

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

А.П. Григорюк<sup>1</sup>, В.В. Ковалевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

УДК 550.34

В данной работе предлагается высокоэффективный алгоритм обработки вибросейсмических сигналов на основе пространственно-временной фильтрации. Эффективность достигается сочетанием методов регулируемого направленного приема и веерной фильтрации. Приведены примеры выделения основных сейсмических фаз на расстояниях до 500 км по данным вибросейсмических исследований литосферы Байкальской рифтовой зоны

**Ключевые слова:** активная сейсмология, сейсмические волны, пространственно-временная фильтрация.

## 1

Развиваемый в последнее время метод активного вибросейсмического мониторинга предполагает просвещение геологической среды сейсмическими волнами от искусственных управляемых источников-вibrаторов. При этом происходящие изменения напряженно-деформированного состояния среды определяются или по изменению кинематических параметров вибрационных сейсмограмм, или по временным изменениям характеристик стационарных волновых полей, которые устанавливаются в среде при продолжительном излучении вибратором гармонических сигналов. Существующие сегодня технические средства: мощные низкочастотные вибраторы и цифровые распределенные системы регистрации сейсмических сигналов позволяют организовать вибросейсмический мониторинг крупных сейсмоопасных зон площадью 10–40 тыс. кв.км. [1].

Для получения годографов сейсмических волн и измерения кинематических характеристик прием сигналов осуществляется малой сейсмической группой из 5–10 регистраторов, расположенных линейно с шагом несколько сот метров и ориентированных на виброисточник. Сейсмический вибратор работает в режиме излучения ЛЧМ сигнала в полосе 5–10 Гц длительностью до 60 минут. Основной проблемой при этом является недостаточная разрешающей способности и качество вибрационных сейсмограмм (коррелограмм) на расстояниях, превышающих 200–250 км. Это объясняется ухудшением отношения сигнал / шум вследствие затухания сейсмических сигналов, которое описывается кубической зависимостью от расстояния от источника.

В работе [2] для повышения качества вибрационных сейсмограмм было предложено использовать известный в сейморазведке метод регулируемого направленного приема (РНП). Метод заключается в суммировании сейсмических трасс, зарегистрированных сейсмической группой, с предварительным введением временных сдвигов, компенсирующих запаздывание сигнала от регистратора к регистратору. Суммирование трасс выполняется с разными временными сдвигами  $\delta t$  между первым и последним регистратором группы в диапазоне возможных наклонов годографов полезных волн, образуя суммоменту. Для повышения эффективности применялось дополнительное взвешивание результирующих сейсмических трасс с помощью специальной функции.

Недостатком метода РНП является его узкополосность: без искажения пропускаются только волны с кажущейся скоростью  $V_k = V_{k0}$ , где  $V_{k0}$  – скорость волн, для которых направление линии суммирования совпадает с наклоном годографа, волны с другими значениями  $V_k$  подавляются. Однако реальные полезные волны на сейсмограммах характеризуются некоторым диапазоном кажущихся скоростей и поэтому желательно иметь фильтр, пропускающий волны в заданном диапазоне скоростей  $V_{k1} < V_k < V_{k2}$ . Для этих

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-07-00832 и 15-07-06821).

целей можно использовать многоканальные пространственно-временные полосовые фильтры. Эти фильтры пропускают без искажения полезные волны, наклоны годографов которых лежат в некотором заданном интервале (веере). Остальные волны, которые, возможно, присутствуют в сейсмограммах, рассматриваются как шум и подлежат подавлению. Также могут использоваться пространственно-временные режекторные фильтры, которые эффективно подавляют регулярные (коррелированные вдоль сейсмической группы) волны-помехи, кажущиеся скорости которых лежат в заданном диапазоне.

Веерные фильтры широко применяются в сейморазведке для разделения полезных волн и волн-помех [3]. При этом значения кажущихся скоростей определяются по двумерному спектру сейсмограммы  $S(\omega, k)$ , где  $\omega$  и  $k$  — временная и пространственная частота (волновое число). Однако в случае вибросейсмического мониторинга из-за низкого отношения сигнал / шум на больших расстояниях определение скоростей полезных волн по двумерному спектру затруднительно. В этом случае предлагается определять необходимый для фильтрации интервал значений  $V_k$  по временным задержкам  $\delta t$  на суммоленге. Это можно сделать достаточно точно благодаря тому, что отношение сигнал / шум на суммотрассах по сравнению с исходными трассами выше в  $\sqrt{n}$  раз, где  $n$  — число каналов.

На Рис. 1 представлен главный прямоугольник спектральной плоскости  $(\omega, k)$ , ограниченный временной и пространственной частотами Найквиста  $\omega_N$  и  $k_N$ . На первом этапе с помощью режекторного веерного фильтра подавляются волны-помехи с отрицательными значениями волновых чисел (область 1 на Рис. 1).

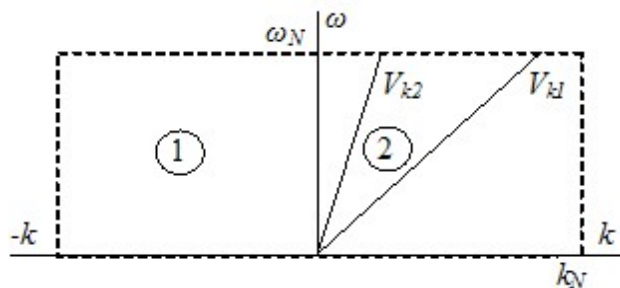


Рис. 1: Частотно-временная спектральная плоскость

После этого строится суммоленга РНП и по ней определяется интервал значений  $\delta t$ , соответствующий полезным волнам. Затем, исходя из известной базы сейсмической группы, рассчитываются кажущиеся скорости  $V_{k1}$  и  $V_{k2}$ . На следующем этапе с помощью полосового веерного фильтра выделяются полезные волны в интервале  $V_{k1} < V_k < V_{k2}$  (область 2 на Рис. 1). Общая схема частотно-временной фильтрации для вибросейсмического мониторинга представлена на Рис. 3.

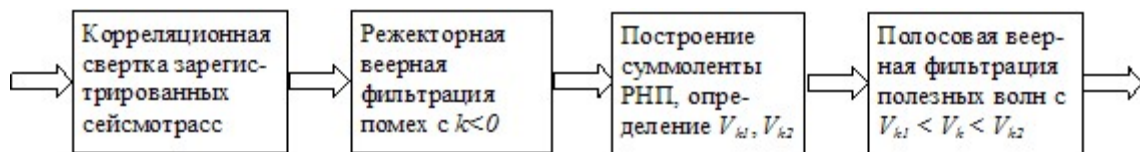


Рис. 2: Схема частотно-временной фильтрации

Для иллюстрации предложенной методики приведем пример обработки сейсмограмм, полученных в ходе экспериментальных работ по глубинному вибросейсмическому зондированию Монголо-Сибирского региона в зоне сочленения Байкальского рифта и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Работы проводились ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, БурФ ГС СО РАН (Россия) и ИЦАГ АНМ (Монголия) в 2011–2013 гг. [4]. В качестве сейсмического источника использовался мощный 100-тонный вибратор, расположенный на Южнобайкальском геодинамическом полигоне СО РАН (п. Бабушкин). Вибратор работал в режиме излучения ЛЧМ сигнала в полосе 6–11 Гц, длительность сеансов 50 минут. Регистрация сейсмических сигналов осуществлялась малыми сейсмическими группами (антеннами) с трехкомпонентными сейсмоприемниками на профиле Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан–Улан-Батор протяженностью 500 км. Каждая сейсмическая группа состояла из 6 регистраторов «Байкал» с трехкомпонентными сейсмическими датчиками СК1-П, координатная привязка по GPS. Расстановка датчиков линейная с расстоянием между датчиками 200 метров и общей базой малой сейсмической группы 1 км. Регистрация сейсмических сигналов проводилась в ноч-

ное время (с 15:00 по 22:00 по GMT) в каждой точке профиля. Одновременно проводилась регистрация вибросейсмических сигналов вблизи источника аппаратурой «Байкал» с трехкомпонентным сейсмическим датчиком СК1-П. На Рис. 3 слева сверху приведена вибрационная сейсмограмма, зарегистрированная на расстоянии 400 км от источника (вертикальная компонента), ниже — сейсмограмма, полученная в результате пространственно-временной фильтрации по предложенной методике. Отдельно показана область Р-волн. Для выбора значений  $V_{k1}$  и  $V_{k2}$  была построена суммограмма, приведенная на Рис. 3 справа. Для каждой суммотрассы указано значение временной задержки  $\delta t$  в секундах.

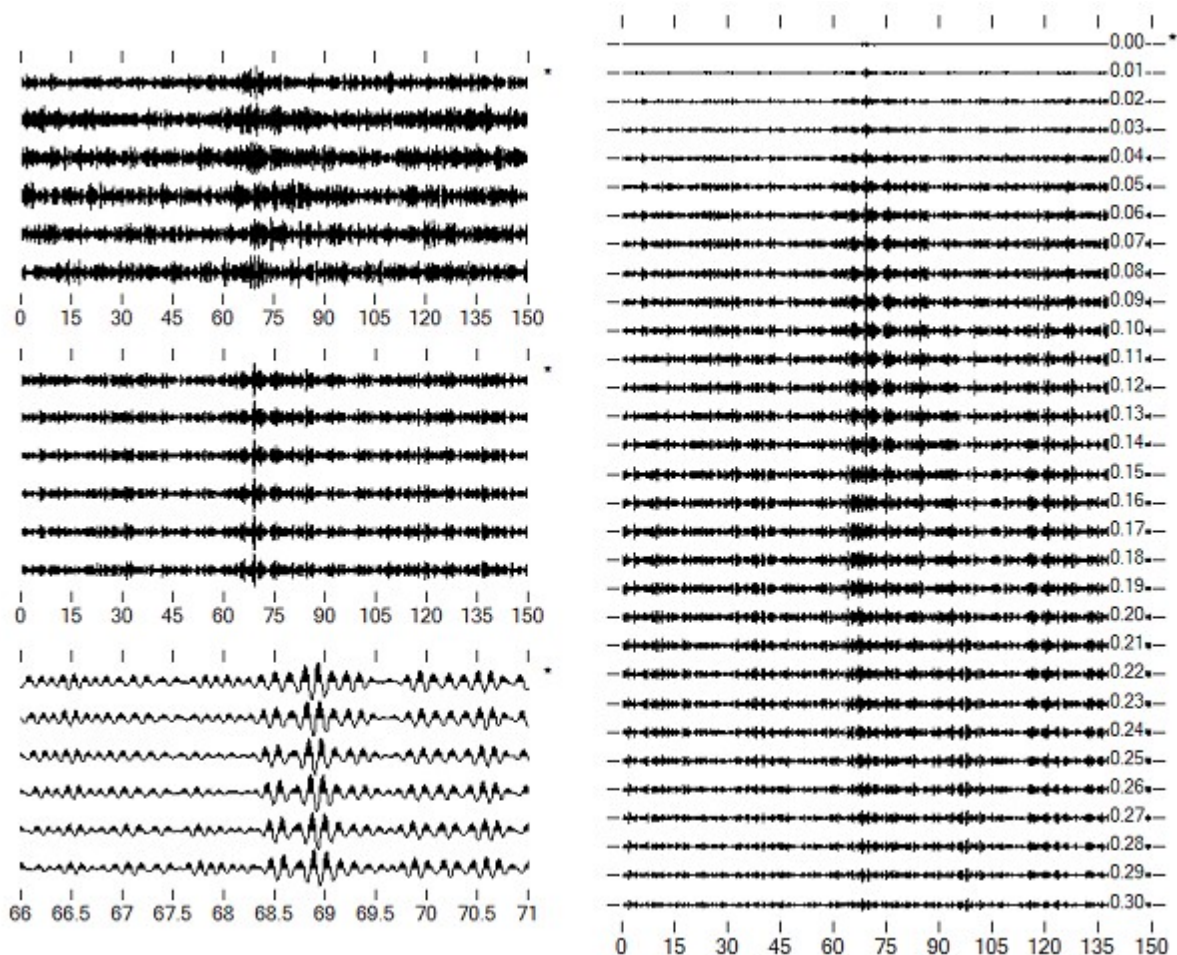


Рис. 3: Обработка сейсмограммы 6-канальным веерным фильтром

Как можно видеть наибольшему разрастанию Р-волн соответствует интервал  $\delta t$  приблизительно 0.07–0.14 сек. При базе сейсмической группы 1 км получим  $V_{k1} = 7.1$  км/сек,  $V_{k2} = 14.3$  км/сек. Эти значения и были использованы при полосовой веерной фильтрации.

Таким образом, создан высокоэффективный алгоритм обработки сигналов при вибросейсмическом зондировании на основе пространственно-временной фильтрации. Эффективность достигается сочетанием методов регулируемого направленного приема и веерной фильтрации. Алгоритм реализован в программном комплексе «V12», разработанном в ИВМиМГ СО РАН.

## Список литературы

- [1] Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Отв.ред. Г.М. Цибульчик. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004

- [2] Ковалевский В.В., Григорюк А.П. Повышение эффективности направленного приема сигналов при вибросейсмическом мониторинге // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014, Т.4, №1, С.211-214
- [3] Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. М.: Мир, 1989. 207 с.
- [4] Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. // Отечественная геология, 2013, №3, С.16-23

*Андрей Павлович Григорюк — н.с. Института  
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;  
Новосибирск, 630090; e-mail: and@org.sccc.ru;*

*Валерий Викторович Ковалевский — д.т.н., зам. директора Института вычислительной  
математики и математической геофизики СО РАН; Новосибирский государственный университет;  
Новосибирск, 630090; e-mail: kovalevsky@sscc.ru;*