

LIFT: a new and practical approach to noise and multiple attenuation

LIFT: новый и практический подход к подавлению шума и кратных волн.

Jason Choo, Jon Downton, and Jan Dewar*

Джейсон Чоо, Ион Даунтон, и Ян Девар

Введение

Вероятно нет более неприятной вещи для интерпретатора сейсмических данных, чем сигнал, осложненный помехами. Это достаточно частое явление и для решения этой проблемы было разработано много алгоритмов. Обычно с помощью большинства методов пытаются разделить желаемый сигнал от нежелательного шума путем преобразований в области, где возможно математическое моделирование сигнала и помехи, и сигнал возможно отделить от помехи.

Исторически большинство методов ослабления шума обрываются на разделении шума и сигнала. То есть модель сигнала сама по себе есть результат программы подавления шума. Некоторые методы слегка продвинулись путем прибавления процентной доли от исходных входных данных. LIFT – это новая собственная методика подавления шума и кратных волн, разработанная лабораторией Core, благоприятная для сохранения амплитуд. Данная методика использует новый способ прибавления оценочного значения сигнала, удаленного в процессе моделирования сигнала вместо того, чтобы прибавлять процентную долю исходных данных. Это коренной прорыв в стратегии подавления шума. Данный подход очень гибкий, это обусловлено тем, что он может включать в себя множество областей приложения, фильтров и новых технологий и способов моделирования данных, включая технологии будущего, по мере их развития. Рассматриваемая методика улучшает сохранность сигнала, делая количественную оценку AVO и анализ свойств горных пород гораздо более надежной. Также это устойчивый метод, сохраняющий амплитуды для подготовки данных к миграции до суммирования, помогающий избежать артефактов миграции и дорогостоящих повторных процедур. Исходные амплитуды после применения LIFT достоверны и позволяют считать миграцию до суммирования и AVO реалистическими процедурами.

Современные способы ослабления шума

Для моделирования сигнала или помехи использовалось множество подходов с различными допущениями. Например, преобразование Каруен-Леве (Karhunen-Loeve) накладывает на сигнал условие одноуровненности во временной области, допуская только вариации амплитуд. Преобразование Радона более гибкое и допускает следование сигнала по различным траекториям, но несколько траекторий (гипербола, парабола и прямая) не могут полностью описать все поведение сигнала. Очень популярен для ослабления случайного шума предсказывающий фильтр в $F-X$ области. При этом используется общее допущение, что сигнал повторяет свою форму от профиля к профилю и пространственно предсказывается сверточными фильтрами.

Данное ограничение модели сигнала слабее по сравнению с другими алгоритмами ослабления помех.

Модель всегда будет несовершенной

Большинство методов подавления шума останавливаются на модели сигнала, так как модель сигнала сама по себе есть результат программы ослабления шума. Некоторые методы слегка продвинулись путем прибавления процентной доли от исходных входных данных. При этом возникает вопрос: почему прибавление долей входного сигнала, если мы знаем, что это означает, что часть того шума, который мы с таким трудом подавили, прибавляется обратно? Ответ заключается в том, что

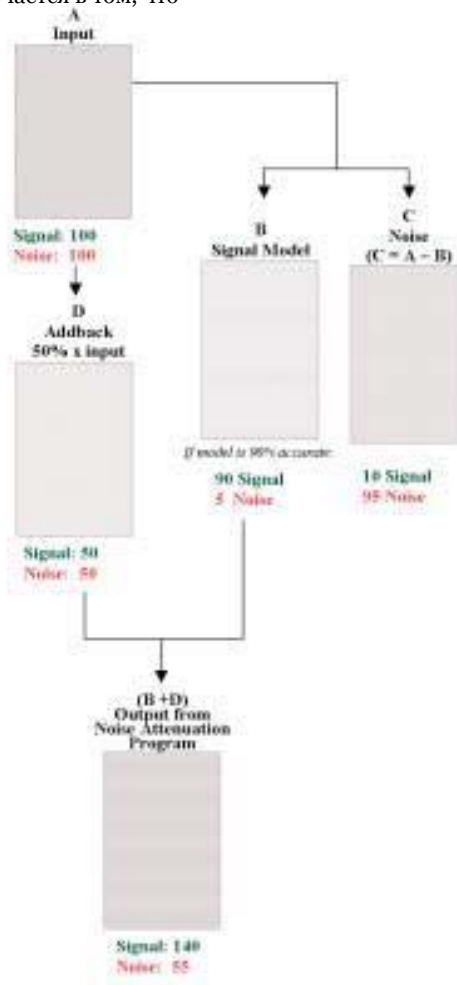


Рисунок 1. Условная схема ослабления шума при добавлении 50% исходных данных.

* Core Lab Reservoir Technologies Division, Calgary

мы знаем, что оценка сигнала несовершенна. Прибавление к входным данным [процент \times (сигнал+шум)] есть попытка восполнить недостаток того, что модель не охватывает весь сигнал полностью. Прибавление зашумленных данных – это способ уменьшить краевые эффекты и побороть пространственное размазывание и другие артефакты допущений математической модели. С практической точки зрения причина добавления состоит в превращении результата в более «реалистичный» и менее «синтетический».

Рис. 1 помогает понять, что происходит с сигналом. Исходные данные (A) включают весь сигнал и весь шум. В нашем схематичном изображении мы положили сигнал=100 и шум=100. Далее моделируем сигнал, используя некоторое математическое описание, например, $F-X$ деконволюцию. Известно, что модель сигнала всегда несовершенна. Допустим, 90% верно. Тогда сигнал оценен неверно: уровень сигнала 90 и, скажем, 5% шума.

Что у нас получится, если мы добавим процентную долю от исходных данных? После типичного добавления 50%, у выходного сигнала будет уровень 140 ($90+50=140$) и уровень шума 55 ($5+50=55$), что дает на отношение сигнал/шум = $140/55$.

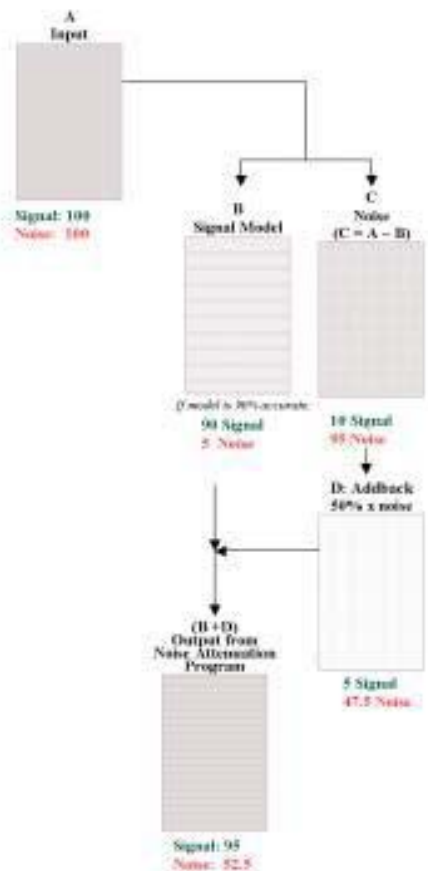


Рисунок 2. Условная схема ослабления шума при добавлении 50% смоделированного шума.

Один очевидный недостаток в том, что у нас выходной сигнал имеет уровень 140 вместо 100 исходных. При 140 сигнал не сохраняется и в действительности искажается.

Для прибавления процентной доли смоделированного шума к сигналу иногда используется другая методика (Рис. 2). Помня, что даже если наш сигнал опять достаточно точен, допустим, на 90%, смоделированный шум C будет все еще содержать часть сигнала. Если мы добавим 50% смоделированного шума, выходной сигнал будет иметь уровень сигнала 95 ($90 + 50 \times 10 = 95$) и уровень шума 52.5 ($5 + 50 \times 95 = 52.5$), что дает нам отношение сигнал/шум = $95/52.5$. Это величина меньше, чем $140/55$, но по крайней мере данная методика не изменяет сам сигнал.

Ни один из результатов не является удовлетворительным. Поэтому необходим новый подход, как сохраняющий сигнал, так и повышающий отношение сигнал/шум.

Фундаментальный прорыв

Большинство подходов для улучшения алгоритмов подавления шума сфокусированы на усовершенствовании модели сигнала. Тем не менее, ввиду того, что модель никогда не описывает сигнал идеально, действительно необходим коренной прорыв в подходах к обработке предполагаемого сигнала и моделей шума.

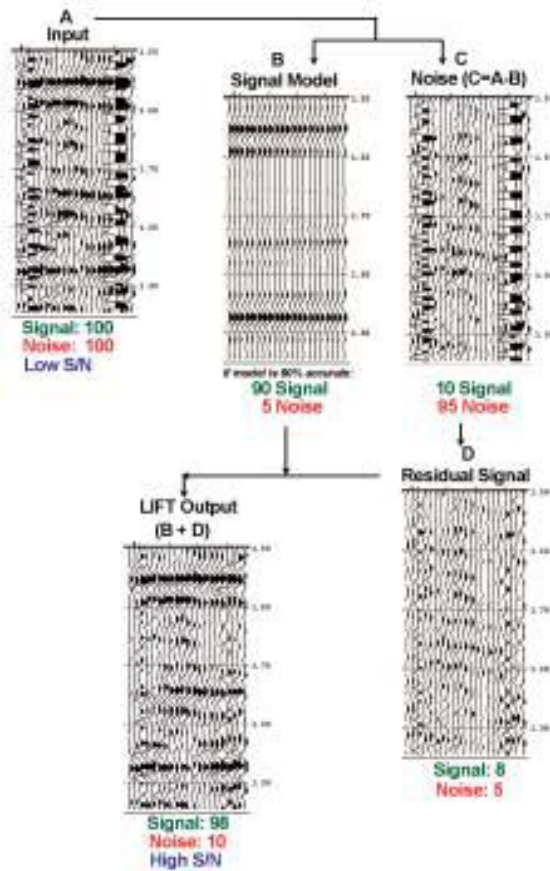


Рисунок 3. Методика LIFT. Очень упрощенная схема для иллюстрации.

Вместо того, чтобы моделировать сигнал или даже добавлять процентную долю от исходных данных, с помощью методики LIFT оценивается разностный сигнал, убраный в процессе моделирования сигнала и включается в восстановленные данные. Рисунок 3 иллюстрирует концепцию. Заметим, что по сравнению с традиционными способами ослабления шума путем добавления, LIFT увеличивает отношение сигнал/шум и лучше сохраняет сигнал. Весь подход итеративен.

Простой, но требовательный

Концепция методики LIFT очень проста, но может затребовать сложную последовательность действий для архивирования оптимальных результатов одновременно для сохранения сигнала и ослабления шума. На практике переход от модели сигнала (от шага А к В на рис. 3) может быть сложным, требующим соответствующих процедур и контроля качества в подходящих областях. Подсчет невязки осложняется выбором соответствующих комбинаций процедур, методов контроля качества и областей. Переход от шума к разностному сигналу (от шага С к D на рис. 3) может быть прост, как процедура ослабления шумовых выбросов на шаге С. Заметим, что на шаге С, то есть на части шума на входе, амплитудный уровень шума гораздо выше, чем уровень у части сигнала, присутствующего на С. Это значит, что оценка разностного сигнала может быть получена просто подавлением этих высокоамплитудных «выбросов». Для примера, любой отсчет со среднеквадратичной амплитудой в пять раз выше, чем у смежных 50 трасс может быть подавлен медианной фильтрацией. Кроме этого простого примера, могут применяться другие способы оценки разностного сигнала; должен использоваться метод наиболее подходящий к природе шума. По существу мы просто хотим способ «очистить» С. Данная процедура, как правило, итеративна.

Общая методика

LIFT – это название последовательности действий, которая производится для оценки и включения разностного сигнала в процесс восстановления данных, как показано на рис. 3. Некоторые из алгоритмов, применяемых в методике LIFT хорошо признаны, например, FX Decon (для данных, загрязненных белым шумом), FK (для линейного шума), моделирование лучей в геофонах (для шумов наземных источников), AVO инверсия (для моделирования полезных волн) или преобразование Радона (для подавления кратных волн). Выбор алгоритма зависит от природы шума. LIFT – это не один модуль: это техника ослабления шума нелинейным адаптивным способом.

Ослабление белого шума

На рисунке 5 показано сравнение отношения сигнал/шум, достигнутого при подавлении белого шума, используя методику LIFT и более традиционный подход FX Decon. Отметим, что FX Decon, популярный метод ослабления белого шума, фактически ухудшает данные. Результаты применения методики LIFT дают более высокое соотношение S/N, не страдают от смазывания и гораздо эффективнее воздействуют на зашумленную трассу.

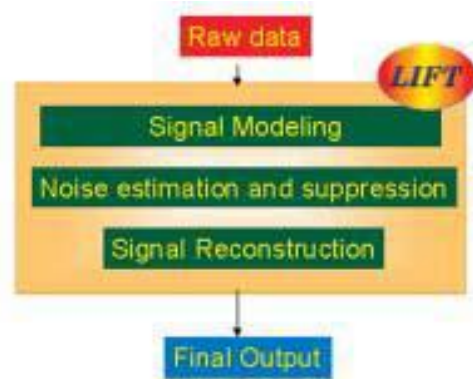


Рисунок 4. Общая схема методики LIFT

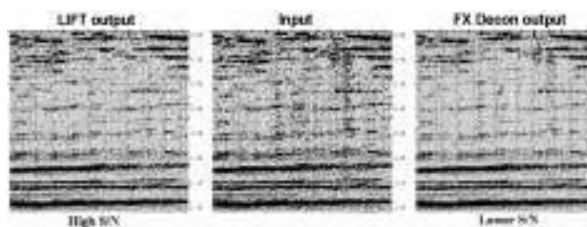


Рисунок 5. Сравнение применения методики LIFT для ослабления белого шума в сравнении с традиционными подходами на примере FXDN. Заметим, что FX Decon, популярный метод ослабления белого шума, фактически ухудшает данные. Результаты применения методики LIFT дают более высокое соотношение S/N, не страдают от смазывания и гораздо эффективнее воздействуют на зашумленную трассу.

Ослабление шума от источника

Вместе с ослаблением белого шума методика LIFT применяется к наземным данным для ослабления сложных шумов от источника. Для моделирования шума от колебаний земли обычно используется расчет полей лучей в геофоне. В ходе действий шум от источника сначала оценивается, а затем подавляется. Эффективность этого метода показана на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 изображены типичные записи общего пункта возбуждения, полученные в западной Канаде. К данным была применена лишь коррекция геометрического расхождения. На рисунке хорошо различимы звуковая волна и шум от колебания земли. На рисунке 7 изображены записи ОПВ после применения методики LIFT для подавления шума от источника. Обратите внимание, что данная методика не только сохраняет амплитуды, но и воздействует только на загрязненные трассы, оставляя трассы, которые относительно «чистые» и без существенных процедур.

Мы также считаем, что данная методика хорошо работает в таких сложных областях, как площадь Арктической дельты Маккензи – область, к которой в настоящее время возобновился интерес, но сейсмические данные, полученные там, осложнены воздействием вечной мерзлоты, морским льдом и аллювиальными отложениями, и данные характеризуются очень низким соотношением сигнал/шум. Шум обычно в той же полосе частот, что и сигнал. Это значительно осложняет работу с ним.

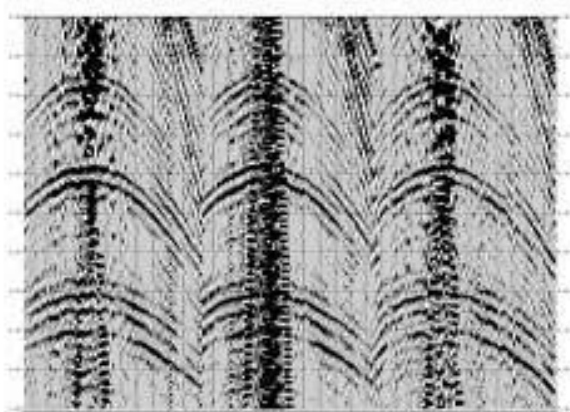


Рисунок 6. Входные данные ОПВ.

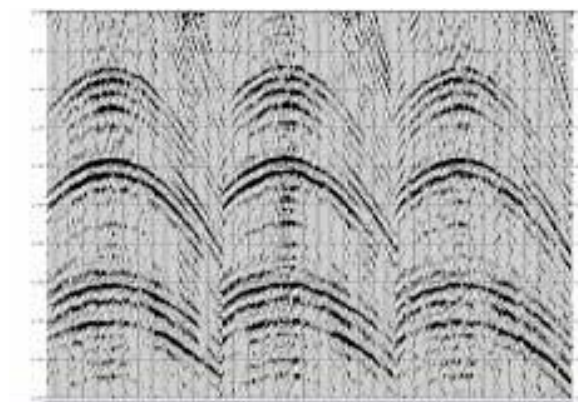


Рисунок 7. Входные данные ОПВ после подавления шума от источника с помощью LIFT.

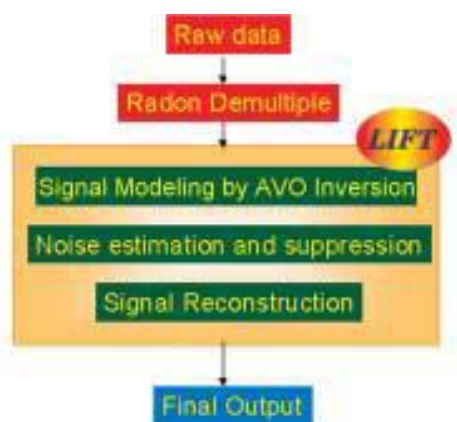


Рисунок 8. Схема подавления кратных волн.

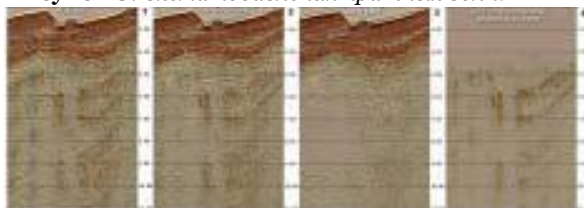


Рисунок 9. Суммированные временные разрезы исходные, после применения преобразования Радона, после применения LIFT и разница QC. В этом примере морских данных из-за резкого изменения рельефа дна годографы прихода кратных волн негиперболически и положение вершины кривой изменяется с выносом. LIFT может ослабить остаточную кратную энергию, что недоступно обычным методам, в данном случае преобразованию Радона. Отметим также энергия дифрагированных волн – необходимая для миграции до суммирования – четко сохраняется после применения LIFT.

Традиционные подходы, такие как пространственная фильтрация, работают хорошо, но результаты страдают от пространственного смазывания, и амплитуды сигнала недостаточно сохранены. Подход LIFT избавляется от шума без смазывания, искажения сигнала. Подход может быть итеративен и параметры можно подбирать в зависимости от конкретных данных.

Ослабление кратных волн

Методика ослабления кратных волн представлена на рисунке 8. Сначала применяется выбранный алгоритм подавления кратных волн, обычно метода Радона или даже SRME. Далее применяется LIFT для подавления остаточной энергии кратных волн. В ходе применения LIFT сигнал может быть смоделирован множеством способов, например, AVO-инверсией по Цепштрицу. Из-за предположений в уравнениях Цепштрица амплитуда должна плавно изменяться с разномом. В любом случае, когда кратные волны интерферируют с полезными, амплитуды изменяются резко. По Цепштрицу, AVO-инверсия считает кратные и обменные волны шумом и исключает их при восстановлении сигнала. В этом случае моделируется полезный сигнал. С этого шага прибавляется оценка сигнала, удаленного при моделировании, и происходит нелинейное адаптивное ослабление остаточной энергии кратных волн из исходных данных.

Как было выяснено, методика LIFT одинаково хорошо работает как для наземных, так и для морских данных. Рисунок 9 показывает пример подавления кратных волн на морских данных. Слева направо изображены временные суммированные разрезы исходные, после подавления с помощью преобразования Радона (для ослабления кратных волн от дна) и после применения методики LIFT. Годографы кратных волн реверберации негиперболически из-за шероховатого, быстро изменяющегося рельефа. Применение преобразования Радона предполагает, что годографы кратных волн гиперболически или параболически, и что вершина кривой годографа находится в точке нулевого выноса. Большинство стандартных методов, основанных на преобразовании Радона, не могут применяться к данным, неудовлетворяющим этим условиям. Более того, методы Радона ограничены по апертуре. Как заметил Ванг (2003), ограниченная пространственная апертура является причиной краевых эффектов, ухудшающих разделение полезных и кратных волн в области Радона (события не преобразуются, как положено в точки в пространстве $\tau - p$, а смазываются на смежные линии). Ограниченный размер пространственной апертуры сейсмической записи препятствует преобразованию Радона разделять кратные и полезные отражения.

Рисунок 9 иллюстрирует очень хорошую способность методики LIFT ослаблять остаточную энергию кратных волн. На правой части приведена разность (разница между подавлением с помощью преобразования Радона и методики LIFT), которая демонстрирует, что применение LIFT подавило почти весь шум, имеется очень маленькое просачивание шума. Последовательность очень эффективна в подавлении остаточной энергии кратных волн, с которой не справилось преобразование Радона.

Иногда возникает вопрос, сможет ли данная схема подавления кратных волн сохранить амплитуды дифрагированных волн для миграции до суммирования. Ответ очевиден из рассмотрения примера, где видно, что дифрагированные волны сохранились после обработки методикой LIFT.

В действительности, до обработки шум был в самой верхней части времен прихода дифрагированных волн, что очень осложняет их выделение.

Правильная подготовка данных для миграции до суммирования

Ввиду того, что LIFT подавляет шум и кратные волны с оптимальным сохранением сигнала, это «дружественная» к амплитудам, эффективная методика для ослабления шума перед миграцией до суммирования. Правильная подготовка данных к дорогостоящей миграции до суммирования позволяет улучшить результат путем избавления от артефактов миграции. Рисунок 10 выразительно иллюстрирует возможность избежать появления артефактов миграции до суммирования предобработкой с помощью LIFT. Необходимо помнить, что «изображение это только один шаг в ходе обработки для восстановления сейсмического отклика от недр.

Достоверная методика ослабления кратных волн – это необходимая часть обработки перед миграцией». (О'Брайн и Грэй, 1996). Использование LIFT для подготовки данных перед миграцией до суммирования избавляет от дорогостоящих перезапусков миграции.

На рисунке 11 показана важность предварительной обработки даже в случае более тонких пластов. На этом рисунке показаны данные с Западно-Канадского осадочного бассейна.

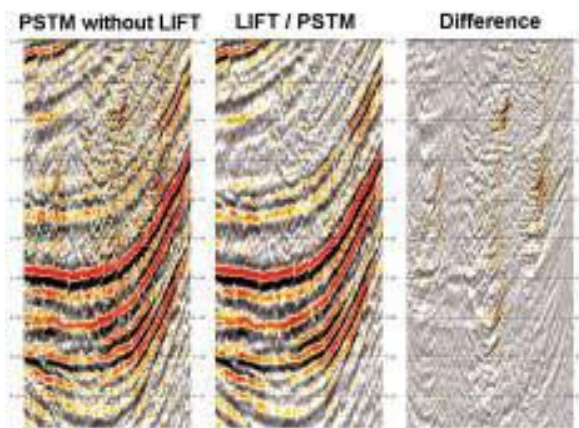


Рисунок 10. Возможности методики LIFT для сохранения сигнала при выборе способа подавления перед миграцией до суммирования.

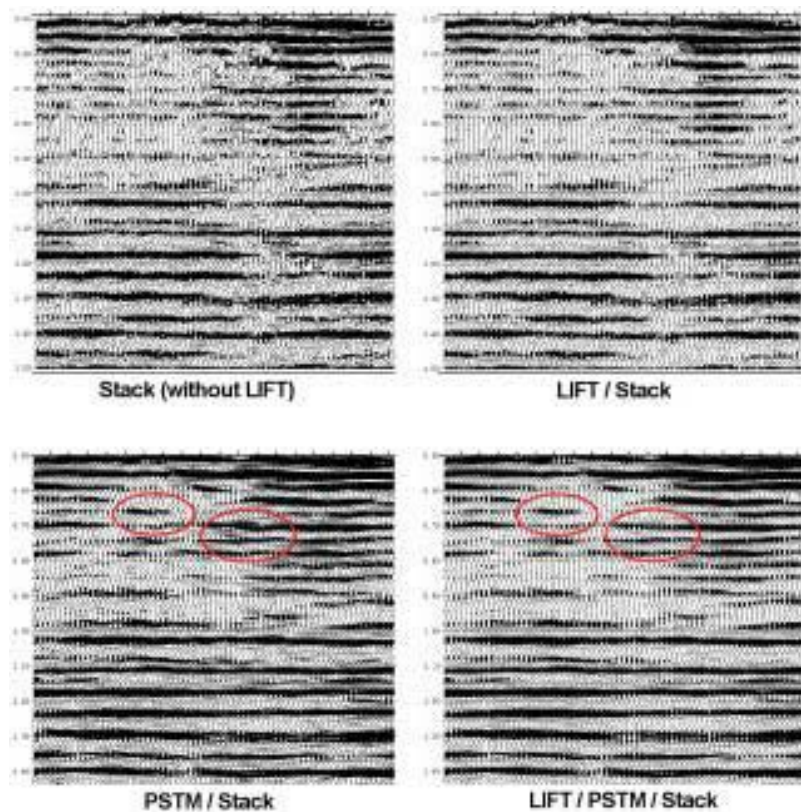


Рисунок 11. Даже в тонких пластах, предобработка с помощью LIFT может быть стоящим в деле предотвращения возникновения артефактов миграции, которые могут быть ошибочно приняты за разломы. В этом примере представлен 2D-профиль в Западной Канаде, на котором мы можем наблюдать суммированные разрезы общей средней точки до (слева) и после (справа) применения LIFT для подавления случайного шума. LIFT применяется до суммирования. На нижнем правом рисунке представлены сейсмограммы после миграции без применения LIFT, а на нижнем левом после применения LIFT.

В таких случаях артефакты миграции могут легко быть проинтерпретированы как разломы. Предобработка перед миграцией до суммирования эффективно избавляет от этой ошибки.

Заключение

LIFT – это подход к подавлению шума, который значительно отличается от обычных подходов. Методика предлагает способ подавления шума, сохраняя при этом сигнал. Данная методика применяется для подавления случайного и когерентного шума, включая сложные кратные волны. Она зарекомендовала себя как отличный способ предобработки данных перед миграцией до суммирования. Таким образом, избавляются от артефактов миграции и дорогих перезапусков.

Признательность

Авторы благодарят Валерия Мирошникову за помощь.

Список литературы и литература для дальнейшего ознакомления

Choo, J. and Sudhakar, V. [2003] LIFT: a new seismic processing technique to LIFT noise and multiples. 2003

Canadian Society of Exploration Geophysicists/Canadian Society of Petroleum Geologists Joint National Convention, Calgary, Canada, *Expanded Abstracts*.
Fatti, J.L., Smith, G.C., Vail, P.J., Strauss, P.J. and Levitt, P.R. [1994] Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique. *Geophysics* **59**, 1362-1376.
Hugonnet, P. and Canada, G. [1995] Aliasing in the parabolic Radon transform. 65th SEG Meeting, Houston, USA, *Expanded Abstracts*, 1366-1369.
O'Brien, M.J. and Gray, S.J. [1996] Can we image beneath salt? *The Leading Edge* **15**, 17-22.
Sacchi, M.D. and Ulrych, T.J. [1995] Model re-weighted least-squares Radon operators. 65th SEG Meeting, Houston, USA, *Expanded Abstracts*, 616-618.
Spitz, S. [1991] Seismic trace interpolation in the F-X domain. *Geophysics* **56**, 785-794.
Wang, Y. [2003] Multiple attenuation: coping with the spatial truncation effect in the Radon transform domain. *Geophysical Prospecting* **51**, 75-87.