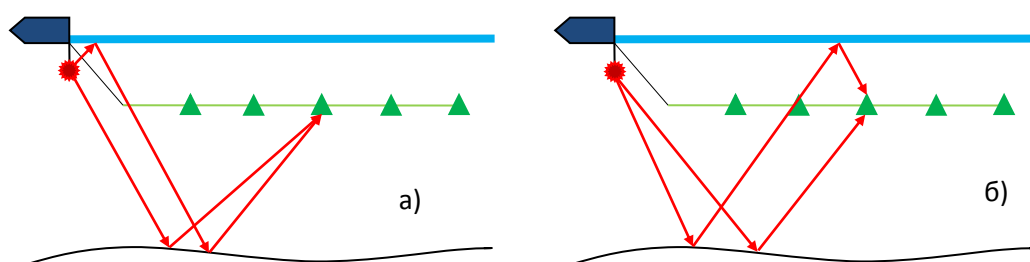


Рис. 1. Образование волны-спутника: а – со стороны источника, б – со стороны приемника.

Первый вид называется спутником со стороны источника (рис. 1а), он образуется в результате того, что акустическое колебание, распространяющееся вверх от источника, достигает дневной поверхности, отражается от нее и уходит обратно в водный слой, и далее, в глубь земной толщи, сопровождая, таким образом, полезный сигнал, который идет напрямую вниз от источника. Второй вид называется спутником со стороны приемника (рис. 1б), он образуется в результате того, что отраженный полезный сигнал, будучи зарегистрированным на заглабленном пункте приема, распространяется далее до дневной поверхности, отражается от нее и регистрируется еще раз. В силу того, что коэффициент отражения от дневной поверхности близок по абсолютной величине к 1, амплитуда спутника очень близка (по абсолютной величине) к амплитуде полезного (однократного) отражения. Таким образом каждый полезный сигнал на сейсмической записи сопровождается тремя близкими к нему по форме и амплитуде «шумовыми» сигналами: спутником от источника, спутником от приемника и спутником от источника и приемника (рис. 2).

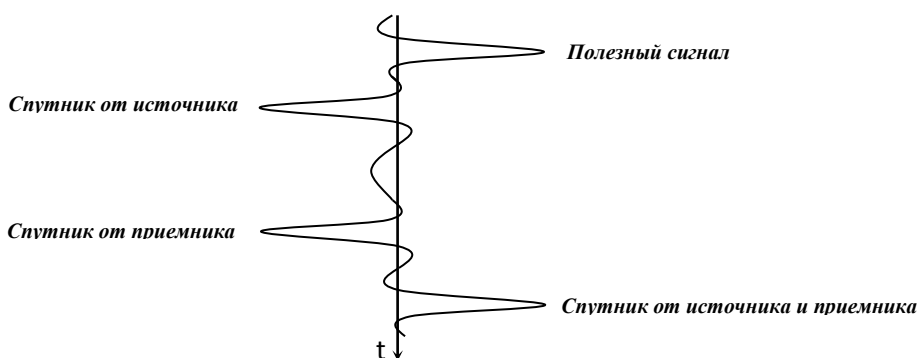


Рис. 2. Форма сигнала со спутником.

На амплитудном спектре каждой сейсмической трассы волны спутники порождают провалы в районе нулевой частоты, а также на частотах, зависящих от глубины погружения соответствующих источника и приемника, и, кроме того, от угла подхода полезной волны (рис. 3).

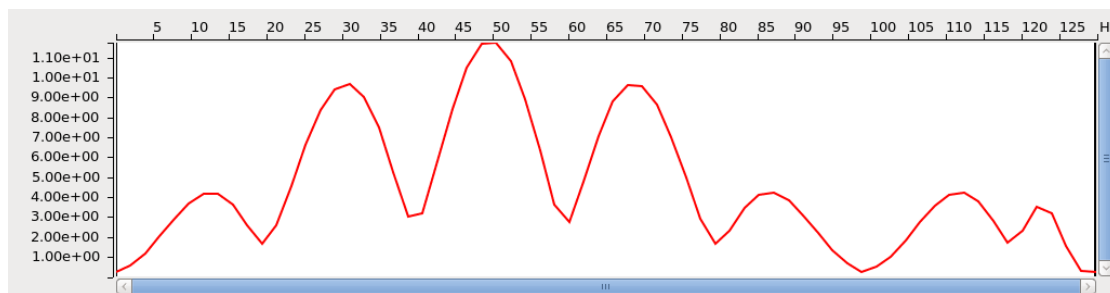


Рис. 3. Спектр сигнала со спутником.

Для получения широкополосной сейсмической записи после морских наблюдений в настоящее время применяется множество способов для подавления волн-спутников как со стороны организаторов полевых работ, так и со стороны обработчиков зарегистрированных сейсмограмм. При полевых работах все чаще используют наклонные косы (Soubaras, 2010) и многокомпонентные наблюдения (Carlson et al., 2007). При обработке однокомпонентных наблюдений чаще всего используется одноканальная фильтрация в τ -р области (Гофман, Фиников, 2014; Момоh et al., 2016). Для обработки многокомпонентных наблюдений распространена методика P-Vz-суммирования, основанная на комбинировании данных, зарегистрированных гидрофоном и геофоном (Carlson et al., 2007). Оба этих подхода имеют свои сложности и недостатки. Так, например, не вызывает сомнений тот факт, что при однокомпонентных наблюдениях с наклонной косой никакая одноканальная фильтрация не может корректно учесть зависимость временной задержки волны-спутника от угла подхода полезной волны. Это объясняется тем, что при наклонном заглублении линии приема угол подхода волны-спутника отличается от угла подхода полезной волны на одном и том же пункте приема. При обработке многокомпонентных наблюдений с помощью P-Vz-суммирования возникает задача приведения данных, зарегистрированных геофоном к данным, зарегистрированным гидрофоном, как по амплитуде, так и по форме сигнала.

Для решения обозначенных проблем может быть использован метод многоканальной кинематической фильтрации. В данной работе рассматривается применение этого метода для решения задачи подавления волны-спутника со стороны приемника при однокомпонентных наблюдениях как с горизонтальным, так и с наклонным заглублением сейсмических кос. Для подавления спутника со стороны источника рассматриваемый метод также применим, отличие состоит лишь в том, что в случае с приемниками необходимо проводить фильтрацию сейсмограмм ОПВ, а в случае с источниками – сейсмограмм ОПП. Что касается обработки многокомпонентных наблюдений, то здесь методика кинематической фильтрации может быть полезна как для решения уже упомянутой задачи приведения сигнала геофона к сигналу гидрофона, так и для выполнения поляризационной фильтрации.

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.

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.

Можно показать (Фиников, Рябинский, 2015), что при обработке данных с горизонтальным погружением косы на глубину H параметры γ_α и β_α задаются выражениями: $\gamma(\alpha) = \alpha = \frac{\sin \varphi}{v}$, $\beta(\alpha) = \frac{2H \cos \varphi}{v}$, где φ – угол подхода полезной волны к линии приема, v – скорость распространения волн в водном слое. При обработке данных, зарегистрированных на косе, заглубленной под углом θ к дневной поверхности, эти параметры равны: $\gamma(\alpha) = \frac{\sin(2\theta + \varphi)}{v}$, $\beta(\alpha) = \frac{2H \cos(\theta + \varphi)}{v}$, где H – глубина приемника, расположенного в центре рассматриваемой базы (т.е. при $x = 0$).

Таким образом, для решения задачи подавления спутника методом кинематической фильтрации при горизонтальном заглублении линии приема необходимо задать лишь глубину погружения H , скорость в водном слое v и коэффициент учета спутника ($\sigma \approx 1$). При обработке данных с наклонной косой в дополнение к этим параметрам необходимо задать угол наклона θ линии приема к дневной поверхности. В работе (Фиников, Рябинский, 2015) было показано, что рассматриваемый алгоритм, достаточно устойчив к неточностям в определении данных параметров.

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. 4).

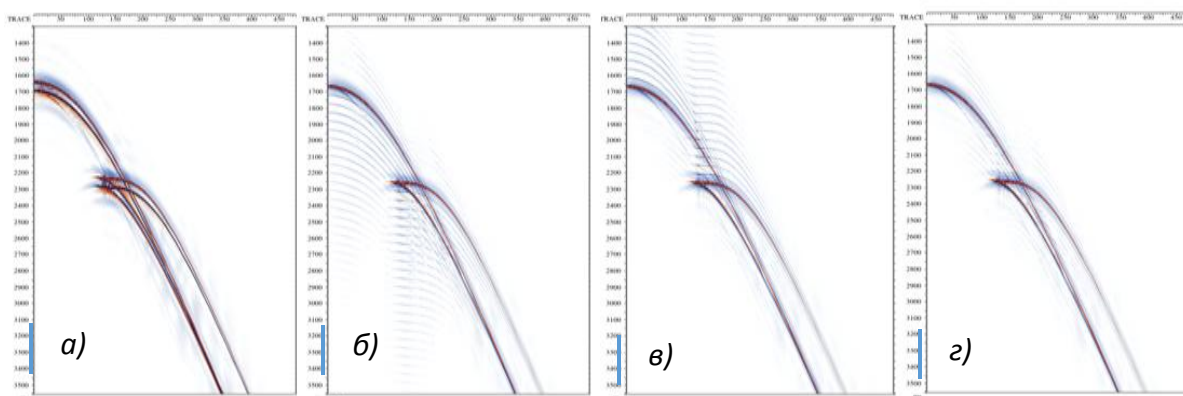


Рис. 4. Результаты кинематической фильтрации волны-спутника: а – исходная сейсмограмма со спутником, б – результат фильтрации в прямом времени, в – результат фильтрации в обратном времени, г – комбинированный результат.

На рис. 4а представлена сейсмограмма ОПВ, рассчитанная для довольно сложной модели среды, порождающей «петлю», и содержащая некоторый уровень шума. На рис. 4б 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 (Фиников, Рябинский, 2015) получаемого с его помощью результата (рис. 4в) с результатом в прямом времени (рис. 4г).

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 и 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 α и γ_α , а также координатами $x \in X$ в данном случае будут пониматься двумерные величины. Кроме того, для расчета задержки β_α используется более сложная зависимость, учитывающая трехмерность распространения волн.

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 выполнена 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.

В качестве заключения следует отметить, что кинематическая фильтрация является довольно универсальным инструментом, с помощью которого можно решать широкий круг задач, связанных с обработкой данных морской сейсморазведки.

Список литературы:

1. Carlson D., Long A., Sollner W., Tabti H., Tenganm R., and Lande N. [2007] Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer, *First Break*, 25, 71-77.
2. Soubaras R., [2010] Deghosting by joint deconvolution of migration and mirror migration. 80th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3406-3410.
3. Гофман П.А., Фиников Д.Б. [2014] Подавление волн-спутников методом адаптивной рекурсивной фильтрации. // Конференция «Сейсмические технологии-2014», Москва.
4. Momoh E., Halliday D., Ferber R. and Singh S. [2016] Low-frequency signal enhancement by pseudo-Vz deghosting, *First Break*, 34, 35-43.
5. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. [2015] Обработка данных морской сейсморазведки с наклонной косой. // Конференция «Геомодель-2015», Геленджик.
6. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. [2015] Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений. // Конференция «Сейсмические технологии-2015», Москва.