

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МОДЕЛИ ПЛОСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ДАННЫХ ПАССИВНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

П.Н.Александров
(ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Троицк)

**ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING THE MODEL OF
THE FLAT FIELD FOR INTERPRETATION OF PASSIVE SEISMIC
DATA**

Alexandrov P.N.
(GEMRC IPE RAS, Troitsk)

Аннотация. Проведен анализ полученного решения прямой задачи пассивной сейсморазведки в приближении к плоскому сейсмическому полю. Показано, что основную роль в спектре сейсмического сигнала играет форма импульса, которая неизвестна. Это приводит к неверной интерпретации данных пассивной сейсморазведки в инженерной геофизике.

Abstract. The analysis of the obtained solution of the direct problem of passive seismic data in the approaching seismic flat field. It is shown that the main role in the spectrum of the seismic signal plays a pulse shape, which is unknown. This leads to the incorrect interpretation of passive seismic data in engineering Geophysics.

В инженерной геофизике и сейсмологии применяется метод сейсмической разведки, основанный на пассивной регистрации микросейсм - метод пассивной сейсморазведки. Этот подход, основной целью которого является определение глубины первой жесткой границы, развивается в работах многих авторов см., например, [1,2,5,6].

Суть метода заключается в определении частоты максимума амплитудного спектра сейсмического сигнала, зарегистрированного трехкомпонентным сейсмоприёмником на дневной поверхности. При известной скорости продольных и поперечных волн и знании частоты максимума амплитудного спектра определяется глубина до первой жесткой границы по очень простой формуле. Практика применения этого метода постоянно расширяется. Однако современный уровень развития теории этого метода не соответствует требованиям практики. Это несоответствие - недостаточно развитая теория, приводит, зачастую, к неверной интерпретации получаемых данных. Основная проблема связана

с использованием модели плоского сейсмического поля при обработке данных пассивной сейсморазведки.

Основная задача пассивной сейсморазведки заключается в следующем: имеется жесткое основание на котором находится слой с упругими параметрами Ламе λ и μ , плотностью ρ . В этом слое существует поле смещений. Эта задача является задачей с начальными условиями. Поле, и его первая производная по времени, задано в момент времени $t = t_0$ - времени начала регистрации упругого поля. Кроме этого внутри слоя могут существовать источники упругого поля - сторонние силы.

В одномерной среде и частотной области сейсмическое поле описывается двумя уравнениями [4]:

1. для вертикальных смещений S_z упругих колебаний, продольные волны, распространяющиеся со скоростью V_p

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} S_z - k_z^2 S_z = -F_z, \quad k_z^2 = -\omega^2 \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} = -\omega^2 \frac{1}{V_p^2},$$

2. для горизонтальных смещений S_x упругих колебаний, поперечные волны, распространяющиеся со скоростью V_s

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} S_x - k_x^2 S_x = -F_x, \quad k_x^2 = -\omega^2 \frac{\rho}{\mu} = -\omega^2 \frac{1}{V_s^2},$$

где ω - частота, S_x и S_z - компоненты вектора смещения по направлению осей декартовой системы координат x и z , соответственно, (ось z направлена вниз), F_x и F_z - компоненты вектора сторонних сил, в которые входят как начальные условия, так и источники упругого поля, появляющиеся в интервале времени регистрации.

Верхнее полупространство - воздух. В силу чего краевые условия для задачи теории упругости являются следующие:

на поверхности земли нормальные компоненты напряжений равны нулю: $P_{xz} = \mu \frac{\partial}{\partial z} S_z = 0$, $P_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} S_z = 0$ - свободная поверхность при $z = 0$, отсюда вытекают следующие граничные условия на поверхности земли для производных от смещений: $\frac{\partial}{\partial z} S_z = 0$ и $\frac{\partial}{\partial z} S_x = 0$;

на подошве слоя с жестким основанием $S_z = S_x = 0$ при $z = h$, h - толщина слоя.

Решая поставленную задачу, поле на поверхности земли будет описываться следующими выражениями

$$S_z = A \frac{-e^{-k_z|z_s|}(e^{-2k_z h} - 1) + 2e^{k_z|z_s|}e^{-2k_z h}}{ch(k_z h)} e^{-k_z h}$$

$$S_x = B \frac{-e^{-k_x|z_s|}(e^{-2k_x h} - 1) + e^{-k_x|h-z_s|}e^{k_x h}}{ch(k_x h)} e^{-k_x h}$$

где $A = A(\omega)$ и $B = B(\omega)$ - амплитуды первичного поля (в общем случае $A(\omega) \neq B(\omega)$), включающая как начальные условия, так и форму импульса источников упругого поля внутри слоя, z_s - координата сосредоточенного источника внутри слоя $0 < z_s < h$.

Резонанс (равенство нулю знаменателя) наступает при $ch(k_z h) = 0$ и $ch(k_x h) = 0$, откуда следует $\text{Im}(k_z h) = \pi n$ и $\text{Im}(k_x h) = \pi n$, n - нечетное целое число. При $n=1$ получим формулу для определения толщины слоя, которая используется в настоящее время при интерпретации данных пассивной сейсморазведки: $h = \frac{V_p}{\omega_p} \pi = \frac{V_s}{\omega_s} \pi$, где ω_p и ω_s - частоты, на которых

амплитудный спектр достигает своего максимума для вертикальных и горизонтальных компонент, соответственно. Заметим, что в этом случае $|S_x| \rightarrow \infty$ и $|S_z| \rightarrow \infty$. В силу этого обратное преобразование Фурье не существует, поскольку интеграл от модуля спектра расходится в следствии того, что подынтегральная функция является суммой бесконечных величин [3]. В следствие этого, необходимо использовать комплексную частоту или преобразование Лапласа.

Рассмотрим численный пример. Пусть регистрация во времени происходит с шагом дискретизации $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3}$ сек в интервале времени от $-512\Delta t$ до $3072\Delta t$. Слой, толщиной $h = 25$ м, в котором находится источник на подошве слоя $z_s = 25$ м, имеет следующие параметры $V_p = 300$ м/с, $V_s = \frac{V_p}{1.7}$, $\rho = 2700$ кг/м³. Согласно теореме Котельникова В.А., диапазон частот принимался равным

$$\omega = 2\pi \left[\frac{0.5}{\max(t)} : \frac{0.5}{\max(t)} : \frac{2}{\Delta t} \right] - i \frac{0.001}{\max(t)}, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Рассмотрим только один сосредоточенный источник импульсного типа, который включается в момент времени $t=0$. Поля вычисляются на кровле слоя (свободная поверхность). В частотной области результаты вычисления изображены на рис.1, соответственно, для компонент вектора смещения S_z и S_x .

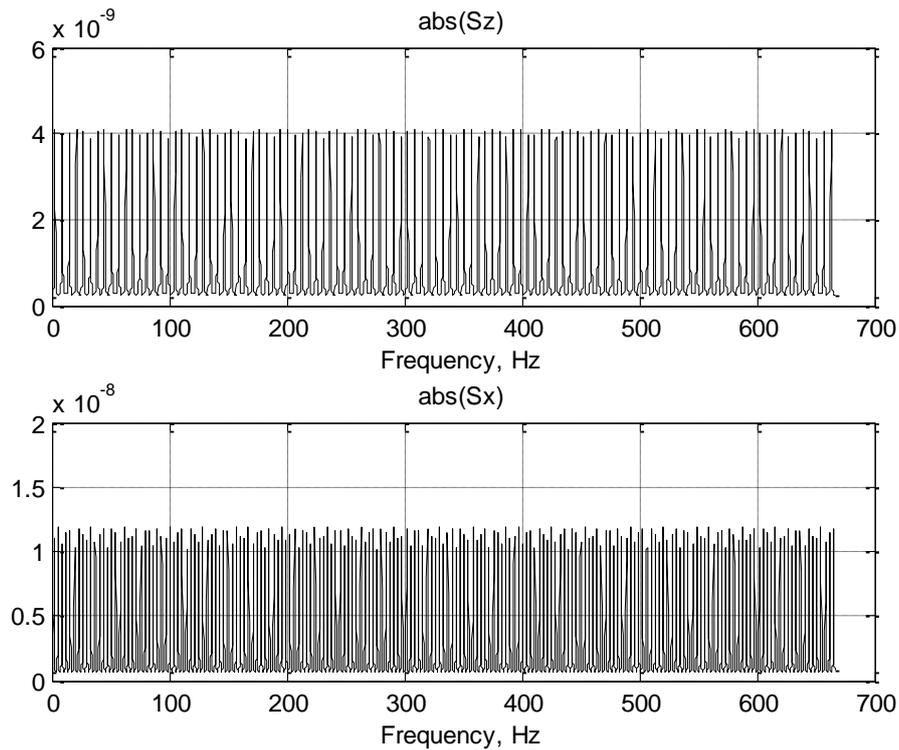


Рис. 1. Амплитудный спектр вертикальной и горизонтальной компонент вектора смещения S_z (вверху) и S_x (внизу) на дневной поверхности как функции частоты от одиночного источника, расположенного на подошве слоя.

Из этих расчетов следует, что амплитудный спектр не имеет отчетливого одного максимума как по горизонтальной, так и по вертикальной компонентам сейсмического поля.

Распределим источники по всей толщине слой. Результат вычислений от суммы полей от этих источников представлен на рис.2.

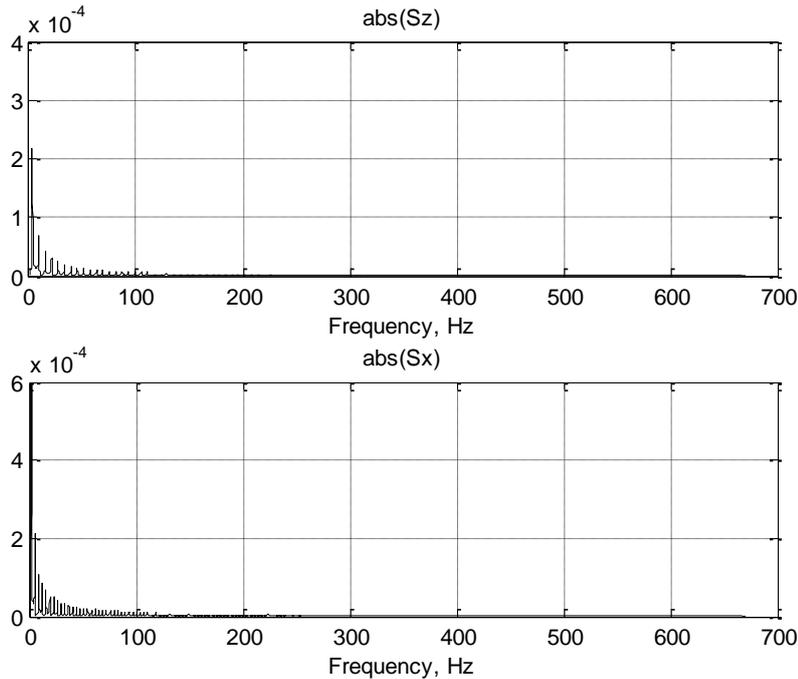


Рис. 2. Амплитудный спектр вертикальной и горизонтальной компонент вектора смещения S_z (вверху) и S_x (внизу) на дневной поверхности как функции частоты от суммы источников, расположенных в слое $0 < z_s < h$.

Как следует из этого рисунка, наблюдается убывание амплитудного спектра в зависимости от частоты. На фоне этого убывания наблюдаются локальные максимумы. Можно было бы, по максимуму амплитудного спектра найти толщину слоя по методике пассивной сейсморазведки. Однако, во-первых, необходимо найти частоту первого максимума этого спектра и во-вторых, на этот спектр накладывается форма импульса, которая неизвестна, поскольку источники техногенного или природного происхождения не могут быть проконтролированы. Пусть форма импульса известна, например, изображенная на рис.3.

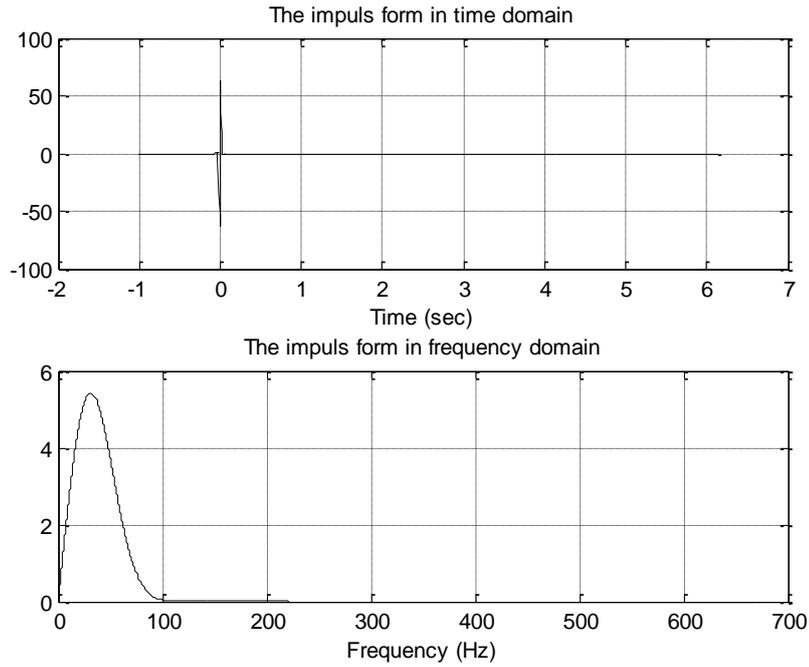


Рис.3. Форма импульса во временной области (вверху) и ее амплитудный спектр (внизу).

Результат перемножения спектра сигнала и формы импульса изображен на рис. 4.

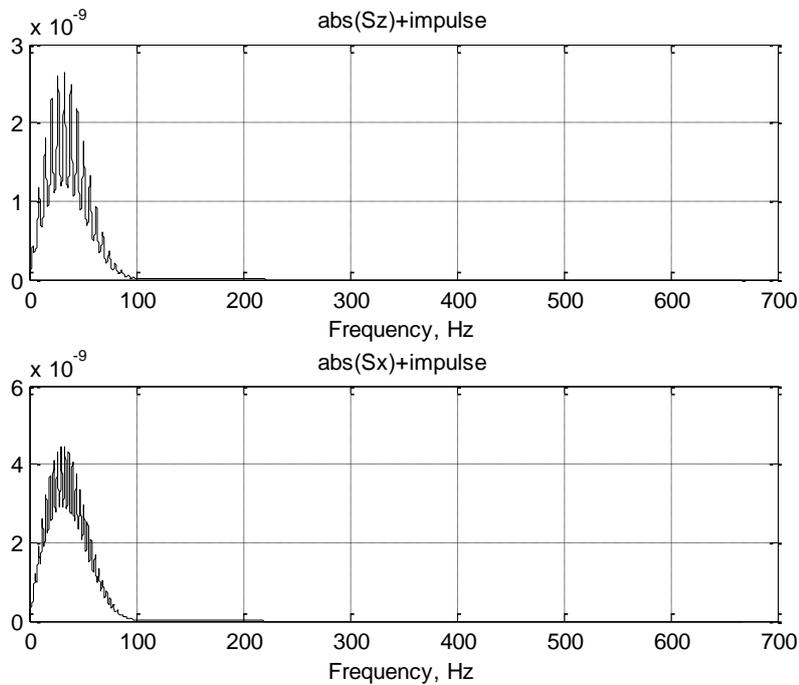


Рис.4. Результат решения прямой задачи с учетом спектра формы импульса.

Выводы. Как следует из проведенных вычислений и представленных рисунков, одного максимума в спектре сигналов не наблюдается (см. рис.1 и рис.2), имеется множество максимумов равной величина во всем частотном диапазоне. Это говорит от том, что наличие максимума может быть связано только с формой импульса. Следовательно, выводы о том, что по экспериментальным данным можно определить толщину слоя в методе пассивной сейсморазведки по максимуму амплитудного спектра - ошибочны, поскольку основную роль в спектральной области играет форма импульса, которая не известна. В следствии чего, интерпретация результатов пассивной сейсморазведки по этому подходу является не верной.

Литература

1. Горбатиков А.В. Патент на изобретение № RU2271554. «Способ сейсморазведки».Дата приоритета 25.03.2005.
2. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов //Физика Земли, 2008, № 1. - с.57-67.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1970. - 720с.
4. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. Пер. с англ. О.В.Павловой и С.В.Гольдина. Редактор пер. Н.Н.Пузырев - М.: Недра, 1986. - 261с.
5. Lane, J.W., Jr., White, E.A., Steele, G.V., and Cannia, J.C., 2008, Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method, in Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, April 6-10, 2008, Philadelphia, Pennsylvania, Proceedings: Denver, Colorado, Environmental and Engineering Geophysical Society, 13 p.
6. Francisco J. S´anchez-Sesma, Miguel Rodr´iguez, Ursula Iturrar´an-Viveros, Francisco Luz´on, Michel Campillo, Ludovic Margerin, Antonio Garc´ia-Jerez, Martha Suarez, Miguel A. Santoyo6 and Alejandro Rodr´iguez-Castellanos. A theory for microtremor *H/V* spectral ratio: application for a layered medium. - *Geophys. J. Int.* (2011) 186, 221–225p.