

550.834.8 550.344.56 550.347.29

Специфика применения метода микросейсмического зондирования в инженерных задачах

Горбати́ков А.В., Степа́нова М.Ю., Камши́лин А.Н.

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, 123995

Адрес для переписки: 123995, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Б.Грузинская, д.10, Институт
физики Земли РАН, Горбати́ков А.В.; тел.254-90-72; факс.255-60-40;

e-mail: avgor70@mail.ru.

Аннотация

Метод микросейсмического зондирования, зарекомендовавший себя при изучении крупных глубинных геологических структур находит свое место также в детальных исследованиях инженерной направленности. Ввиду повышенных требований к точности измерений необходимо учитывать ряд обстоятельств, связанных со случайной природой и свойствами стационарности зондирующего сигнала - микросейсм. Работа посвящена изучению влияния свойств стационарности микросейсм на конечный результат - разрез по скоростным контрастам. На основании проведенного исследования предложен особенный алгоритм реализации метода в инженерных приложениях, приводящий к существенному повышению точности результата.

Введение

Сейсмические методы прочно вошли в практику инженерных изысканий. Они представляют собой эффективное средство для интерполяции геологических разрезов, определяемых в результате инженерного разведочного бурения. Определение сейсмических скоростных вертикальных разрезов позволяет производить оценки распределений эффективных упругих модулей, являющихся основой при проектировании

сооружений и конструкций. Для реализации наиболее широко утвердившихся методов преломленных и отраженных волн применяются многоканальные инженерные сейсмостанции и управляемые импульсные источники, конструкции которых весьма разнообразны.

В последние десятилетия в практику сейсмических инженерных изысканий был внедрен ряд методов, базирующийся на использовании поверхностных сейсмических волн. Причем ряд из них используют в своей технологии источники сигнала, например, SASW и MASW [Park и др., 1999; Stokoe и др., 1994]. Другие методы, также базирующиеся на поверхностных волнах, используют в качестве зондирующего сигнала естественное микросейсмическое поле Земли [Brennguier и др., 2007; Nakamura, 1989; Noguchi и Nishida, 2002]. Вошедший недавно в практику сейсмических исследований метод микросейсмического зондирования зарекомендовал себя при изучении крупных глубинных геологических структур [Горбатиков, 2006; Горбатиков и др., 2008]. Представляет определенный интерес изучить вопрос, насколько данный метод применим в задачах инженерной направленности, которые характеризуются повышенными требованиями к точности проведения эксперимента и к точности применяемой аппаратуры ввиду сравнительно малого пространственного масштаба и малых глубин изучаемых объектов.

Метод микросейсмического зондирования и проблемы его применения в области высоких частот

Метод базируется на использовании естественных микросейсм Земли в качестве зондирующего сигнала и основан на инверсии амплитудного-частотного пространственного распределения микросейсмического поля [Горбатиков, 2005]. Было доказано экспериментально и исследовано на численных моделях, что неоднородности земной коры определенным образом искажают спектр низкочастотного

микросейсмического поля, а именно, на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды определенной частоты f уменьшаются, а над низкоскоростными неоднородностями возрастают. Частота f связана с глубиной залегания неоднородности h и скоростью фундаментальной моды волны Рэлея $V_R(f)$ соотношением $h=0.5V_R(f)/f$. При этом микросейсмическое поле рассматривается как суперпозиция цугов фундаментальных мод Рэлея с различным частотным заполнением. Разработана и протестирована в ряде экспериментальных исследований технология, позволяющая определять глубинную структуру сложных геологических объектов на базе использования фонового микросейсмического поля.

Применяя простую последовательность процедур, состоящую из измерения спектра микросейсмического поля в нескольких точках выбранного полигона, построения карты интенсивности микросейсмического сигнала для каждой частоты в спектре и привязки карты к глубине с помощью простого расчетного соотношения $h=0.5\lambda$ можно получить оценку разреза или трехмерного изображения некоторой заглубленной геологической неоднородности. При этом средний скоростной разрез региона будет входить в расчет через длину волны Рэлея λ и соответствующую ей частоту в спектре.

Реализация указанного подхода приводит к необходимости контролировать два обстоятельства: 1) преобладающий тип волны в анализируемом микросейсмическом поле для правильной интерпретации результатов и 2) стационарность измеряемых статистических параметров для установления однозначной связи между пространственными особенностями геологического строения и пространственными характеристиками микросейсм, если измерения в точках измерительной сети выполняются не одновременно.

Чтобы исключить проблемы, связанные с различием периодов стационарности микросейсм в разных частотных диапазонах и конечностью этих периодов [Горбатилов и Степанова, 2008] было предложено выполнять зондирование, взяв одну из точек на

исследуемом полигоне в качестве опорной. Измерения в остальных точках сети производить одновременно с опорной точкой, а результат измерений корректировать на опорную точку. Данный прием одновременно позволяет решить проблему нормировки спектра, поскольку реальный микросейсмический спектр имеет сложную форму с областями повышений и провалов, а для зондирования необходимо иметь сигнал с унифицированными спектральными характеристиками. Отметим, что применение опорной точки позволяет выполнять зондирование всего двумя станциями как минимально необходимым количеством.

Тем не менее следует отметить, что даже применение опорной станции не избавляет нас от существенных ошибок, вносимых в конечный результат за счет статистических характеристик микросейсмического поля. Особенно это касается частот спектра выше величины ~ 1.2 Гц, а именно эти частоты участвуют в построении разрезов по методу микросейсмического зондирования для глубин от нуля до нескольких десятков и сотен метров, характерных для инженерных изысканий. Действительно, если принять, что скорости S-волн в верхних частях разреза ориентировочно равны $V_S \approx 250-350$ м/сек, то для частоты $f = 1.0$ Гц глубина зонирования составит 120-170 метров. Для более высоких частот глубина будет еще меньше.

Как показано в [Горбатилов и Степанова, 2008], частоты выше ~ 1.2 Гц в спектре микросейсм отличаются тем, что оценка сверху периода стационарности сигнала в этой области скачком спадает до величин 8-10 минут со значения 1-1.5 часа, характерной для частот ниже ~ 1.2 Гц. Это происходит, по всей видимости потому, что в формировании высокочастотной области микросейсмического спектра принимают участие большое количество высокочастотных нестационарных источников. Такими источниками могут быть производственные агрегаты, транспорт, другие источники, обуславливаемые человеческой деятельностью. Природные источники также могут быть нестационарными, например, резкие порывы ветра. Действие этих источников не ограничивается в

пространстве их непосредственной окрестностью, но может проявляться на довольно больших удалениях, до нескольких сотен метров.

Таким образом, наряду со стационарной частью спектральной интенсивности на частотах выше ~1.2 Гц микросейсмические спектры осложнены нестационарной частью. Рассмотрим, к каким искажениям результата это может привести, если мы будем реализовывать алгоритм измерений с применением опорной станции, предусмотренный методом микросейсмического зондирования.

Анализ искажений, вносимых в результат нестационарной составляющей спектра

Рассмотрим наиболее общий случай реализации измерений с применением опорной станции. Пусть подвижная измерительная станция имеет номер 1, а неподвижная опорная станция – номер 2. Пусть результатом накопления и усреднения спектра мощности на подвижной измерительной станции на некоторой частоте f_i будет величина $S_1 + n_1$. При этом слагаемое суммы S_1 определяется стационарной составляющей микросейсмического сигнала, а слагаемое n_1 нестационарной составляющей. Такое представление не нарушает общности, поскольку каждое из этих слагаемых может стремиться к нулю независимо. Результатом накопления и усреднения спектра мощности на опорной станции на частоте f_i , полученным одновременно с подвижной станцией будет величина $S_2 + n_2$.

В соответствии с алгоритмом обработки спектров по методу микросейсмического зондирования [Горбатиков и др., 2008] оценка \tilde{H} относительной интенсивности на

частоте f_i будет равна:
$$\tilde{H} = \frac{S_1 + n_1}{S_2 + n_2}. \quad (1)$$

Заметим, что, если в измеренных спектрах не будет содержаться нестационарной составляющей, то оценка относительной интенсивности будет представлять собой точное значение относительной реакции точек изучаемой площадки:

$$\tilde{H} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{H \times S_2}{S_2} = H \quad (2)$$

В данном случае мы воспользовались тем соображением, что при отсутствии нестационарных составляющих сигнал S_2 будет накоплен как на опорной, так и на подвижной станции, даже если они будут разделены значительным расстоянием, поскольку длительность действия сигнала при накапливании в каждой точке исчисляется часами, а максимальный пробег между точками составляет несколько секунд. При этом на подвижной станции в сигнал будет внесено искажение H за счет различия скоростного строения среды между подвижной и опорной точкой.

В случае присутствия нестационарных составляющих в записях опорной и подвижной станции отношение (1) можно представить для дальнейшего анализа в виде

ряда по параметрам n_1 и n_2 в точке $(n_1; n_2) = (0; 0)$:

$$\tilde{H} = \frac{S_1 + n_1}{S_2 + n_2} =$$

$$\begin{aligned} & \frac{S_1}{S_2} + \frac{\partial \tilde{H}(0,0)}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial \tilde{H}(0,0)}{\partial n_2} n_2 + \left(\frac{\partial^2 \tilde{H}(0,0)}{\partial n_1^2} n_1^2 + \frac{\partial^2 \tilde{H}(0,0)}{\partial n_2^2} n_2^2 + 2 \frac{\partial^2 \tilde{H}(0,0)}{\partial n_1 \partial n_2} n_1 n_2 \right) \cdot \frac{1}{2} + o(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}) = \\ & \frac{S_1}{S_2} + \frac{n_1}{S_2} - \frac{n_2 S_1}{S_2^2} + \frac{S_1 n_1^2}{S_2^3} - \frac{n_1 n_2}{S_2^2} + o(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}) = \\ & H + \frac{n_1}{S_2} - H \frac{n_2}{S_2} + H \left(\frac{n_2}{S_2} \right)^2 - \frac{n_1 n_2}{S_2 S_2} + o(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь в последнем шаге было учтено соотношение (2).

Из конечного вида соотношения (3) следует, что оценка относительной интенсивности \tilde{H} между подвижной и опорной точкой в присутствии нестационарных составляющих в записях станций будет отклоняться от точного значения H , причем тем больше, чем большие значения имеют отношения между нестационарными и стационарными вкладами в регистрируемые сигналы в точках. Если точки регистрации разнесены друг от друга на большое расстояние, то нестационарные вклады n_1 и n_2 на

точках 1 и 2 могут существенно различаться, поскольку они могут быть сформированы различными локальными слабыми источниками, сигналы от которых различимы только в их окрестности. Если же опорная и подвижная точки расположены близко друг от друга, а именно это характерно для инженерных задач, где размеры изучаемых объектов и характерные глубины ограничиваются первыми десятками метров, соотношение (3) можно переписать в виде:

$$\tilde{H} = H + (1 - H)\left(\frac{n}{S}\right) - (1 - H)\left(\frac{n}{S}\right)^2 + o(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}) \quad (4)$$

здесь мы считаем, что $n_1 = n_2 = n$ и $S_1 = S_2 = S$ то есть стационарные и нестационарные составляющие накопленных и усредненных спектров мощности для частоты f_i являются общими для обеих станций ввиду их близкого взаимного расположения. Соотношение (4) приводит нас к заключению, что применяя стандартную процедуру измерения и обработки, характерную для метода микросейсмического зондирования [Горбатиков и др., 2008], которая включает в себя накопление и усреднение спектров на опорной и подвижной станции, мы получим оценку (\tilde{H}) точного значения относительной интенсивности между точками (H) с некоторой ошибкой. Ошибка определения будет пропорциональна соотношению нестационарной и стационарной составляющих регистрируемого микросейсмического сигнала, а также степени отклонения значения H от единицы. При росте содержания нестационарной составляющей зависимость ошибки становится пропорциональной квадрату отношения $\frac{n}{S}$.

Теперь отметим интересное обстоятельство, что если опорная и подвижная станция расположены близко друг от друга, то для оценки относительной интенсивности \tilde{H} нет необходимости накапливать и усреднять спектры на станциях по отдельности, а потом находить их отношение. Поскольку составляющие n и S являются в этом случае общими для станций, их сумму фактически можно рассматривать как некоторый детерминированный сигнал $S_{DET} = S + n$, проходящий сначала через одну станцию, а

потом через другую. В этом случае мы можем напрямую произвести расчет точного значения H путем нахождения отношения спектра мощности сигнала подвижной станции S_{1_DET} к спектру опорной S_{2_DET} :

$$\frac{S_{1_DET}}{S_{2_DET}} = \frac{HS_{2_DET}}{S_{2_DET}} = H$$

Остается лишь учесть, что на практике определение этого отношения будет содержать в себе расчетные погрешности. Чтобы избавиться от них мы должны будем все-таки усреднить полученную величину H по нескольким измерениям, но результат такого усреднения уже никак не будет зависеть от свойств зондирующего микросейсмического сигнала и будет сходиться к точному решению. Отметим, кстати, что применение такого приема для станций, расположенных далеко друг от друга, не приведет к существенному улучшению результата, поскольку с удалением в сигнале каждой станции нарастает нестационарная составляющая, определяемая своими локальными независимыми источниками.

Практический пример реализации алгоритма

Для опробывания предложенного подхода на практике авторы провели специальный полевой эксперимент. Для изучения был подобран специфический объект-область карстовых пустот в г.Дзержинске Нижегородской обл. РФ. Объект был подобран благодаря помощи коллег из филиала ОАО ПНИИС «Противокарстовая и береговая защита». В ходе изысканий под строительство сотрудники филиала с помощью разведочного бурения, производимого в соответствии со СНиП, обнаружили область карстовых пустот на площадке города Дзержинск. Дальнейшему подробному изучению данная область не подвергалась и была просто нанесена на карту. Исходная информация состояла в том, что было известно точное положение разведочной скважины, а также глубина, на которой в этой в этой скважине были вскрыты породы, содержащие пустоты ($h \sim 40$ метров).

Летом 2007 года авторы провели измерения методом микросейсмического зондирования вдоль профиля, содержащего 14 измерительных точек, с расстоянием между точками 5 метров. Профиль был расположен таким образом, чтобы разведочная скважина приходилась примерно на середину профиля. Частотный диапазон измеряемых сигналов составлял 0.7-15 Гц. Частота дискретизации на канал-200 Гц. Измерительная станция содержала 2 канала с вертикальными датчиками с идентичными характеристиками. Один из каналов использовался в качестве опорной станции. Он был установлен вблизи центральной части профиля и в течение всего эксперимента не трогался с места. Вторым каналом выполнял роль подвижной станции. Он передвигался с места на место вдоль профиля на выносном кабеле.

Измерение в каждой точке профиля представляло собой регистрацию 16 временных фрагментов микросейсмического сигнала обоими каналами синхронно. Длительность фрагмента составляла 30 секунд. Таким образом, общая длительность зарегистрированного микросейсмического сигнала достигала 8 минут. Согласно [Горбатиков и Степанова, 2008] эта длительность примерно соответствует оценке сверху периода стационарности микросейсмического сигнала в частотном диапазоне выше 1.2 Гц.

Дальнейшая обработка записей проводилась двумя путями. В первом случае реализовывался стандартный алгоритм обработки по методу микросейсмического зондирования. То есть, для каждой точки профиля рассчитывались средние спектры мощности для подвижного и опорного канала и находилось их отношение. На основании найденных таким образом спектральных отношений строился вертикальный разрез скоростных контрастов согласно [Горбатиков и др., 2008]. Результат построения можно увидеть на рис. 1а.

Альтернативный алгоритм обработки состоял в нахождении поканальных спектральных отношений по каждому временному фрагменту записи, а найденные отношения усреднялись. Результат построения разреза представлен на рис.1б.

На обеих частях рис.1 показано положение разведочной скважины. Вертикальными штрихами вверху каждого рисунка обозначены измерительные пикеты вдоль профиля. Тоновая шкала отражает относительную интенсивность реакции среды вдоль разреза [Горабтиков и др., 2008]. Читать эти разрезы следует таким образом, что повышение относительной интенсивности соответствует понижению сейсмических скоростей, и, наоборот, понижение интенсивности- повышению скоростей.

Видно из сравнения рисунков а) и б), что альтернативный подход к обработке сигналов в инженерных малоразмерных задачах приводит к более устойчивой и четкой картине. Например, в отличие от рис.1а, на рис.1б хорошо просматриваются горизонтальные границы разреза до глубин 100 метров. Довольно отчетливо видна область пониженных скоростей на глубине 42-60 метров, протягивающаяся от центра рисунка вправо. Визуально она касается самой глубокой точки разведочной скважины. В данном случае она может ассоциироваться с областью, содержащей большое количество карстовых пустот. На рис.1а эта область не очерчивается. Отметим также, что на рис.1а присутствуют явные артефакты, например, в районе второго пикета видна вертикальная низкоскоростная область на глубинах 80-140м, которую можно принять за погребенную воронку. Тем не менее, в обоих рисунках можно увидеть общие черты. Например, везде обозначается область пониженных скоростей в правой части рисунков на глубинах более 80 метров, хотя отчетливость этой области существенно лучше на рис.1б.

Выводы

Как видно из проведенного исследования, несмотря на то, что микросейсмический сигнал в частотном диапазоне выше 1.2 Гц имеет незначительный период стационарности,

метод микросейсмического зондирования можно применять и для высоких частот. Принимая во внимание пропорциональность частоты и длины волны, можно сказать, что метод возможно применять для исследования малоразмерных объектов и глубин, характерных для инженерных изысканий. Необходимым условием применения микросейсмического зондирования в инженерных задачах следует назвать использование нестандартной процедуры обработки сигналов при расчете относительной интенсивности реакции среды в разнесенных точках. Вместо нахождения отношения усредненных спектров следует определять среднее значение отношений отдельных спектров. Единственным критическим моментом остается проблема контроля за типом волн, составляющих микросейсмический сигнал, поскольку, напомним, что метод работает исключительно на фундаментальных модах Рэлеевских волн. Отметим также, что применение данной процедуры обработки для крупноразмерных исследований и больших глубин, в которых расстояние между измерительными пунктами велико, не приводит к существенному улучшению результата.

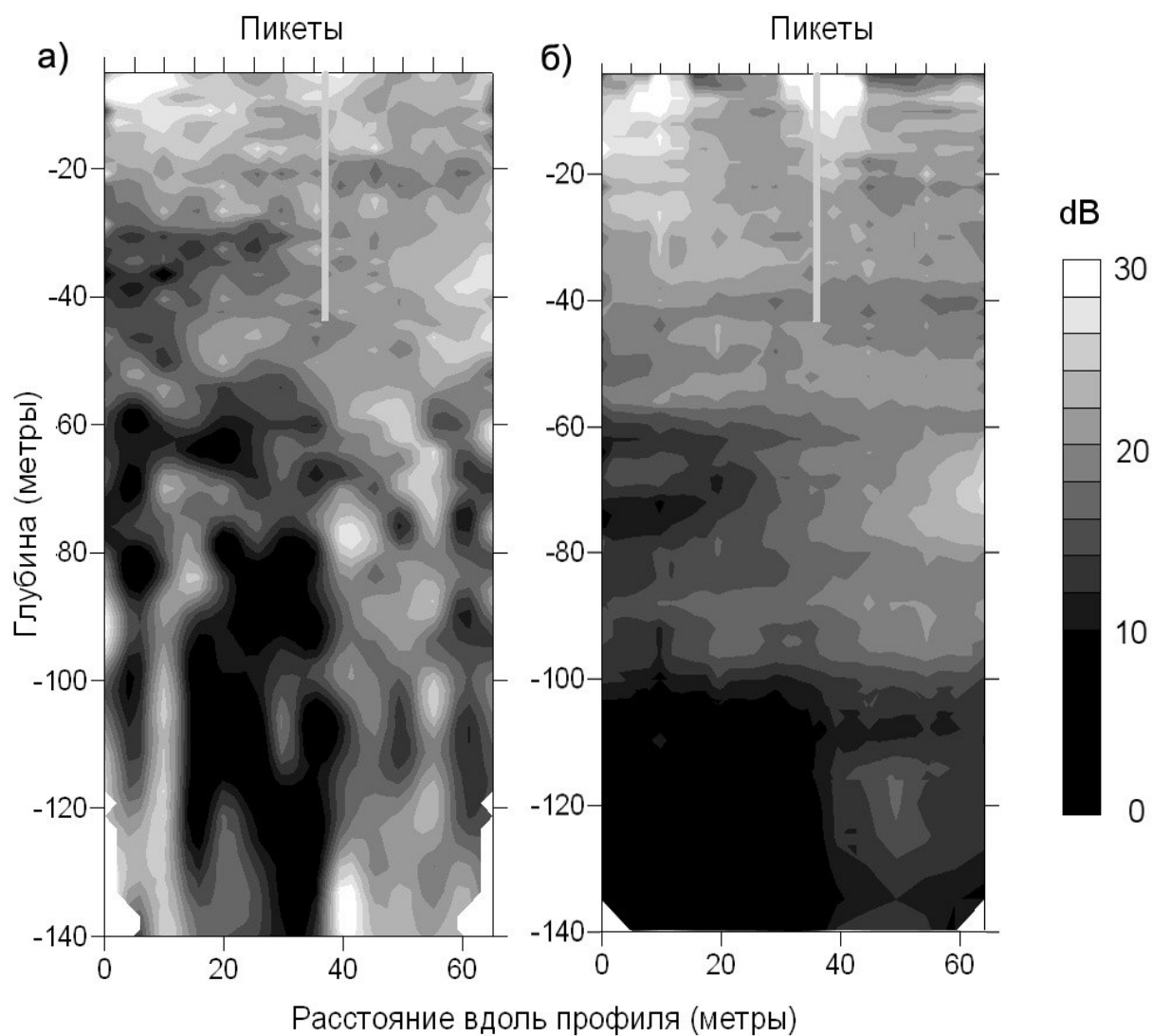


Рис.1. Сравнение результатов двух алгоритмов обработки микросейсмических сигналов по методу микросейсмического зондирования в применении к инженерным задачам.

а- применение стандартной обработки (расчет отношения усредненных спектров)

б- применение альтернативного алгоритма (расчет среднего отдельных спектральных отношений).

Вертикальной серой линией отмечено положение скважины. Тоновая шкала отражает относительную интенсивность вдоль профиля реакции пород разреза на прохождение микросейсм.

Список литературы:

Горбатилов А.В. Патент на изобретение № RU2271554. «Способ сейсморазведки». Дата приоритета 25.03.2005.

Горбатилов А.В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирования. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных /Материалы международной сейсмологической школы. Под.Ред Маловичко А.А. и др. Обнинск. 2006. С. 66-71.

Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли. 2008. №1. с.57-67.

Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм// Физика Земли. 2008. №7 (в печати).

Brenguier F., Shapiro N.M., Campillo M., Nercessian A., Ferrazzini V. 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations. // Geophysical Research Letters. 2007. V.34, L02305, doi:10.1029/2006GL028586.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. V.30. No1. P.25-33.

Noguchi T., Nishida R. Determination of subsurface structure of Tottori plain using microtremors and gravity anomaly// Journal of Natural Disaster Science. 2002. Vol. 24. No 1. PP 1-13.

Park C.B., Miller R.D. and Xia J. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics. 1999 V. 64. P. 800-808.

Stokoe K.H., Wright G.W., James A.B. and Jose M.R. Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical Characterization of Sites ISSMFE Technical Committee #10. 1999. Edited by R.D. Woods: Oxford Publishers. New Delhi.