

Suppression of guided waves using the Karhunen–Loeve transform

Подавление канальных волн с помощью преобразования Кархунена – Лява

Adnand Bitri & Gilles Grandjean*

Аднан Битри и Жиль Гранжан*

Введение

Каналовая волна – основной источник когерентного шума, как в наземных, так и морских данных, потому что их амплитуда гораздо сильнее, чем амплитуды отраженных волн. В случае морских данных эти волны обладают характеристиками, зависящими от глубины воды, геометрии и свойств нижних слоев. Каналовые волны диспергируют, это их основное свойство. Это значит, что на каждой частоте волны имеют разную скорость, так как небольшие и большие длины волн по-разному испытывают воздействие сейсмических свойств приповерхностных и глубинных слоев среды.

Существует возможность подавить каналовые волны фильтрацией по углам наклона, так как их годографы линейны. К сожалению, данный тип фильтрации вызывает искажение сигнала в случае, когда амплитуда каналовых волн гораздо интенсивнее, чем отраженных (Liu 1999). Предложенный в этой статье подход состоит в извлечении прямых волн сейсмограмм общего пункта возбуждения без нарушения записи отраженных волн. Данная операция проводится в три этапа для каждой сейсмограммы ОПВ:

1 изображение кривой дисперсии каналовых волн преобразованием волнового поля.

2. применение динамического линейного кинематического сдвига (DLMO) с целью выпрямить годографы волн, распространяющихся в волноводах с использованием скоростных законов, оцененных на предыдущем шаге.

3 Извлечение канальных волн из сейсмограмм ОПВ путем применения нуль-сдвигового преобразования Кархунена – Лява (К-Л), и потом вычитание их из исходных данных путем инверсии динамического линейного приращения времени.

Данная процедура описана пошагово в следующей части статьи, также проиллюстрировано и обсуждено применение к реальным данным.

Формирование алгоритма

Первый шаг состоит в определении дисперсионной кривой, то есть изменения фазовой скорости с частотой. Она рассчитывается методом наклонного суммирования сейсмограмм ОПВ, за которым следует одномерное преобразование Фурье (McMechan & Yeldin 1981; Moktar *et al.* 1988). Преобразование волнового поля в область волнового числа-частоты (v - f) может быть описано выражением:

$$U^{(N)}(f) = \sum_{j=1}^N \epsilon^{j-1} f(A^j x_1) e^{j \cdot \frac{2\pi j f t_1}{N}}, \quad (1)$$

где $A(x_i, f)$ – амплитудный спектр i -ой трассы на

выносе x , N – номер трассы в сейсмограмме, и $C(f)$ – амплитудный спектр первой трассы. Дисперсионная кривая получается пикированием максимальных значений модуля $U(v, f)$.

Нуль-сдвиговое преобразование К-Л обычно используется для выделения горизонтальных осей синфазности (Jones & Levy 1987). Как пример, Liu (1999) выравнивает каналовые волны пикированием сейсмических записей кусочно-непрерывной прямой линией, а потом использует нуль-сдвиговое преобразование К-Л для извлечения канальных волн из сейсмограмм. Процедура пикирования очень трудна и не учитывает дисперсионную природу этих волн. Для выпрямления канальных волн мы предполагаем использовать частотно-зависимый динамический кинематический сдвиг (DLMO) (Park *et al.* 1998), рассчитываемый по скоростной функции, определенной из наблюдаемой дисперсионной кривой. DLMO коррекция может быть применена в частотной области с использованием выражения:

$$U_c(x, f) \sim e^{i \frac{2\pi f x}{c}} U_0(x, f), \quad (2)$$

где $U_o(x, f)$ – преобразование Фурье каждой трассы, $U_c(x, f)$ – скорректированная сейсмограмма, x – вынос, v – фазовая скорость на частоте f . После DLMO, годограф каналовой волны становится горизонтальным. Нульсдвиговое преобразование K-L может быть использовано для извлечения каналовых волн из сейсмограмм, и затем вычитания их из исходных данных. Для удобства, это преобразование представлено в матричном виде. Нульсдвиговая ковариационная матрица составляется из DLMO-преобразованных данных, обозначенных матрицей \mathbf{X} (Jones and Levy 1987) и выражается как

$$+ \mathbf{X}\mathbf{X}^T, \quad (3)$$

где сейсмоотрассы $x(t)$ - это строки матрицы \mathbf{X} , а индекс T обозначает транспонирование. ковариационная матрица симметрична и имеет размер $n \times n$, где n - это номер трассы в сейсмограмме. Мы можем свести ковариационную матрицу к ее диагональной форме посредством спектрального разложения

$$+ \mathbf{R} \mathbf{R}^T, \quad (4)$$

где столбцы \mathbf{R} – собственные вектора, а диагональная матрица, состоящей из собственных векторов, расположенных по

* BRGM, - ARN, 3 Avenue C. Guillemin BP 6009, Orleans, Cedex 2, France

возрастанию. Главные компоненты данных находятся в строках матрицы

$$\mathbf{R}^T \mathbf{X} \quad (5)$$

Таким образом восстанавливается матрица Ψ' с использованием только m строк Ψ , то есть главные компоненты – это те, которые связаны с максимальными собственными векторами m , и помещаются нули в оставшиеся $n-m$ строки, что ведет к сохранению только сильных горизонтальных сигналов и фильтрация остальных. Из (5), каналовые волны \mathbf{X}' и остальная часть сейсмического сигнала \mathbf{X}'' после DLMO-преобразования можно хорошо аппроксимировать

$$\mathbf{X}' \approx \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{X} \quad (6a)$$

$$\mathbf{X}'' \approx \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{X} \quad (6b)$$

Наконец, каналовые волны \mathbf{X}' вычитаются из исходных данных \mathbf{X} перед применением обратного DLMO-преобразования. Эту процедуру можно рассматривать как разделение волнового поля, для которого прямые волны и остальная часть сейсмического сигнала может быть представлена, соответственно

$\text{DLMO}^{-1}(\mathbf{X}')$ и $\text{DLMO}^{-1}(\mathbf{X}'')$.

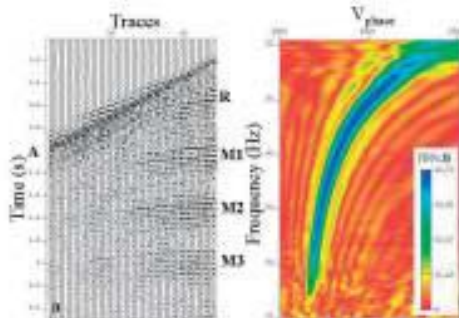


Рисунок 1 (а) Сейсмограмма ОПВ морских сейсмических данных включающих высоко-амплитудные каналовые волны (А), отраженные R и долгопериодные кратные волны M1, M2 и M3; (б) относительная дисперсионная диаграмма. Локальный максимум амплитуды $|U(v, f)|$ – это оценка дисперсионной кривой прохода каналовых волн.

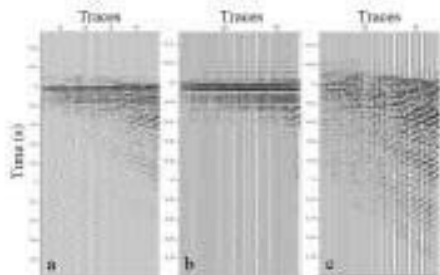


Рисунок 2 (а) Сейсмограмма с рис. 1 (а) после применения DLMO, рассчитанного по скоростному закону, определенному из дисперсионной кривой Fig.1(b), (б) каналовая волна, извлеченная преобразованием K-L, и (с) разница между ними.

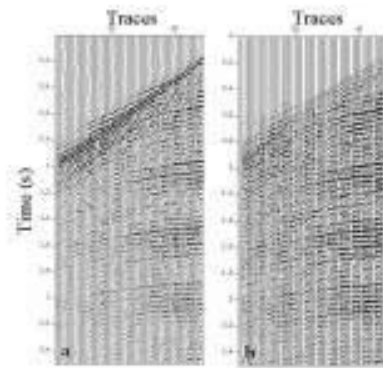


Рисунок 3 (а) Исходные данные и (б) обработанные данные после вычитания каналовых волн для сравнения.

Пример реальных данных

Рисунок 1(а) изображает морскую сейсмограмму (запись 16 Yilmaz, в 2001 г.). В записи присутствуют отражения R и долгопериодные кратные волны M1 и M3. Отражения замутнены волновым пакетом А, полностью состоящего из каналовых волн. Дисперсионная диаграмма этой сейсмограммы показана на рис. 1(б). Дисперсионная кривая основной моды четко выделяется в полосе частот 20-65 Гц, где $|U(v, f)|$ максимален. Фазовые скорости, измеренные по основной моде дисперсионной кривой, использовались для спрямления годографов прямых волн применением коррекции DLMO. Результат спрямления представлен на рис. 2(а). Использование нуль-сдвигового преобразования K-L позволило извлечь каналовые волны, как показано на рис. 2(б). Для этой операции были выбраны три главные компоненты данных для извлечения горизонтальных отражений. Рисунок 2(с) показывает результаты после фильтрации каналовых волн путем DLMO-коррекции исходных данных. Обработанная сейсмограмма ОПВ показана на рис. 3(б) получена применением обратной DLMO-коррекции к профильтрованным данным. Отметим, что высокоамплитудные каналовые волны в значительной мере подавлены по сравнению с исходными данными (рис. 3а).

Выводы

Мы представили метод подавления каналовых волн или поверхностных волн, наблюдаемых на сейсмограммах ОПВ. Данный метод реализуется в три подхода и учитывает дисперсионную природу каналовых волн. На первом шаге дисперсионная кривая определяется, после трансформации волнового поля, основанного на наклонном суммировании. Эта дисперсионная кривая в последствии используется для выполнения динамического линейного сдвига, спрямляющего годографы каналовых волн на сейсмограммах. Затем нуль-сдвиговое преобразование Кархунена - Лява (K-L) позволяет отделить каналовые волны от остальной сейсмической записи. Данная часть сигнала окончательно корректируется обратным динамическим линейным сдвигом для получения сейсмограмм, с которых полностью были удалены каналовые волны. Как показано на примере, отраженные волны не поддаются воздействию данного фильтра, так как разделение учитывает как частоту, так и скорость. Данная методика также может применяться в



случаях с более сложными схемами распространения волн, где наблюдаются мультимоды. Каждая мода, одна за другой, согласно той же процедуры.

Признательность

Данная работа опубликована с разрешения BRGM по. 03194. Мы благодарим О. Yilmaz за размещение бесплатно данных в Интернете. Мы также благодарим School of Mines за модуль S.U. (Cohen & Stockwell 1997). Английский язык в статье был проверен Rowena Stead из службы перевода BRGM.

Список литературы

Cohen, J.K. and Stockwell Jr., J.W. [1997] CWP/SU: Seismic Unix. A free package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, Golden, CO.

Jones, I.F. and Levy, S. [1987] Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the Karhunen-Loeve transform. *Geophysical Prospecting* 35, 12-32.

Liu, X. [1999] Ground roll suppression using Karhunen-Loeve transform. *Geophysics* 64, 564-566.

McMechan, G.A. and Yedlin, M.J. [1981] Analysis of dispersive waves by wavefield transformation. *Geophysics* 46, 869-874.

Moktar, T.A., Herrmann R.B. and Russel, D.R. [1988] Seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from shot-period Rayleigh waves. *Geophysics* 53, 1379-1387.

Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. [1998] Ground roll as a tool to image near-surface anomaly. 68th SEG Meeting, New Orleans, USA, Expanded Abstracts, 1377-1380.

Yilmaz, O. [2001] *Seismic Data Analysis*. SEG publication, Vol. 1, p. 74.