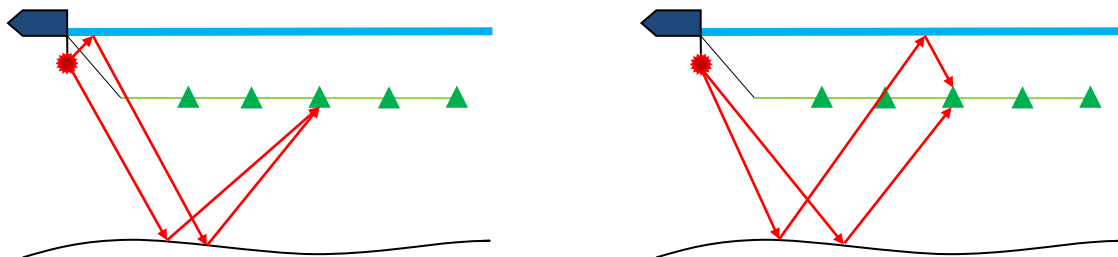


**ПРИМЕНЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ В ОБРАБОТКЕ МОРСКИХ 3D НАБЛЮДЕНИЙ**

*Рябинский М.А.\* (Яндекс.Терра, ООО «Сейсмотек»), Фиников Д.Б. (Яндекс.Терра, ООО «Сейсмотек»)*

В настоящее время при проведении сейсмических наблюдений на море, а также в процессе последующей обработки зарегистрированных записей, все чаще ставится задача получить данные, содержащие энергию полезных отражений во всей значимой полосе частот (как правило, от 1 до 100 и более Гц). Такие работы принято называть «broadband seismic» («широкополосная сейсмика»). Их выполнение сопряжено с целым рядом проблем. Одна из них связана с тем, что сейсмические исследования на море часто требуется проводить в суровых погодных условиях (например, в Арктике), в частности, в присутствии сильного ветра и волнения моря, которые приводят к появлению на сейсмической записи очень высокого уровня шумов. Зачастую эти шумы могут быть в несколько раз сильнее уровня полезных отражений. Для того, чтобы увеличить длительность полевого сезона в таких условиях, организаторы работ прибегают к использованию заглубления как источников сейсмических колебаний, так и их приемников. Заглубление системы наблюдений в свою очередь приводит к появлению на регистрируемой записи регулярной помехи, названной волной-спутником, схема образования которой приведена на рисунке 1.



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

Волна-спутник оказывает на спектр сейсмической записи влияние, подобное высокочастотной фильтрации в сочетании с применением набора режекторных фильтров, частоты подавления которых зависят от глубин источников и приемников. Естественно, назвать зарегистрированный таким образом сигнал «широкополосным» никак нельзя, поэтому были разработаны специальные системы наблюдений, а также методы обработки полевых данных, призванные ослабить влияние волны-спутника.

Говоря о модификациях систем наблюдений, следует отметить, что в настоящее время часто используют наклонные линии приема, а также многокомпонентные приборы регистрации. Кроме того, существуют примеры использования двух горизонтальных наборов линий приема (сейсмических кос), буксируемых на разных заглублениях один под другим, однако они не столь популярны ввиду технических сложностей, связанных с организацией таких работ. Подобные модификации сами по себе не решают задачу подавления спутника, так как «паразитная» волна как регистрировалась, так и регистрируется, но определенным образом трансформируют ее, позволяя в некотором смысле упростить решение на стадии обработки. В случае наклонной линии приема, волна-спутник на каждом приемнике регистрируется со своей временной задержкой, поэтому, при рассмотрении амплитудного спектра всей сейсмограммы сигнал кажется широкополосным, за исключением разве что провала на низких частотах, который остается при любом заглублении. Спектр суммарного разреза в данном случае выглядит широкополосным по той же причине. Тем не менее, если рассматривать амплитудный спектр на сейсмограммах в узкой окрестности каждой трассы, то режекторное влияние спутника становится явным. При этом современные тенденции в обработке сейсмических данных требуют выполнения все большего числа процедур (таких как подавления кратных волн, миграции и даже динамической инверсии), используя именно данные до суммирования. Получить же широкополосный сигнал в окрестности каждой трассы при наклонном заглублении линий приема едва ли проще, чем при традиционном горизонтальном заглублении.

Что касается многокомпонентных наблюдений, то здесь задача подавления спутника действительно выглядит проще. Дело в том, что гидрофон измеряет поле объемного давления, и поэтому падающие волны записываются в противофазе с восходящими, то есть полезный сигнал и соответствующий ему спутник регистрируются с разными знаками. Вторая компонента записывается геофоном, который измеряет скорости частиц среды, поэтому падающие волны регистрируются синфазно с восходящими, то есть полезный сигнал и спутник оказываются одного знака. Таким образом, простое суммирование двух трасс, зарегистрированных в одной точке двумя разными приборами, в идеальном случае позволяет избавиться от спутника. Тем не менее в реальных условиях такой идеальный случай вряд ли возможен, так как это означает, что форма сигнала и его амплитуда, регистрируемые гидрофоном и геофоном, должны быть идентичны, что зачастую нереализуемо на практике. Следовательно, здесь возникает другая задача, а именно – приведение данных, регистрируемых геофоном, к данным, регистрируемым гидрофоном, по форме сигнала и амплитуде.

В последние годы помимо традиционных морских сейсмических измерений с буксируемой косой (towed-streamer seismic) все чаще стараются применять так называемые донные наблюдения (или ОВС – ocean bottom cables). Такие наблюдения наименее подвержены влиянию погодных условий на поверхности моря и, кроме того, имеют фиксированные координаты пунктов приема, так как они не перемещаются вслед за движением судна, а располагаются по определенной схеме на дне моря. В этом случае помимо подавления спутника возникает ряд других задач, связанных с обработкой регистрируемых данных. Во-первых, расстояние между донными кабелями, как правило, в несколько раз больше расстояния между пунктами приема на одном кабеле, и составляет порядка сотен метров, поэтому прежде всего ставится задача интерполяции и регуляризации зарегистрированных сейсмограмм ОПВ. Во-вторых, при донных наблюдениях все чаще используют 4-компонентные приемники, измеряющие помимо объемного давления (гидрофон) 3 компоненты скорости (геофоны), в связи с чем возникает задача разделения зарегистрированного волнового поля по направлениям распространения его компонент (поляризационная фильтрация) с целью отделить полезные (отраженные) волны от регулярных помех.

Во всех описанных выше случаях данные регистрируются не на свободной поверхности, а на заглубленных (тем или иным образом) линиях приема, поэтому после выполнения той или иной процедуры подавления спутника встает задача приведения полученных результатов к уровню свободной поверхности – это необходимо для выполнения последующих процедур обработки, таких как, например, подавление кратных волн или миграция.

Безусловно, при современном уровне технологий, если используются трехмерные системы наблюдений (как с буксируемыми косами, так и с донными кабелями), то все описанные задачи, а именно: интерполяция, подавление спутника, поднятие на свободную поверхность, разделение волн на падающие/восходящие, поляризационная фильтрация, должны решаться при помощи трехмерных процедур обработки, то есть процедур, опирающихся на трехмерную модель измерений. В докладе [1] на примере задачи подавления спутника было показано, что в некоторых случаях недоучет размерности может приводить к появлению существенных артефактов на результатах обработки.

В данной работе для решения всех описанных выше задач предлагается использовать единый подход, основанный на методе так называемой кинематической фильтрации. В статье [2] подробно описывается решение задачи подавления спутника при различных системах однокомпонентных наблюдений с помощью этого метода. В докладах [3], [4] приводится множество примеров, демонстрирующих устойчивость применения данного метода для решения задачи подавления спутника со стороны приемника при схемах наблюдений с горизонтальным и наклонным заглублением линий приема. Здесь мы подробно остановимся на задаче интерполяции и регуляризации трехмерных сейсмограмм ОПВ, решение которой часто необходимо выполнить на этапе подготовки данных к трехмерному подавлению спутника, а также поляризационной фильтрации донных наблюдений.

Алгоритм трехмерной регуляризации и интерполяции кратко был описан в докладе [1], он состоит из следующих этапов:

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.

Далее опишем подробнее каждый из этих этапов.

Для начала рассмотрим следующую задачу: на сейсмограмме ОПВ имеется набор трасс, зарегистрированных в ПП с координатами  $x \in X$ , требуется рассчитать трассу с координатой  $x'$ . Предположим, что на заданной базе  $X$  все данные лежат в достаточно узком диапазоне наклонов  $[\alpha_1, \alpha_2]$ . Кроме того, локально (в пределах той же базы) сейсмическое поле представимо в виде суммы плоских волн. Тогда каждая плоская волна с лучевым параметром  $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$ , регистрируемая в точке  $x \in X$  на времени  $t \in [0, T]$ :  $s(x, t) = s(t - \alpha x)$ , могла бы быть зарегистрирована в точке  $x'$  с задержкой  $\Delta t = \alpha(x - x')$ , то есть  $s(x', t) = s(t - \alpha x')$ . Другими словами, для каждой плоской волны существует аналитическое решение задачи интерполяции (регуляризации). С точки зрения кинематической фильтрации, задача поиска трассы на удалении  $x'$ , зная трассы на удалениях  $x \in X$ , состоит в расчете многоканального фильтра  $f(x, t)$ , единого для всех наклонов  $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$ , такого что результат применения этого фильтра к зарегистрированным трассам имеет минимальное отклонение от аналитического решения в среднем по всем наклонам из заданного диапазона и по всем временным отсчетам записи  $t \in [0, T]$ :

$$J(f) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha \int_0^T dt \left( \sum_{x \in X} s(t - \alpha x) * f(x, t) - s(t - \alpha x') \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Можно показать, что решение оптимизационной задачи (1) в частотной области сводится к решению при каждом значении частоты  $\omega$  следующей системы линейных уравнений:

$$\sum_x F(x, \omega) A(x, y, \omega) = B(y, \omega) \quad (2)$$

где

$$A(x, y, \omega) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{j\omega\alpha(y-x)} d\alpha \quad B(y, \omega) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{j\omega\alpha(y-x')} d\alpha \quad (3)$$

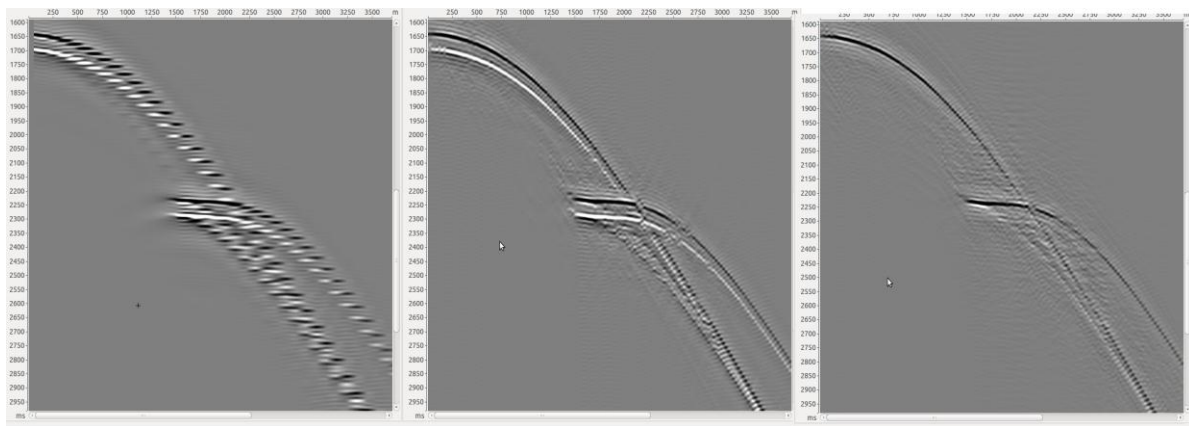
Здесь  $F(x, \omega)$  – комплексная частотная характеристика искомого фильтра (одномерное преобразование Фурье по второму аргументу функции  $f(x, t)$ ),  $x, y \in X$  – координаты исходных трасс, участвующих в получении результирующей трассы с координатой  $x'$ .

Решив систему (2)-(3) для каждой точки  $x'$  необходимой регулярной сетки, можно найти набор кинематических фильтров  $f(x, t)$ , применение которых на локальных базах  $X'$  в окрестности каждой координаты  $x'$  дает результат интерполяции (регуляризации) исходной записи в заданном (достаточно узком) диапазоне наклонов  $[\alpha_1, \alpha_2]$ . Тем не менее, зарегистрированная запись может содержать полезные отражения в достаточно широком диапазоне наклонов  $[A_1, A_2]$ , поэтому на первом этапе он разбивается на набор более узких диапазонов  $[\alpha_1, \alpha_2]$ , в каждом из которых подбирается набор оптимальных кинематических фильтров  $f(x, t)$ . Предполагается, что, если полезные отражения на некотором участке сейсмограммы ОПВ лежат в одном из заданных узких

диапазонов  $[\alpha_1, \alpha_2]$ , то результат интерполяции в этом диапазоне будет достаточно «чистым». В то же время результат интерполяции в «неправильном» диапазоне наклонов будет вносить искажения в исходную запись, но лишь в небольшой временной окрестности данного полезного отражения. Размер этой окрестности можно настраивать при помощи специальных параметров регуляризации, используемых при решении системы (2)-(3).

Таким образом, в результате выполнения п.1-2 алгоритма интерполяции из исходного набора (нерегулярных) данных будут получены несколько регулярных наборов данных, каждый из которых отфильтрован в одном из заданных диапазонов наклонов  $[\alpha_1, \alpha_2]$ . Каждая трасса исходного набора также подвергается аналогичной фильтрации, поэтому на третьем этапе алгоритма выполняется проецирование результатов этой фильтрации на исходные (нефильтрованные) трассы. Затем полученное нерегулярное поле коэффициентов проекции распространяется на нужную регулярную (по удалениям) сеть наблюдений. На данном этапе могут быть использованы различные методы одномерной или двумерной интерполяции, как линейные, так и нелинейные. Сравнение качества использования этих методов в контексте данной задачи – это тема для отдельного исследования, поэтому для начала предлагается ограничиться простой линейной интерполяцией в случае 2D наблюдений и билинейной интерполяцией в случае 3D наблюдений. Полученное регулярное поле коэффициентов проекции теперь можно применить к регулярным результатам кинематической фильтрации, суммируя их таким образом в окончательный результат интерполяции (регуляризации).

На рисунке 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 (рисунок 2а). На первом этапе проводилась интерполяция в 4 раза, в результате была получена сейсмограмма со спутником с шагом 25 метров между каналами (рисунок 2б). На втором этапе к проинтерполированным данным применялась кинематическая фильтрация волны-спутника (рисунок 2в). Полученные результаты свидетельствуют о том, что методика кинематической фильтрации позволяет решать задачи интерполяции и регуляризации сейсмических данных, а также подавления спутника со стороны приемника при любой из наиболее применяемых в настоящее время систем морских наблюдений.



**Рисунок 2.** Результаты интерполяции и подавления спутника методом кинематической фильтрации: а – исходная сейсмограмма со спутником (шаг 100м между каналами), б – результат интерполяции (шаг 25м), в – результат фильтрации спутника по интерполированным данным.

## Литература

1. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. 3D кинематические фильтры в обработке сейсмических данных. // Конференция «Сейсмические технологии-2016», 18-20 апреля 2016, Москва.
2. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. Подавление спутника при обработке морских наблюдений. Часть 1. // Технологии сейсморазведки, № 1, 2016, с.82-92.
3. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений. // Конференция «Сейсмические технологии-2015», 18-20 апреля 2016, Москва.
4. Фиников Д.Б., Рябинский М.А. Обработка данных морской сейсморазведки с наклонной косой. // Конференция «Геомодель-2015», Геленджик.