

Подавление волн-спутников методом адаптивной рекурсивной фильтрации

Гофман Павел Александрович* (ООО “Деко-геофизика”, Москва), Фиников Дмитрий Борисович (Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек», Москва)

Проблема подавления волн-спутников является одной из актуальных проблем обработки данных морской сейсморазведки. Влияние волны спутника на сейсмическую запись можно приближенно представить как сочетание фильтра высоких частот (низкие частоты ослабляются), и набора режекторных фильтров с подавляемыми частотами, зависящими от временной задержки волны спутника. Для типичной морской съемки, выполняемой с использованием кос и источников (пневмопушек), буксируемых на глубине “оптимального согласования” сигнала и спутника, ослабляемый диапазон низких частот составляет приблизительно 0-6Гц, подавляемая частота (из частотного диапазона сигнала) ~90-100Гц. Эффективное подавление волны спутника может позволить существенно улучшить информативность сейсмической записи и применимость ее для задач инверсии как в нижней части разреза (за счет восстановления низких частот), так и для целей детального изучения верхней части разреза (за счет восстановления подавленных частот в области 90-100Гц и коррекции фазового спектра сигнала для частот более 90-100Гц). Кроме того, при наличии возможности подавления волн-спутников существует возможность использовать большие заглублиения кос, с целью получить менее зашумленную запись в области низких частот. В данной работе предложен эффективный метод подавления волн-спутников, и представлен пример его применения на реальным данным морской сейсморазведки.

Задача подавления волн-спутников имеет давнюю историю. Также про нее хорошо известно, что у нее нет точного устойчивого решения при отсутствии специальных дополнительных наблюдений. Чтобы хорошо понимать сложность, которая возникает при решении данной задачи, целесообразно обсудить ее в одномерной постановке. Модель сейсмической трассы в этом случае выглядит так:

$$z(t) = p(t) - p(t - \theta) \quad (1)$$

Здесь θ - время задержки волны спутника относительно сигнала, $p(t)$ - искомая трасса без спутника. В рамках наших рассуждений будем полагать “спутникообразующую” поверхность свободной, с коэффициентом отражения $R \approx -1$. Задача нахождения $p(t)$ из $z(t)$ имеет простое решение:

$$p(t) = \sum_{i=0}^M z(t - i\theta), \quad M\theta > T \quad (2)$$

где T - длина трассы. Однако, это решение совершенно непригодно для практического использования, особенно при $\theta \ll T$. Решение (2) обычно переписывается в рекурсивной форме:

$$p(t) = z(t) + p(t - \theta) \quad (3)$$

Ни одна из форм (2), (3) (они эквивалентны) не пригодна для практической реализации, поскольку они накапливают ошибку экспоненциально. Здесь для нас важно, что они “точные”, т. е., одновременно и решают задачу, и демонстрируют невозможность ее точного решения средствами линейной фильтрации. Часто неустойчивость решения поясняют наличием нулей в частотном спектре (1), откуда сразу ясна невозможность восстановления $p(t)$ линейным стационарным фильтром. Некоторые надежды продвинуться в решении задачи связаны с нелинейными преобразованиями. Другой естественный прием – получение приближенных решений. Самый простой способ – применить к записи вместо (3) преобразование:

$$\hat{p}(t) = z(t) + q \hat{p}(t - \theta), \quad 0.8 < q < 1 \quad (4)$$

Недостатки этого решения очевидны: погрешность такого преобразования имеет вид: $\sum_i p(t - i\theta) \cdot (1 - q)^i$, т. е. от любого сигнала трассы тянется, вообще говоря, бесконечный, хотя и экспоненциально затухающий, “хвост”. Заметим, что погрешности могут быть уменьшены вдвое, если рассматривать двусторонний устойчивый фильтр. Выражение для рекурсивного фильтра в обратном времени имеет вид:

$$\check{p}(t) = -z(t + \theta) + q \check{p}(t + \theta) \quad (5)$$

Результат можно получить как: $\check{p}(t) = \frac{1}{2} \left(\hat{p}(t) + \check{p}(t) \right)$ (6)

Такой прием вдвое уменьшает амплитуду погрешности, но не влияет на ее сумму квадратов (суммарную энергию). Нелинейное преобразование, которое декларировалось выше, может быть реализовано как модификация формулы (6):

$$\check{p}(t) = \omega(t) \hat{p}(t) + [1 - \omega(t)] \check{p}(t), \quad (7)$$

где $\omega(t)$ выбирается следующим образом: если $\hat{p}(t) \approx \check{p}(t)$ на некотором временном интервале, то $\omega(t) = 0.5$, а если это условие не соблюдается, то $\omega(t)$ обратно пропорционально среднеквадратичной амплитуде $\hat{p}(t)$. Конкретный способ выбора $\omega(t)$ из описанных здесь соображений допускает различные реализации.

Мы рассматривали одномерный случай. Вообще говоря, запаздывание θ зависит от угла подхода отраженной волны к дневной поверхности. Как правило, данная сложность преодолевается переводом сейсмограмм ОПВ в область $\tau - p$. Тогда, для данного p запаздывание θ будет постоянным при условии постоянной глубины сейсмической косы.

В условиях реальной съемки глубина косы (или отдельных ее участков) может варьироваться. Даже незначительные изменения глубины косы (в пределах 1-2м) могут оказывать влияние на корректность работы фильтра подавления спутника, рассмотренного выше. Возможным решением в данной ситуации представляется использование слабопеременных параметров фильтра (θ и q). Величины θ и q можно определить в результате решения нелинейной оптимизационной задачи. Критерием оптимальности параметров в некотором локальном диапазоне τ и положения точки ОПВ (при постоянном p) может являться минимум энергии или суммарной амплитуды функции, определяемой по формуле (6). В реализованном алгоритме подавления спутника осуществляется подбор параметров в заданных окнах в подборке общего p , после чего данные параметры линейно интерполируются.

В докладе также рассматривается пример применения данного подхода к реальным данным морской сейсмической съемки. Показано, что в результате применения данного подхода удается расширить рабочий диапазон частот сейсмического разреза, в частности, в область низких частот, улучшить разрешающую способность сейсмической записи.