



Отдельные аспекты теории и практики применения метода MASW

Н.А. Голярчук* (ООО "Клауднет"), Э.И. Губерман (ООО "Клауднет"), В.В. Мерщий (Tesseral Technologies Inc.), Ф.Ю. Балакин (АО "СтавропольТИСИз"), Я.М. Юфа (ООО "Изыскатель").

Введение

Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW) является одним из методов инженерной геофизики, целью которого является изучение верхней части разреза (BЧР). MASW позволяет получить двумерный вертикальный профиль скоростей поперечных волн. В основе метода лежит явление частотной дисперсии поверхностных волн в слоистых средах.

Привлекательность сейсморазведки методикой MASW заключается в относительной дешевизне и простоте в проведении полевых измерений и возможности получения информации об упругих параметрах слоистой грунтовой толщи.

Преимущества MASW:

- методика метода достаточно проста и не требует специальной дополнительной аппаратуры;
- возможность работы при наличии высокоскоростного слоя на поверхности (асфальт, бетонное покрытие, промерзший грунт);
- в отличие от метода преломленных волн (МПВ), допускаются инверсии скоростей по глубине;
- глубинность метода достигает 10-30 м.

Элементы теории

В классическом варианте MASW состоит из 3-х стадий:

- Получение спектров фазовых скоростей.
- Получение дисперсионных кривых псевдорелеевских волн.
- Решение обратной задачи и определение скоростной модели среды.

Первые две стадии прекрасно изложены в работе [1].

Пусть имеется наблюденное волновое поле u(x,t) в виде сейсмограммы общей точки возбуждения (ОТВ). Применяя к каждой трассе преобразование Фурье, мы получаем U(x,w):

$$U(x,w) = \int u(x,t)e^{jwt}dt$$
 (1)

U(x,w) может быть представлено как произведение амплитудных и фазовых спектров:

$$U(x,w) = A(x,w) \cdot P(x,w) \quad (2)$$

P(x,w) содержит всю информацию о дисперсионных свойствах, тогда как A(x,w) содержит информацию о таких свойствах как поглощение и сферическое расхождение. Поэтому, U(x,w) может быть представлено как:

$$U(x,w) = e^{j\Phi x} \cdot A(x,w)$$
 (3)

где $\Phi = w/c_w$, w – частота, c_w – фазовая скорость на частоте w.

Применяя интегральное преобразование к U(x,w) в (3), мы получаем $V(w,\phi)$:

$$V(w,\phi) = \int e^{j\phi x} \cdot \left[U(x,w) / |U(x,w)| \right] \cdot dx = \int e^{-j(\Phi-\phi)x} \cdot \left[A(x,w) / |A(x,w)| \right] \cdot dx \quad (4)$$

Заменой переменной $c_w = w/\phi$ мы получаем из $V(w,\phi)$ желаемый спектр фазовых скоростей $I(w,c_w)$.

По максимальным значениям этого спектра определяется дисперсионная кривая $c_w(w)$ (рис. 1).





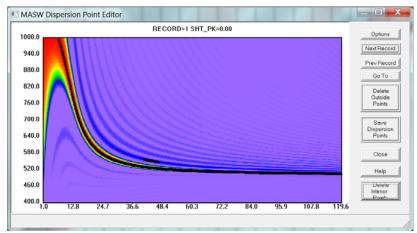


Рис. 1. Спектр фазовых скоростей $I(w,c_w)$ и автоматически прослеженная по максимумам спектра дисперсионная кривая $c_w(w)$ (черные точки)

В работе [2] предложен оригинальный алгоритм подготовки данных для MASW. Сущность метода СМРСС (СМР crosscorrelation) состоит в построении сейсмограмм общей срединной точки (ОСТ), состоящих из взаимных корреляционных функций пар трасс, подобранных из множества сейсмограмм ОТВ (рис. 2). Заметим, что формирование коррелограмм ОСТ существенно отличается от формирования классических сейсмограмм ОГТ. Каждая отдельная трасса-коррелограмма вычисляется по отдельной сейсмограмме ОТВ, а в качестве ординаты служит расстояние между этими трассами по модулю. В качестве аргумента служит не время прихода волны, а смещение в функции взаимной корреляции. Полученные сейсмограммы-коррелограммы ОСТ подвергаются классическому MASW анализу, описанному выше.

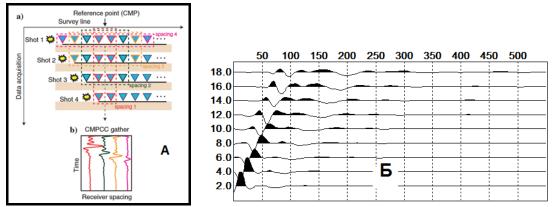


Рис. 2. Формирование сейсмограммы, состоящей из трасс взаимно-корреляционных функций (A), и полученный таким образом набор трасс-коррелограмм (Б)

Очевидно, что такой подход существенно повышает разрешающую способность метода MASW вдоль профиля, поскольку в классическом MASW привязка полученной дисперсионной кривой осуществляется к середине расстановки. Однако, методика требует достаточно большого количества исходных сейсмограмм ОТВ на профиле.

Полученные в каждой точке профиля дисперсионные кривые используются для решения обратной задачи, т.е. определения мощностей и пластовых скоростей Vs. Задача сводится к решению системы нелинейных уравнений:

$$F(f_i, cR_i, Vs, Vp, p, h) = 0$$
 (5)

относительно неизвестных векторов Vs, Vp, p, h.





Тут f_j — частота, cR_j — дисперсионная кривая, Vs — вектор скоростей поперечных волн, Vp — вектор скоростей продольных волн, p — вектор плотностей, h — вектор мощностей слоев. Размерность этих векторов определяется количеством слоев в модели. На практике неизвестными оставляют векторы Vs и h. Вектора Vp и p предполагаются либо уже известными, либо вычисляются по различным эмпирическим формулам. Например, $Vp = \gamma * Vs$. Решение обратной задачи предполагает многократное решение прямой задачи, то есть вычисления дисперсионной кривой. Для слоистой модели дисперсионная кривая может быть рассчитана методом Кнопофа [3].

Обратная задача, т.е. нахождение корней Vs и h уравнения (5), может быть решена разными способами. Например, в [4] предлагается простейший способ "деления пополам". В [5] предлагается более сложная комбинация метода Нелдера — Мида (симплекс-метода) и метода обжига (simulated annealing).

Решение считается найденным, когда рассчитанная дисперсионная кривая мало отличается от измеренной по спектру фазовых скоростей (рис. 3).

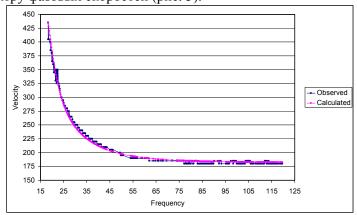


Рис. 3. Сопоставление наблюденной и полученной при решении обратной задачи дисперсионных кривых

Расчеты по синтетическим сейсмограммам

Без математического моделирования в настоящее время невозможно представить ни одно полновесное исследование в сейсморазведке. Синтетические сейсмограммы позволяют:

- исследовать все особенности регистрируемого на практике волнового поля;
- определять правильность и корректность вновь написанных процедур обработки;
- изучать возможности и рамки применения различных методик обработки и анализа.

Компания Тессерал Текнолоджис Инк. [6] разработала коммерческое программное обеспечение для высокоточного моделирования волнового поля на основе цифровой модели сложно построенных твердого, аморфного и жидкого тел. На рис. 4 представлена простейшая модель среды: тонкий 10-метровый низкоскоростной слой на поверхности однородного полупространства.

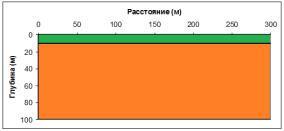


Рис. 4. Простейшая модель: тонкий слой на поверхности однородного полупространства

EAGE



Скорости в приповерхностном слое Vp=1000 м/c, Vs=500 м/c, плотность $p=2000 \text{ кг/м}^3$. Скорости в полупространстве Vp=2000 м/c, Vs=1000 м/c, плотность $P=2100 \text{ кг/м}^3$.

Для такой модели несложно аналитически рассчитать дисперсионную кривую и сейсмограмму с каналовой волной Лява (рис. 5A). В пакете Tesseral было рассчитано полное волновое поле

(рис. 5В).

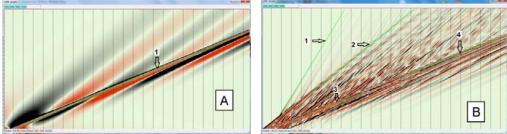


Рис. 5. Синтетические сейсмограммы волны Лява (A) и Z-компоненты волнового поля (B)

На рис. 5A преобладает первая мода волны Лява с кажущейся скоростью 500 м/с. На рис. 5B отчетливо выделяются 4 типа волн:

- 1 головная (преломленная на границе полупространства) продольная волна с кажущейся скоростью $2000 \; \text{м/c};$
- 2 прямая продольная волна с кажущейся скоростью 1000 м/с;
- 3 поверхностная волна Рэллея с кажущейся скоростью 475 м/с;
- 4 каналовая псевдорелеевская волна с кажущейся скоростью 500 м/с.

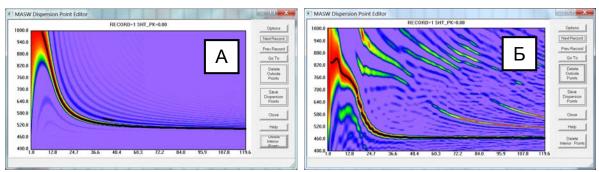


Рис. 6. Спектры фазовых скоростей волны Лява (А) и полного волнового поля (Б)

Мы отчетливо видим сходство и различие получаемых дисперсионных кривых для чисто поперечной SH волны Лява и поперечно-продольной SV псевдорелеевской волны (рис. 6). Мы рассчитали модель скоростей и мощностей для обеих сейсмограмм. Поскольку для решения системы нелинейных уравнений по методике MASW одного слоя недостаточно, мы условно разбили 10-метровый слой на пять 2-метровых слоев. Решение искалось со следующими начальными приближениями и коридорами поиска решений:

Layer	Hmin	Hmax	Vmin	Vmax	H_Init	Vs_Init
1	2	20	200	800	3	400
2	2	20	200	800	3	600
3	2	20	200	800	3	400
4	2	20	200	800	3	600
5	2	20	200	800	3	400
6			500	2000		1200

Тут Hmin, Hmax — коридор поиска мощностей, Vmin,Vmax — коридор поиска скоростей Vs, H_Init — начальные значения мощностей, Vs_Init - начальные значения скоростей. В результате получили решения (рис. 7). Суммарная мощность 10-метрового слоя определилась по волне Лява как 10.6 м, по полно-волновому полю — 14.8 м. Средневзвешенная скорость Vs по волне Лява — 554 м/с, по полноволновому полю — 531 м/с. В фундаментальной работе [3], где впервые был предложен алгоритм расчета дисперсионной кривой для слоистой среды, подчеркивается, что алгоритмы расчетов дисперсионных кривых для волн Лява и Рэлея — идентичны. Отличия заключаются лишь в матричных представлениях дисперсионной функции слоистой среды (in





matrix representations of the dispersion function). Рис. 7 подтверждает этот постулат. С другой стороны, эти результаты позволяют утверждать, что иногда целесообразнее применять MASW по данным на поперечных волнах SH. Возбуждение полей поперечных волн SH сложнее и требует горизонтальной установки сейсмоприемников. Но получаемое волновое поле SH часто заметно чище от волн-помех, нежели вертикальная компонента Z полного поля. Сказанное будет проиллюстрировано на практическом примере.

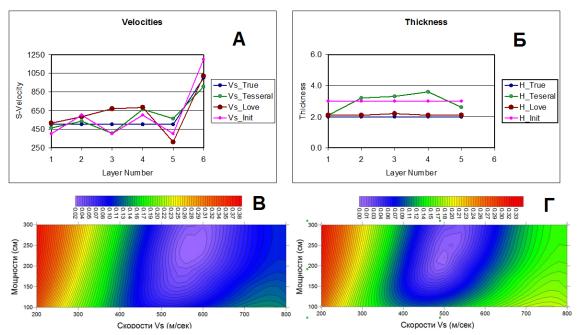


Рис. 7. Результаты расчетов MASW по волне Лява и по Z-компоненте полно-волнового поля: A-Cкорости Vs, B-мощности, <math>B, F-функционалы ошибок, минимум которых ищется в обратной задаче MASW для волны Лява (B) и для Z-компоненты полно-волнового поля (Γ) .

Приведем примеры расчетов MASW по синтетическим сейсмограммам для многослойной среды. Нами взята модель из статьи [4].

Layer number	v _s (m/s)	v _p (m/s)	ρ (g/cm ³)	h (m)
1	194.0	650.0	1.82	2.0
2	270.0	750.0	1.86	2.3
3	367.0	1400.0	1.91	2.5
4	485.0	1800.0	1.96	2.8
5	603.0	2150.0	2.02	3.2
Half-space	740.0	2800.0	2.09	Infinite

Моделирование осуществлялось в пакете Tesseral. На рис. 8 приведен пример сейсмограммы ОТВ и фазовый спектр скоростей Vs.

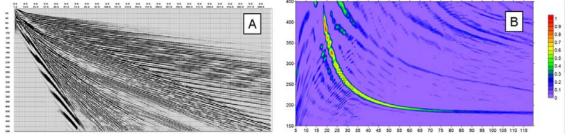


Рис. 8. Многослойная модель ВЧР. Сейсмограмма ОТВ (Z-компонента) (A) и фазовый спектр скоростей Vs (B)





На рис. 9 приведены результаты MASW.

Layer		H_True	Vs_True	H_Calc	Vs_Calc	
	1	2	194	2	191	
	2	2	270	2	254	
,	3	3	367	3	357	
4	4	3	485	3	485	
;	5	3	603	3	602	
(6		740		740	

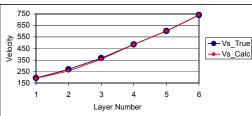
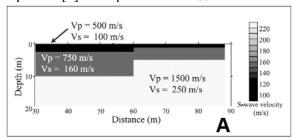


Рис. 9. Многослойная модель ВЧР. Результат MASW

В работе [2] тестирование метода MASW CMPCC проводилось на модели уступа (рис. 10).



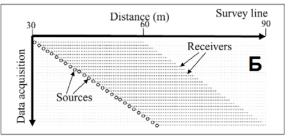
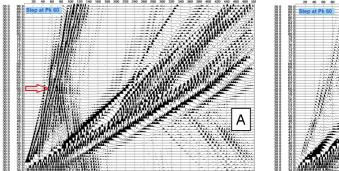


Рис. 10. Модель уступа из статьи [2] (А) и предложенная схема отработки (Б)

Мы рассчитали в пакете Tesseral синтетические сейсмограммы (рис. 11), соответствующие модели (рис. 10A) и схеме наблюдений (рис. 10Б).



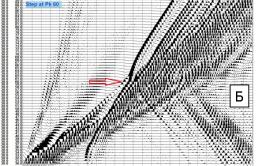


Рис. 11. Модель уступа из статьи [2]. Z-компонента (A) и X-компонента (Б)

По Z-компоненте полно-волнового поля была рассчитана скоростная модель методом MASW CMPCC. Уступ отчетливо отобразился несколько левее правильного (рис. 12). Смещение объясняется фланговой системой наблюдений. Скорости Vs и мощности по обе стороны от уступа хорошо согласуются с исходными данными. Искажения в начале профиля можно объяснить набором кратности ОГТ при формировании коррелограмм ОГТ.

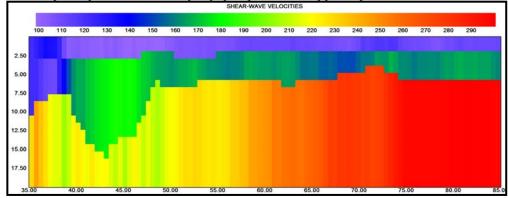


Рис. 12. Модель уступа из статьи [2]. Полученная по MASW CMPCC скоростная модель





Расчеты по реальным данным

Тестирование метода MASW CMPCC проводилось по данным Iwaki City, представленным на сайте [7], и по данным метода преломленных волн (МПВ) на одной из площадок Ставропольского края.

Результаты тестирования данных Iwaki City сопоставлялись с результатами, представленными в подробной документации на том же сайте [7]. На рис. 13 приведены результаты расчетов фазовых спектров скоростей Vs и дисперсионных кривых в одной и той же точке ОГТ. Видно, что подготавливаемые данные для обратной задачи практически идентичны.

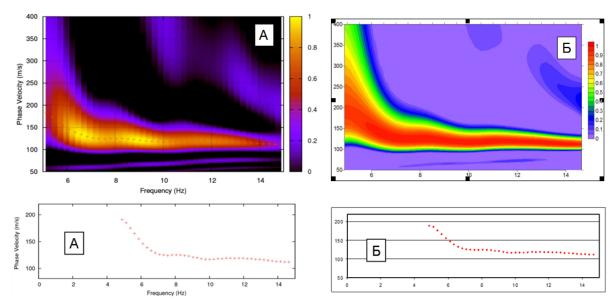


Рис. 13. Фазовые спектры (вверху) и дисперсионные кривые (внизу). A – из документации Iwaki $City. \ B$ – вычисленные авторами

Однако результаты инверсии различаются (рис. 14), хотя алгоритмы инверсии – идентичны.

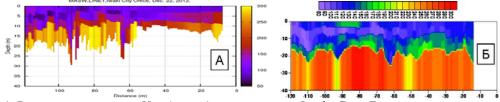


Рис. 14. Разрезы скоростей Vs: A – из документации Iwaki City. E – вычисленные авторами

Эти расхождения не должны вызывать сомнений. Обратная задача – некорректная и, поэтому, не может иметь единственного решения даже при малых различиях в исходных данных (определяемых по спектрам дисперсионных кривых). В этом проявляется единственный недостаток MASW. Следует всегда допускать неединственность решения. В данном случае малые различия в дисперсионных кривых определяются:

- отдельными ошибками в трассировании дисперсионных кривых по максимумам спектров скоростей;
- различиями в частотных интервалах прослеживания этих дисперсионных кривых.

Кроме того, неединственность может быть обусловлена заданием различных интервалов поиска решений и различных начальных приближений.

Второй практический результат был получен на одной из площадок Ставропольского края по материалам АО "СтавропольТИСИз". Данные состояли всего из трех сейсмограмм, но полученных от вертикальных источников с вертикальными сейсмоприемниками и от





источника поперечных SH волн с горизонтальными датчиками (рис. 15). Отчетливо видно, что поле SH волн намного чище и "красивее" поля P-SV волн.

Еще более в этом убеждаемся из рис. 16. Спектры P-SV волн сильно осложнены помехами. По спектрам SH волн дисперсионные кривые определяются более однозначно, и рассчитанные дисперсионные кривые хорошо согласуются с измеренными по спектрам (рис. 17). То есть, обратная задача MASW по SH волнам решается более устойчиво.

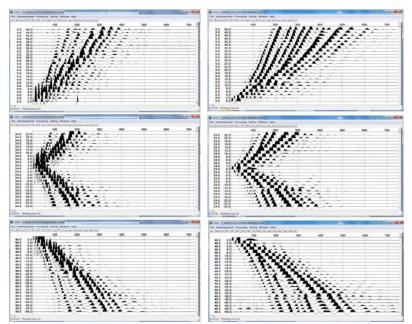


Рис. 15. Сейсмограммы МПВ. Слева – вертикальная компонента полного поля, справа – перпендикулярная профилю компонента (SH волны)

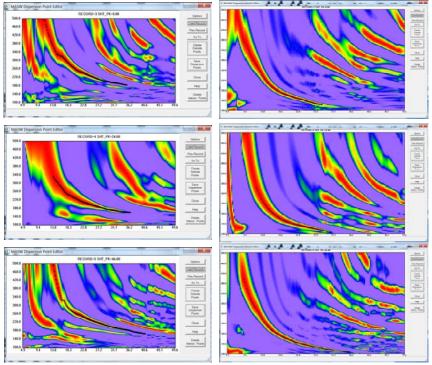


Рис. 16. Фазовые спектры скоростей. Слева – вертикальная компонента полного поля, справа – перпендикулярная профилю компонента (SH волны)

EAGE



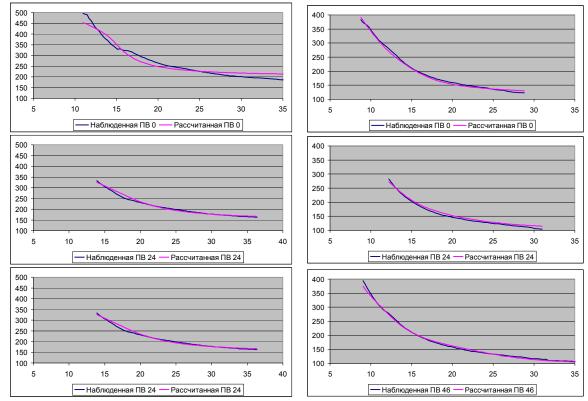


Рис. 17. Дисперсионные кривые. Слева – вертикальная компонента полного поля, справа – перпендикулярная профилю компонента (SH волны)

Существенно отличаются и значения дисперсионных кривых. Это означает, что по P-SV волнам мы не сможем получить сколь-нибудь достоверный результат. На рис. 18 представлен результат инверсии по SH-волнам. Получаемые по методу MASW границы не всегда соответствуют преломляющим или отражающим границам в приповерхностном слое. Однако, получаемые зависимости Vs(z) хорошо согласуются с данными МПВ.

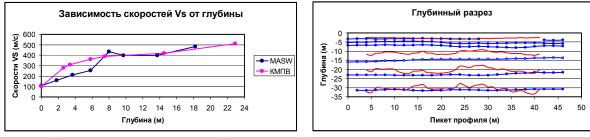


Рис. 18. Результат инверсии MASW по полю SH волн. На рисунке справа красным цветом показаны "границы" MASW, синим – преломляющие границы МПВ

Выводы

- 1. Метод MASW может и должен более активно применяться в инженерной сейсморазведке.
- 2. В сложных сейсмогеологических условиях рекомендуется применять методику MASW с волновыми полями поперечных SH волн.
- 3. Получаемые по методу MASW границы не всегда соответствуют преломляющим или отражающим границам в приповерхностном слое. Однако, получаемые зависимости Vs(z) хорошо согласуются с данными КМПВ.
- 4. Следует всегда допускать неединственность решения.





- 5. Следует, по возможности, всегда сопоставлять расчеты MASW с результатами интерпретации других методов, в частности, МПВ.
- 6. Самой трудоемкой и самой ответственной операцией во всей методике MASW является просмотр и редактирование автоматически прослеженных дисперсионных кривых.

Библиография

- 1. C.B. Park*, R.D. Miller, J. Xia, Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record, Kansas Geological Survey, 1998.
- 2. Hayashi, K. and Suzuki H., CMP cross-correlation analysis of multichannel surface-wave data, Exploration Geophysics (2004) 35, 7–13.
- 3. Schwab, F.A., Surface-wave dispersion computations: Knopooff's method. Bulletin of the seismological Society of America. Vol. 60, No. 5, pp. 1491-1520. October, 1970
- 4. Xia J., Miller R.D., Park C.B. 1999: Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave. 12th symposium, Environmental and Engineering Geophysical Society, Proceedings. 95–104.
- 5. Toshiaki Yokoi. Manual of Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW). IISEE, BRI, Japan, 2014.
- 6. Тессерал Текнолоджис Инк. http://www.tesseral-geo.com.
- 7. http://iisee.kenken.go.jp/net/MASW FREE PROGRAM.

Контактная информация

Голярчук Николай Алексеевич; sps-pc@rambler.ru,+7 913 495 04 40. Губерман Эмиль Игоревич; emil.guberman@geocloud.center, +7 499 720-62-91. Мерщий Виктор Васильевич; victor.mer60@gmail.com. Юфа Яков Моисеевич; yyufa@yandex.ru.