

# МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ВСП С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

А.В. Копчиков, А.В. Баев, А.А. Табаков

## 1. Введение

На данный момент, метод вертикального сейсмического профилирования, включая различные свои модификации, является одним из наиболее перспективных направлений в современной скважинной геофизической разведке. Достаточно разработанной в настоящее время является методика прогнозирования геологического разреза ниже забоя скважины. Менее исследована проблема восстановления геологического разреза выше интервала расположения сейсмоприемников, а также задача определения параметров среды в схеме ВСП с глубинным расположением источника. Особый интерес представляет случай источника с неизвестными временными характеристиками, какими, например, являются колебания, возбуждаемые долотом при бурении скважин. В данной статье предлагается метод, развитие и последующее применение которого позволит в полной мере использовать возможности, предоставляемые модификациями метода обращенного ВСП и значительно оптимизировать технологический процесс бурения скважины. Речь пойдет о корреляционной обработке сейсмических данных ВСП и последующем их использовании для решения обратной динамической задачи.

Анализ корреляционных полей сейсмических трасс ВСП позволяет утверждать, что в них содержится полная информация о структуре геологического разреза. При этом оказывается, что на основе корреляционных полей в схеме с поверхностным источником можно восстановить сейсмический разрез как ниже, так и выше уровня расположения регистрирующих датчиков [2]. Представленный метод позволяет решить задачу прогнозирования геологической среды в случае источника, расположенного на глубине. Таким источником может служить долото бура, что дает возможность осуществить

обработку данных ВСП в режиме мониторинга процесса бурения, а также определять текущее положение бурового долота. Опробование метода на модельных и реальных данных ВСП показало, что качество прогнозирования по автокорреляционным полям сопоставимо с качеством прогнозирования по полным трассам ВСП.

## 2. Описание метода

Волновое поле продольного ВСП в горизонтально-слоистой среде содержит падающие и восходящие волны. На каждом уровне наблюдений полная сейсмограмма  $f$  может быть представлена суммой падающих  $f_1$  и восходящих  $f_2$  волн

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t).$$

При решении задач прогнозирования разреза ниже уровня наблюдения, исходной информацией является отражательная характеристика среды  $G$ , определяемая как результат деконволюции отраженных волн. Без учета регуляризации имеем:

$$G(\omega) = \frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)},$$

где  $G(\omega)$ ,  $-\infty < \omega < \infty$  – Фурье-преобразование идеальной импульсной сейсмограммы  $g(t)$ .

В случае если исходными данными являются не сами волновые поля, а их автокорреляции, также возможна оценка отражательной характеристики среды. Для корреляционного поля полных смещений среды, наблюдаемыми являются функции

$$k(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t+\tau) f^*(t) dt = \sum_{i,j=1}^2 k_{ij}(\tau),$$

где  $k_{ij}(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t+\tau) f_j^*(t) dt$ .

Основным положением предлагаемого метода решения обратных задач с помощью корреляционных функций, вытекающим из анализа экспериментальных данных, является

то обстоятельство, что, проводя селекцию соответствующих полей по скоростям, удается из функции  $k$  выделить отдельно два слагаемых:

$$k_0(\tau) = k_{11}(\tau) + k_{22}(\tau) \quad \text{и} \quad k_1(\tau),$$

где  $k_0(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t+\tau) f_1^*(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t+\tau) f_2^*(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t+\tau) f_1^*(t) dt$ .

В терминах преобразований Фурье  $K_0, K_1$  функций  $k_0, k_1$  это означает, что известны

$$K_0(\omega) = |F_1(\omega)|^2 + |F_2(\omega)|^2,$$

$$K_1(\omega) = F_1^*(\omega) F_2(\omega).$$

Для отношения  $\frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)}$ , имеем:

$$\begin{aligned} \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} &= \frac{|F_1(\omega)|^2 + |F_2(\omega)|^2}{F_1^*(\omega) F_2(\omega)} = \frac{|F_1(\omega)|^2}{F_1^*(\omega) F_2(\omega)} + \frac{|F_2(\omega)|^2}{F_1^*(\omega) F_2(\omega)} = \frac{F_1(\omega)}{F_2(\omega)} + \frac{F_2^*(\omega)}{F_1^*(\omega)} = \\ &= \frac{1}{G(\omega)} + G^*(\omega) = \frac{1 + |G(\omega)|^2}{G(\omega)}. \end{aligned}$$

Решением этого уравнения является выражение:

$$G(\omega) = \frac{1}{2} \frac{K_0(\omega)}{K_1(\omega)} - \frac{1}{2} \frac{1}{K_1(\omega)} \sqrt{K_0(\omega)^2 - 4 |K_1(\omega)|^2}. \quad (1)$$

Также возможно получить формулу для приближенного вычисления  $G(\omega)$ , как

бесконечный ряд по степеням  $\left| \frac{K_1(\omega)}{K_0(\omega)} \right|$ . Разложение будет выглядеть следующим образом:

$$G(\omega) = \frac{K_1(\omega)}{K_0(\omega)} \left( 1 + 2 \left| \frac{K_1(\omega)}{K_0(\omega)} \right| + \dots \right). \quad (2)$$

### 3. Эксперименты на модельных и реальных данных

Для подтверждения теоретических результатов предлагаемого метода был проведен модельный эксперимент. Метод был опробован на модельных данных ВСП, а

результаты были сопоставлены с результатами, полученными в ходе решения той же задачи, но уже с использованием промышленного комплекса обработки данных ВСП “UNIVERS BP”. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что, несмотря на то что решение, полученное с использованием предлагаемого метода несколько уступает стандартному прогнозу ВСП, оно, тем не менее, позволяет получить результаты допустимой для ВСП ПБ точности (фактически, даже лучшие), используя при этом лишь половину исходной информации, необходимой для прогноза ВСП. Таким образом, результаты модельного эксперимента дали предпосылку для последующего исследования метода, и проведения эксперимента на реальных данных.

Оба эксперимента, как на модельных, так и на реальных данных, проводились по одной и той же схеме (*рис. 1*). Суть экспериментов состояла в следующем. Были взяты исходные волновые поля, на основе которых двумя способами была решена обратная динамическая задача ВСП: был проведен стандартный прогноз ВСП, и прогноз по автокорреляциям трасс полей исходных данных по рассмотренному выше методу. Далее было проведено сопоставление результатов.

1) В качестве исходных данных были взяты: в первом случае – волновое поле, смоделированное в пакете “UNIVERS BP” (*рис. 2а*), во втором – реальное волновое поле ВСП (*рис. 3а*). На рисунках отчетливо выделяются первичные падающие волны, вторичные падающие волны и кратные отраженные волны.

2) Из исходных волновых полей ВСП были получены автокорреляционные поля (*рис. 2б* – автокорреляционное поле, построенное по модельным данным, *рис. 3б* – автокорреляционное поле, построенное по реальным данным). На приведенных рисунках заметно выделяются вертикальное направление, восходящие волны, а также волны на двойных задержках.

3) Проведена процедура селекции полей автокорреляций. Для каждого случая были выделены поля отраженных волн, а также вертикальные направления (автокорреляции прямой волны).

4) Осуществлена деконволюция по форме падающей волны, получены трассы однократных отражений и по формуле (2) рассчитан акустический импеданс среды.

Видно, что в обоих случаях импедансы (*рис. 4* – рассчитанные по модельным данным, *рис. 5* – рассчитанные по реальным данным), полученные по автокорреляционным полям, соответствуют импедансам, полученным в ходе стандартной обработки ВСП, на всем диапазоне глубин. Возникающая при этом погрешность, обусловленная потерей половины информации из исходных волновых полей, в отсутствие шумов составляет порядка 5%. Такой результат является вполне приемлемым. Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают эффективность решения обратной динамической задачи ВСП на полях автокорреляций.

#### **4. Применение в рамках ВСП ПБ**

1) Изложенным методом интерпретации корреляционных полей смещений, регистрируемых на дневной поверхности, можно решать задачу определения геологического разреза непосредственно в режиме бурения скважин, а также определять текущее положение бурового долота. Внедрение подобного мониторинга при бурении может оказаться весьма эффективным в связи с все более широкой разработкой наклонных и горизонтальных скважин.

2) Обычно, для преобразования сейсмограмм ВСП ПБ в импульсную форму применяется запись датчика на вертлюге (*рис. 6*), что не всегда приводит к получению качественных результатов. В то время как использование корреляционных полей сейсмических трасс ВСП в качестве исходных, также позволяет получить полную информацию о структуре исследуемого геологического разреза, но уже без привлечения

дополнительной информации о форме сигнала (записи на вертлюге). Это дает возможность построить обработку данных ВСП ПБ, основываясь лишь на исходных записях сигнала, получаемого с долота в процессе бурения.

Стоит отметить тот факт, что положительные результаты, достигнутые за последнее время как в нашей стране, так и за рубежом в области использования сейсмических сигналов, возбуждаемых работающим буровым долотом, для решения большого круга геологических и технологических задач, позволяют с уверенностью говорить о включении метода ВСП ПБ в комплекс оптимизационных средств и решений, применяемых в процессе проводки скважин. Таким образом, возможность получения результатов ВСП в реальном времени может позволить скважинной сейсморазведке стать незаменимым звеном в комплексном изучении разбуриваемых нефтегазоносных отложений.

На данный момент, задача применения предлагаемой методики не сводится к одной только адаптации существующего программного обеспечения к условиям работы в режиме реального времени путем установки вычислительных комплексов непосредственно на буровых скважинах. Также существует необходимость в принципиально новых программах, гораздо более эффективных и предназначенных специально для работы с данными, получаемыми в процессе ВСП ПБ – программам, позволяющих при регистрации сигналов, возбуждаемых буровым долотом, достичь высокого отношения сигнал/помеха, необходимого для автоматического выделения сигналов в реальном времени с целью оперативного расчета по ним сейсмических и технологических параметров, а также траектории бурящейся скважины [1].

Обращенное ВСП с использованием в качестве источника колебаний работающего бурового долота может оказаться вполне конкурентоспособным по сравнению с другими технологическими решениями, предлагающими модернизацию и как следствие

усложнение конструкции бурового инструмента, прерывание процесса бурения или же вносящие существенные ограничения со стороны параметров разреза.

### **Литература**

1. Шехтман Г. А. Обращенное ВСП в процессе бурения. Геофизика. 1997. Вып. 2. С. 39-48.
2. А.В. Баев, А.А. Табаков. Решения обратных задач сейсмопрофилирования и мониторинг при бурении скважин. Доклады РАН. 1992. Т. 324. №1. С. 73-76.
3. А.В. Баев, А.А. Табаков, И.Е. Солтан, А.В. Копчиков. Решение обратных задач ВСП и мониторинг при бурении скважин на основе корреляционных полей. Материалы научно-практической конференции «Гальперинские чтения-2002». 2002. С. 167-170.

## **Список иллюстраций**

1. Схема автокорреляционной обработки.
2. Исходное модельное поле ВСП (а) и его автокорреляция (б).
3. Исходное реальное поле ВСП (а) и его автокорреляция (б).
4. Акустические импедансы в масштабе глубин, полученные в результате модельного эксперимента.
5. Акустические импедансы в масштабе глубин, полученные в результате реального эксперимента.
6. Геометрия наблюдений ВСП ПБ.