

Метод подавления кратных волн для сред сложного строения

А. Г. Фатьянов

ИБММГ СО РАН
пр. Ак. Лаврентьева, 6,
630090 Новосибирск, Россия
E-mail: fat@nmsf.ssc.ru

Работа автора была поддержана СО РАН (проект 26)

Одним из главных факторов, ограничивающих глубинность сейсморазведки, является высокий уровень регулярных помех, особенно многократных волн. Вопросам их распознавания и подавления посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные работы [1]. В настоящее время существует комплекс приёмов (прогнозирование, распознавание, вычитание и т.п.) для подавления многократных волн, которые полностью не решают эту задачу. Проблема подавления многократных волн полностью могла бы быть решена с помощью обратных динамических задач сейсморазведки. Однако, конструктивное (численное или аналитическое) решение обратных динамических задач получено лишь в случае простого строения среды (одномерного или сводящегося к нему). Это замедляет развитие новых технологий геофизических исследований [2].

В данной работе для практических целей предлагается использовать функциональные характеристики от зарегистрированного на свободной поверхности волнового поля, имеющие наглядный физический смысл. В работе построен такой функционал, не требующий никакой априорной информации о строении среды, который ослабляет кратные волны. Теоретически и численно показана его устойчивость и сходимость для модельных 3D плоско слоистых сред. Алгоритм разработан также для обработки данных только по вертикальной компоненте волнового поля для произвольных моделей (поглощающей, анизотропной, пористой и т.п.) сред. Приведены примеры подавления кратных волн для реальных сейсмограмм и временных разрезов.

Основные этапы метода иллюстрируются на примере скалярной задачи распространения продольных сейсмических волн в 3D плоско слоистых средах в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(z)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \\ u \Big|_{t=0} &= \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\delta(r)}{r} \cdot f(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Для построения искомого функционала задаётся следующая информация:

$$u \Big|_{z=0} = u_0(r, t); 0 < t < T; (r) \subseteq S \subset \{(r) : z = 0\}. \quad (2)$$

Далее по режиму колебаний поверхности наблюдения $z=0$ (2) строится функционал, который ослабляет кратные волны.

После применения интегральных преобразований Фурье-Бесселя задача (1) в каждом слое сводится к следующей краевой задаче:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dz^2} &= (k^2 - \omega^2 / c^2) u \equiv \nu^2 \cdot u, \\ \frac{du}{dz} \Big|_{z=0} &= F(\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $u(k, \omega)$ - решение (1) в спектральной области, k и ω - пространственные и временные частоты, $F(\omega)$ - спектр входного сигнала $f(t)$. В дальнейшем несущественные индексы будут опускаться.

Сначала рассматривается алгоритм точного расчёта однократных волн для произвольного количества слоёв, не имеющий ограничений лучевого метода. Следуя [3-4] решение для сферических однократных волн в спектральной области при известной модели среды получено на свободной поверхности в следующем явном виде:

$$u(k, \omega) = -\frac{F(\omega)}{\nu_1} [1 - 2q_1 e^{-2\nu_1 h_1} - 2q_2 e^{-2(\nu_2 h_2 + \nu_1 h_1)} (1 - q_1^2) - \dots], \quad (4)$$

где $q_i = \frac{\nu_{i+1} - \nu_i}{\nu_{i+1} + \nu_i}, \quad \nu_i = \sqrt{k^2 - \omega^2 / c_i^2}.$

Анализ формулы (4) показывает, что она есть не что иное, как сферический аналог известного плоского представления однократно-отражённых волн.

С учётом вида решения прямой задачи [3] искомый функционал для нахождения поля однократных волн $u_{одн}$ по информации (2) строится в следующем виде:

$$u_{одн} = \Phi \langle u_0 \rangle_{(k, \omega)} = p \cdot \frac{a_1 p + a_2 u_0}{a_3 p + a_4 u_0}. \quad (5)$$

Здесь $u_0(k, \omega)$ - спектр зарегистрированного волнового поля (2),

$p = F / v$ - прямая волна от источника.

Коэффициенты a_1, \dots, a_4 выбираются из условия отсутствия кратных волн для слоя на полупространстве.

С учётом разложения (4) получено следующее выражение для (5).

$$u_{одн} = \Phi \langle u_0 \rangle_{(k, \omega)} = -p \cdot \frac{3p + u_0}{p + u_0}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что так построенный алгоритм не требует никакой априорной информации о строении среды. Для выяснения эффективности алгоритма было создано программное обеспечение, которое позволяет одновременно рассчитывать для заданной модели среды полное поле, поле однократных волн и выдавать результат подавления кратных волн. Визуальное сравнение полей однократных волн и результата их подавления говорит об их хорошем совпадении для любых моделей слоистых сред.

В качестве примера работы алгоритма для модельных слоистых сред на рисунке 1 приведено сравнение точного поля однократных сферических волн и результат работы алгоритма подавления кратных волн.



Рис. 1. Точное поле однократных волн и результат работы алгоритма подавления кратных волн (справа).

Из рисунка 1 видно, что аналитический расчёт поля однократных волн даёт возможность визуально оценить хороший результат алгоритма подавления кратных волн.

В качестве примера работы алгоритма для реальных моделей сред на рисунке 2 приведён расчёт для Юрубчено - Тахомской зоны (правобережье Енисея).

Модель среды приведена на рисунке 3 и состоит из нескольких слоёв, включающих волноводы. Слева на рисунке 2 приведено полное волновое поле. В середине – поле однократных волн, рассчитанное по (4). Такое сравнение позволяет однозначно идентифицировать в сложном полном поле только однократные волны. Справа на рисунке 2 приведён пример подавления кратных волн по формуле (6). Здесь в качестве u_0 бралось насчитанное полное поле (рисунок 2, слева). Модель среды при этом не нужна, она считается неизвестной. Численное моделирование показало устойчивость метода подавления кратных волн. Отметим, что, как показали численные расчёты, при отсутствии волноводных слоёв подавление кратных волн происходит лучше.

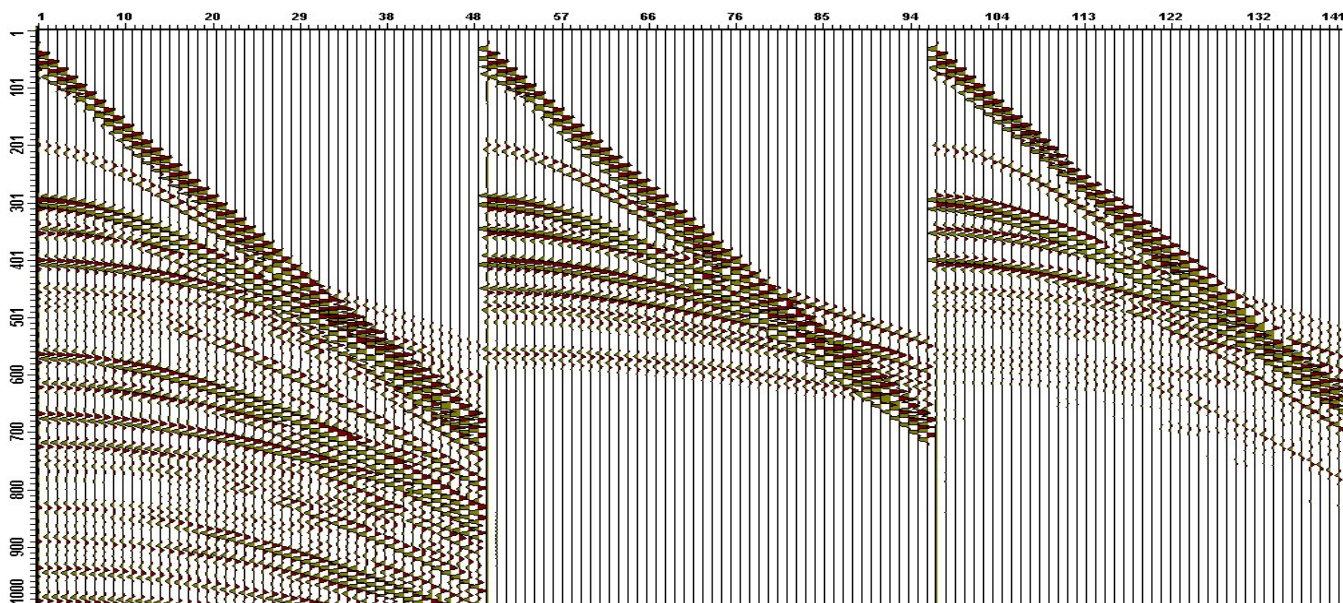


Рис. 2. Пример расчёта полного поля, однократных волн и результат их подавления (справа).

Модель среды				
Номер слоя	Глубины слоёв	Плотность (g/cdm)	Скорость Vp (m/sec)	Скорость Vs m/sec)
1	70	2133	1800	1100
2	325	2153	1920	1220
3	525	2179	2075	1075
4	750	2581	4490	2490
5	900	2293	2760	1760
6	1170	2751	5510	2510
7	1230	2406	3440	2440
8	1280	2488	3930	2330
9	1390	2706	5240	3240
10	1725	2851	6110	4110
11	1795	2568	4410	2410
12	Полупространство	2451	3710	2710

Рис. 3. Модель среды для Юрубчено - Тахомской зоны (правобережье Енисея).

Прямую волну в источнике $p = F / v$ можно взять для поглощающей, анизотропной, пористой и т.п. сред. Это позволяет использовать алгоритм подавления кратных волн (6) для произвольных возможных моделей.

Предложенный алгоритм также разработан для векторных уравнений. В качестве примера его практического использования приводится результат подавления кратных волн по одной компоненте реального волнового поля (U_z).

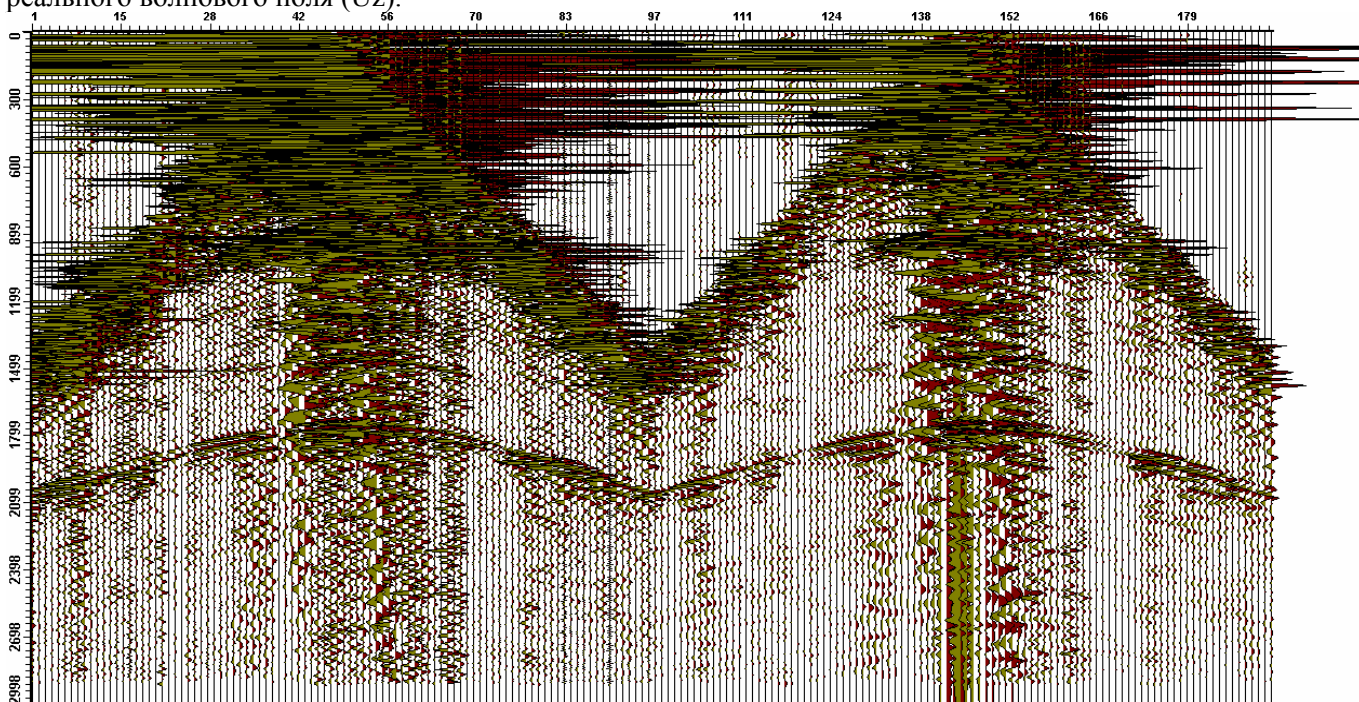


Рис. 4. Реальная сейсмограмма (слева). Результат подавления кратных волн (справа)

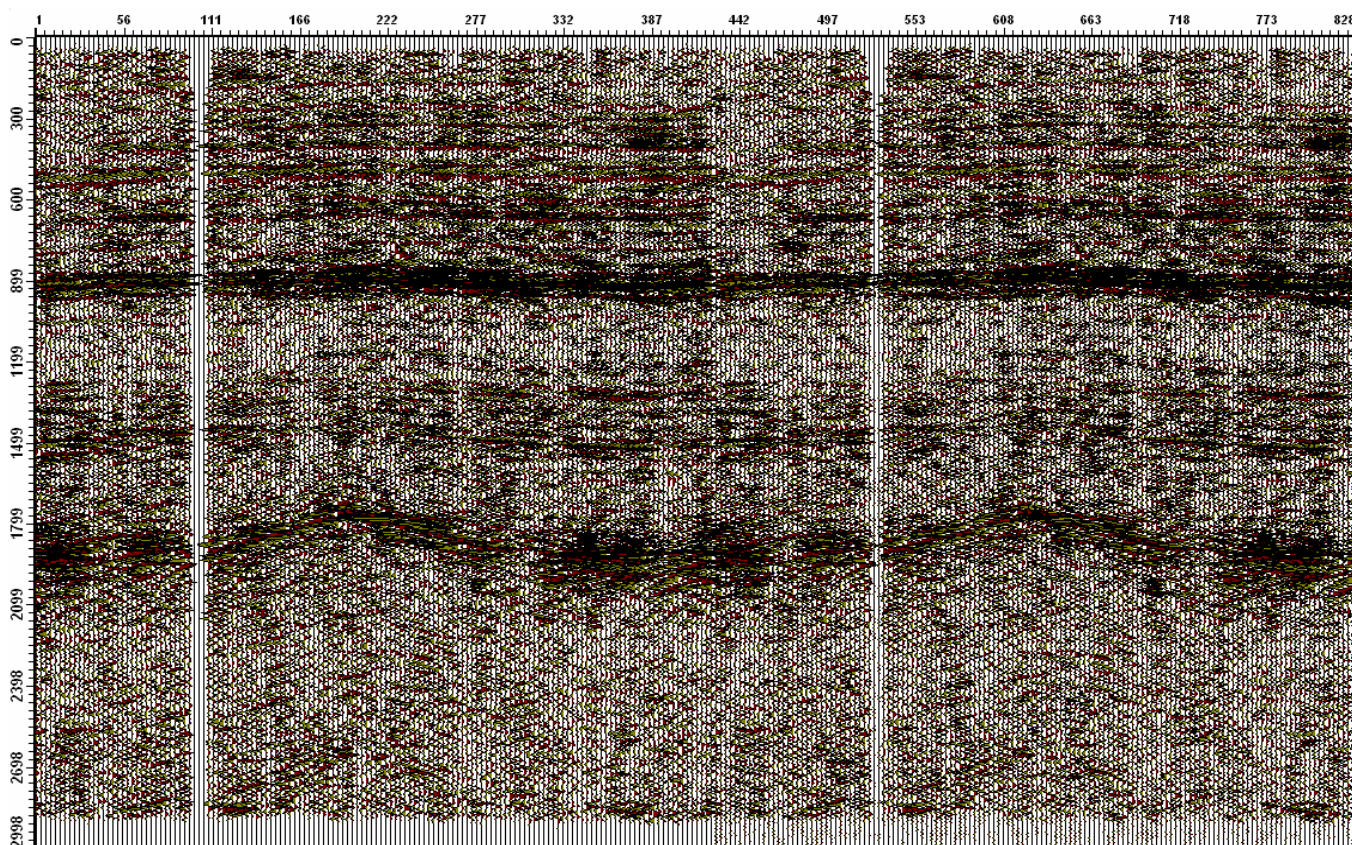


Рис. 5. Реальный временной разрез, 425 трасс (слева). Результат его обработки (справа)

На рисунке 4 приведена реальная сейсмограмма и результат подавления кратных волн для неё. Данный алгоритм позволяет также непосредственно проводить обработку временных разрезов. На рисунке 5 приведён фрагмент реального временного разреза (слева) и результат его обработки.

Литература

1. Е.А. Козлов Распознавание и подавление многократных волн в сейсморазведке. – М.: Недра, 1982. – 248с.
2. Алексеев А.С., Кабанихин С.И. Обратные задачи и новые технологии в геофизике // Математические методы в геофизике. - Новосибирск, ч. 1, 2003. – с. 11-20.
3. Фатьянов А.Г. Полуаналитический метод решения прямых динамических задач в слоистых средах. // ДАН, т. 310, №2, 1990. – с. 323-327.
4. Fatyanov A.G. Mathematical Simulation of Wave Fields in Media with Arbitrary Curvilinear Boundaries // Applied Mathematics Letters, v.18, i.11, 2005. – p. 1216-1223.