

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА В МЕТОДЕ ВСП

А.А. Табаков\*, А.В. Баев\*\*, И.Е. Солтан\*\*, В.Н. Ференци\*\*\*,  
А.В. Беленова\*\*\*, А.В. Копчиков\*\*\*, Л.В. Севастьянов\*\*\*  
(\* *ОАО «ЦГЭ», г. Москва*, \*\* *МГУ, г. Москва*,  
\*\*\* *ООО «ГЕОВЕРС», г. Москва*)

## SOME FEATURES OF ANALYTICAL CONTINUATION FOR EXPANDING OF USEFUL PART OF SPECTRA IN VSP METHOD

A.A. Tabakov\*, A.V. Baev\*\*, I.E. Soltan\*\*, V.N. Ferentsi\*\*\*,  
A.V. Belenova\*\*\*, A.V. Kopchikov\*\*\*, L.V. Sevastyanov\*\*\*  
(\* *CGE, Moscow*, \*\* *Moscow State University*,  
\*\*\* *Geovers, Ltd., Moscow*)

**Аннотация.** Восстановление высоких и низких частот – важный вопрос для различных прикладных задач ВСП, таких как предсказание акустического импеданса ниже забоя ствола скважины и экстраполяция каротажных данных вдали от скважины. Предлагается итеративный алгоритм для восстановления спектра импульсной сейсмограммы ВСП, являющийся численным методом аналитического продолжения. Рассматриваются численные результаты для модельных и реальных данных ВСП. Показано, что предложенный метод эффективен для данных с высоким отношением сигнала к шуму.

**Abstract.** Restoration of high and low frequencies is an important problem to be solved for VSP data in many applications such as prediction of acoustic impedance beneath the bottom of hole and extrapolation of log data away from the well. An iterative algorithm is proposed for estimation of full spectrum of VSP pulse seismogram. The method is based on an analytical extension of spectrum. The computing results for simulated and real VSP data are discussed. It is shown that the method is effective for high signal to noise ratio VSP data.

**Введение.** В работе исследуется применимость численного метода аналитического продолжения спектров к модельным и реальным трассам ВСП.

Известно, что спектры получаемых изображений геологического разреза по данным ВСП также как и по данным наземных сейсмических наблюдений, значительно ограничены узкой полосой частот. Низкие

частоты не пропускаются принимающей аппаратурой, а высокие сильно ослабляются при прохождении через поглощающую среду. К тому же эти частоты генерируются источником в меньшем объеме, нежели доминирующие частоты.

Имеются следующие основания для построения и практического применения предлагаемого метода:

- полная форма сигнала доступна из падающих волн;
- высокое отношение сигнала к шуму получается благодаря отсутствию поверхностных волн;
- высокие частоты не поглощаются низкоскоростными пластами (зоной малых скоростей);
- спектр трассы ВСП в отсутствие шумов является аналитической функцией, поскольку во временной области трасса ограничена слева точкой первого вступления, а справа быстро затухает;
- точные априорные ограничения могут быть взяты из модели, полученной для каротажных данных скважины и примененной к исходной записи ВСП.

**Метод.** Применяемый метод итеративной регуляризации [3] разработан для минимизации выпуклого функционала при ряде ограничений. Важной особенностью метода является его устойчивость к помехам.

Его применение к решению интегрального уравнения свертки  $Az = f$  приводит к алгоритму

$$z_{n+1} = \frac{1}{1 + \varepsilon_n} P_G \left[ z_n - \beta A^* (Az_n - f) \right], \quad (1)$$

где  $z_n$  – приближенное решение на  $n$ -ом шаге;  $A$  – оператор свертки;  $f$  – известная реализация процесса свертки;  $P_G$  – оператор проектирования на ограниченную область;  $\beta > 0$ ,  $\varepsilon_n > 0$  – параметры алгоритма.

В данной задаче для получения идеальной импульсной сейсмограммы из записей ВСП выражение (1) можно записать следующим образом:

$$G_{n+1} \left[ s_d - \frac{1}{1 + \varepsilon_n} P_M \left[ s_d - \beta S_d^* (G_n s_u - \beta S_u) \right] \right], \quad (2)$$

где  $s_d$  – падающая волна после деконволюции;  $s_u$  – сейсмограмма после деконволюции;  $G_n$  – полученный полный спектр на  $n$ -ой итерации;  $P_M$  – оператор проектирования на ограниченную область  $M$ ;  $\beta$  – весовой параметр исходного спектра;  $\varepsilon_n$  – параметр регуляризации.

Реальная процедура включает в себя наложение ограничения на амплитуды во временной области. Например, это может быть обнуление значений сейсмограммы (после деконволюции) до первых пиков в трассах ВСП. В частотной области это изменит каждую частотную компоненту. Следующее приближение импульсной сейсмограммы получается путем обратного преобразования Фурье взвешенной суммы исходного спектра и

спектра, к которому применено ограничение проектирования. Итеративная процедура повторяется до тех пор, пока сейсмограмма не будет соответствовать всем ограничениям.

**Экспериментальные результаты.** Эффективность предложенной процедуры восстановления идеальной импульсной сейсмограммы была проверена на модельных данных ВСП. Модель была получена по данным акустического и плотностного каротажа одной из реальных скважин. Для этой модели было получено волновое поле с доминирующей частотой 40 Гц, к трассам которого добавлен белый шум порядка 2.5% от энергии трасс.

Обработка данных включает в себя разделение волн в исходном поле, оптимальную деконволюцию (параметр регуляризации – 0.001), а также аналитическое продолжение спектра с априорными ограничениями, полученными согласно модели. Предполагается, что неопределенность по амплитуде составляет 20% от модели.

Как можно видеть из рис. 1 (а, б), основная часть энергии трасс после деконволюции сосредоточена в интервале от 6 до 125 Гц и спектр, полученный после деконволюции отличается от спектра идеальной импульсной сейсмограммы (0-250 Гц), представленном на рис. 1 (с), в интервале, начиная со 100 Гц.

Продолженный спектр, представленный на рис. 1 (д), охватывает весь интервал частот (0-250 Гц), хотя и не соответствует в точности спектру идеальной импульсной сейсмограммы, представленной на рис. 1 (с).

Все сейсмограммы, полученные в результате продолжения спектров, являются значительно более разрешенными по сравнению с импульсными сейсмограммами, рассчитанными с помощью стандартного алгоритма оптимальной деконволюции.

Кроме того, исследуется сходимость метода, когда

$$\beta = \beta(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in [\omega_1, \omega_2] \\ 0, & \omega \notin [\omega_1, \omega_2] \end{cases},$$

при условии ограниченности импульса по времени. Показано, что разрешающая способность метода быстро ослабляется вдоль оси времени, однако алгоритм характеризуется возможностью разрешения слабых отражений вблизи первых вступлений (рис. 2).

**Выводы.** Разработан алгоритм восстановления полного спектра для трасс ВСП. Показано, что для модельных трасс полезное решение может быть получено для уровня шума с интенсивностью 2.5% от энергии исходного сигнала. Имеется пример успешного применения алгоритма для обработки реальных данных ВСП.

## Литература

1. Е.И. Гальперин. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты. 1994
2. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. 1984
3. А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. 1989

## Список рисунков

1. Аналитическое продолжение спектра для одной модельной трассы во временной и частотной областях (**a** – модельная трасса после деконволюции, **b** – падающая волна после деконволюции, **c** – трасса после аналитического продолжения спектра, **d** – модельная импульсная сейсмограмма: 0-250 Гц)
2. Волновое поле (**a**) и его частотный спектр (**b**) для нулевой задержки по времени для 3-х импульсов («жирная» линия – эталонное волновое поле / частотный спектр, пунктирная линия – исходное волновое поле / частотный спектр, сплошная линия – волновое поле / частотный спектр после 1.000.000 итерации)