

МЕТОД ОБРАБОТКИ ВРЕМЕННОГО РЯДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПАССИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.В. Смагличенко¹, Т.А. Смагличенко²

1 – Институт сейсмологии и геодинамики (структурное подразделение Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского), г. Симферополь,
e-mail: losaeylin@gmail.com;

2 – Институт проблем нефти и газа РАН, e-mail: tasmaglichr@gmail.com

Введение

Пассивные сейсмические данные – это данные сейсмограмм, записанных от землетрясений, которые являются пассивными источниками естественного процесса накопления напряжений в Земле, а не источниками от взрывов. С другой стороны, активная деятельность человека, направленная на стимуляцию добычи полезных ископаемых, в том числе нефти и газа, для увеличения срока рентабельности месторождений, приводит к появлению многочисленных микроземлетрясений. Увеличение нефтеотдачи пластов достигается различными средствами, включающими создание искусственных трещин путем гидроразрывов, активацию существующих разломов с помощью порового давления и так далее [1]. Стимуляция добычи может приводить и к техническим проблемам, например, к повреждению конструкций скважин. Однако ремонтными работами такие проблемы устраняются. Устранить же микроземлетрясения невозможно. Наиболее рациональный путь – исследование сейсмической информации, полученной при регистрации сигналов, с целью определения геометрии распределения трещин в окрестности коллектора, структуры флюидонасыщенной среды для того, чтобы знать, где бурить следующие скважины, чтобы обеспечить приток углеводородов.

Ключевую роль в сейсмических методах играет точность выделения вступлений Р- и S-волн, так как разности времен Р- и S-волн используются для нахождения координат гипоцентров микроземлетрясений. Однако опыт выделения вступлений на объектах нефтегазодобычи показывает, что результаты часто неоднозначны из-за того, что интенсивность двух типов разных волн соизмерима, а уровень шума достаточно высок.

Важнейшая роль при регистрации естественных природных землетрясений также принадлежит точности выделения Р- и S-волн. Известно, что между вступлениями Р- и S-

волн имеется несколько секунд. Именно эти несколько секунд могут предотвратить аварии на объектах добычи путем автоматической остановки производства на промышленных объектах после прихода Р-волны. Такие системы, позволяющие в режиме реального времени отслеживать вступления волн от сильных землетрясений, являются основой промышленной безопасности в Японии.

В настоящей статье мы описываем применение алгоритма распознавания сходных строк [2], разработанного первым автором, для отделения шумовой составляющей при регистрации сейсмического сигнала с целью адекватного снятия времен вступлений Р- и S-волн. В качестве тестируемых примеров приводятся результаты анализа сейсмограмм Исландии.

1. Общепринятые методы и предлагаемый алгоритм

На сегодняшний день среди наиболее эффективных способов анализа сейсмических данных принято считать кросс-корреляционные методы, основанные на оценке корреляции временных рядов и использовании быстрого преобразования Фурье [3]. Процесс обработки при этом включает сложные вычислительные операции с временными рядами, включающими сейсмические сигналы. Это приводит к трудностям выделения сигналов разных типов, присутствует неоднозначность решения. Для избегания подобного рода проблем необходимо применение методов, оказывающих минимальное воздействие на обработку данных исходного сигнала. В связи с этим был разработан алгоритм, позволяющий произвести оценку подобия амплитудных характеристик сигнала путем простейших арифметических операций с временными рядами.

Разработанная технология по предлагаемым критериям наиболее близка к одной из вариаций метода ветвей и границ, относящейся к «жадным» алгоритмам. Целью разработки изначально являлась задача поиска наиболее устойчивого сигнала из нескольких схожих между собой [2].

В последующем алгоритм был модифицирован и успешно применен в задаче разграничения шума и полезной части сигнала на сейсмограмме [4]. Отметим, что область применения алгоритма довольно широка, например, применение может быть осуществлено для круга задач, включающих проблему распознавания образов.

2. Синусоидальная составляющая в данных

В процессе первоначального анализа структуры сейсмического сигнала, полученного одной из сейсмостанций Исландии в 1991 году, было выявлено, что в сигнале имеется постоянная синусоида, возникшая вследствие непосредственной близости станции к Атлантическому океану. В связи с этим дальнейший процесс обработки сигнала с помощью предложенного алгоритма был существенно затруднен. Для решения подобного рода проблем обычно используются программные фильтры высоких частот. Однако неосторожное использование подобных фильтров может иметь негативные последствия, такие как потеря сигнала или части его содержащей. Среди существующих фильтров для возникшей задачи был выбран фильтр высоких частот (ФВЧ) Баттерворта [5]. Чтобы исключить вероятность потери сигнала, было проведено тестирование фильтра 3-го порядка с различной частотой среза. Результаты фильтрации, а такчжаве исходный сигнал представлены на рис. 1.

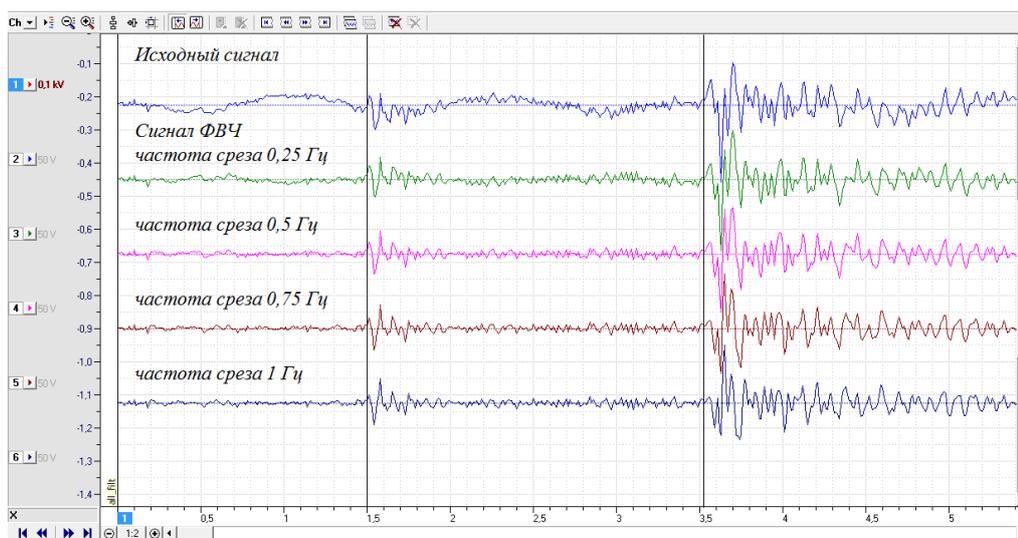


Рис. 1. Применение фильтра высоких частот Баттерворта с различной частотой среза к исследуемому сигналу

Как видно из результатов фильтрации, для устранения океанической синусоиды достаточно применить ФВЧ с частотой среза 0.25–0.30 Гц. При этом воздействие на сейсмический сигнал является минимальным. Следует отметить, что результаты фильтрации – лишь малая часть исследуемого сигнала в увеличенном виде. Исходный сигнал представляет собой двухминутную запись с частотой опроса 100 Гц (100 отсчетов

в секунду). На рис. 2 показан полноразмерный вид исходной записи (рис. 2а) и фильтрованной записи с частотой среза 0.3 Гц (рис. 2б). Проанализировав полноразмерный вид записи, можно отметить, что запись содержит несколько сейсмических событий с различным типом сейсмических волн. Благодаря применению ФВЧ Баттерворта, мы получили сигнал, характеристики которого являются достаточно приемлемыми для тестирования разработанного ранее алгоритма.

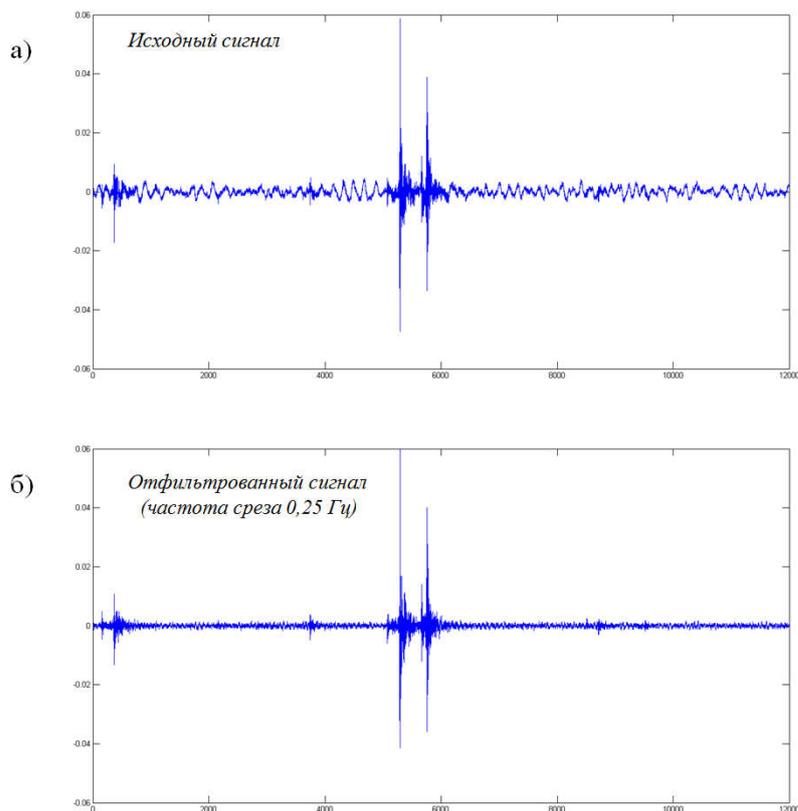


Рис. 2. Полноразмерное представление исследуемой записи в исходном (а) и фильтрованном виде (б)

3. Определение шумовых значений временного ряда сигнала

Следующим шагом в процессе обработки данных является анализ каждой секунды сигнала и выявление всех шумовых составляющих с помощью среднестатистической оценки числовых значений вектора записи. На начальном этапе исходный сигнал преобразуется в массив, каждая строка которого является одной секундой данных (рис. 3). В последующем из каждой строки выбираются локальные минимумы, из которых

формируется модель шумовых значений сигнала. Кроме того, модель формируется таким образом, чтобы полученные значения не превышали пороговых значений общего шумового фона. Это необходимо для последующего сравнения каждой секунды исследуемого сигнала с моделью шумовых значений для определения принадлежности этой части сигнала к шумам.

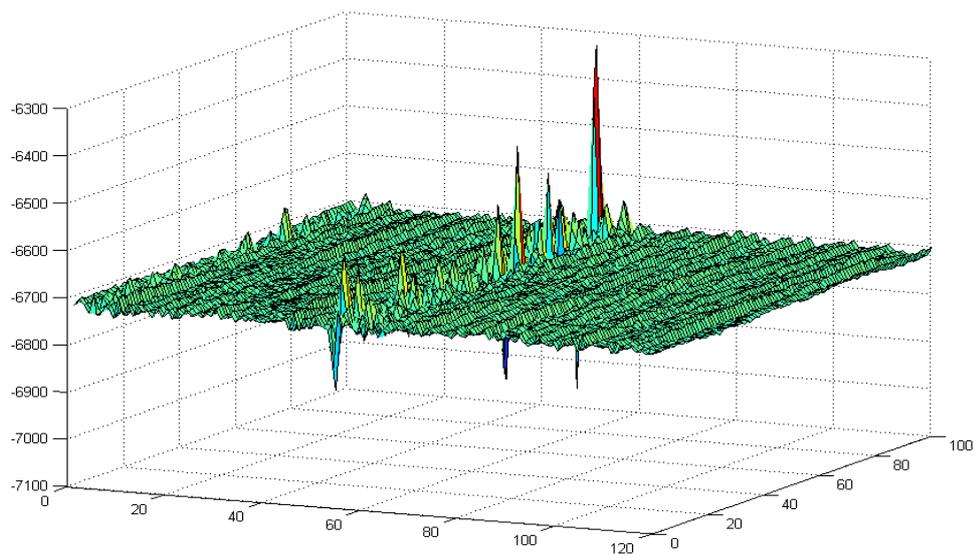


Рис. 3. Массив, каждая строка которого – одна секунда данных

Одной из ключевых особенностей алгоритма является то, что каждая секунда данных сопоставляется с моделью шумовых значений одновременно с каждой предыдущей и последующей секундами данных. Такой подход позволяет достаточно точно определить принадлежность той или иной части сигнала к шумовым значениям. В результате работы алгоритма мы имеем сейсмическую запись, в которой достаточно точно определена полезная часть сигнала. Иллюстрация результата приведена на рис. 4.

Полезная часть сигнала, обозначенная зеленым цветом, сформирована программным образом. Сравнение результата с исходным сигналом демонстрирует высокую эффективность применения разработанного алгоритма.

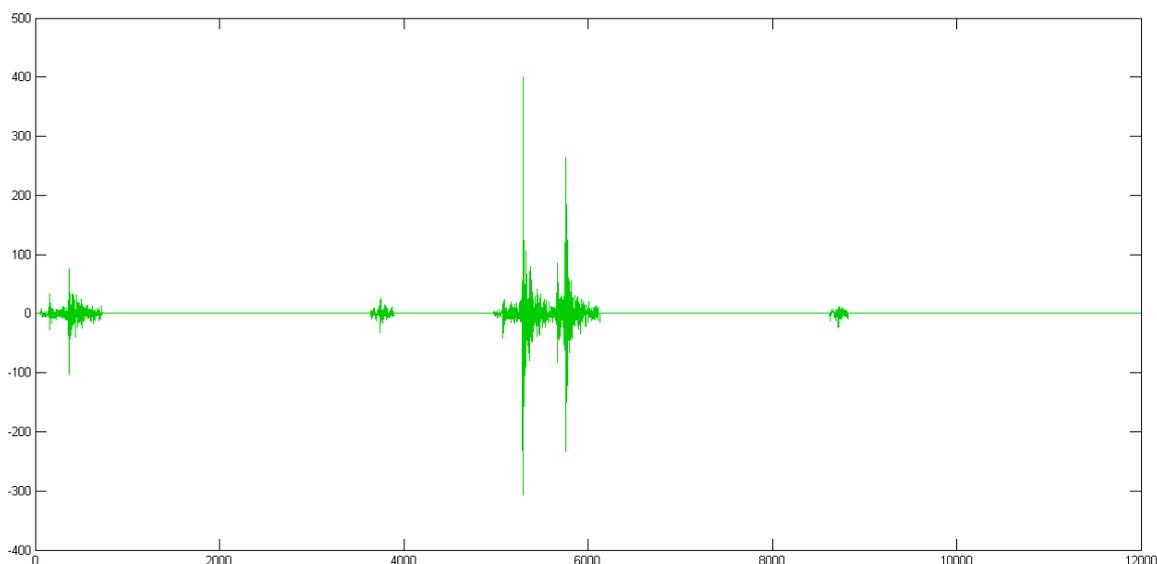


Рис. 4. Результат работы алгоритма по определению полезной части сигнала (обработка сейсмограммы станции SOL, южная Исландия, 04 апреля 1991 г.)

4. Определение времен вступлений сейсмических волн

В заключительной части анализа сейсмической записи были определены времена вступлений для каждого участка найденного полезного сигнала. В качестве примера приведен результат определения времен вступлений для первого сейсмического события в записи (рис. 5). Исследуемое событие произошло в 9 часов 13 минут 19 секунд утра. Если прибавить найденное время ко времени события, мы получим искомое время вступления той или иной сейсмической волны.

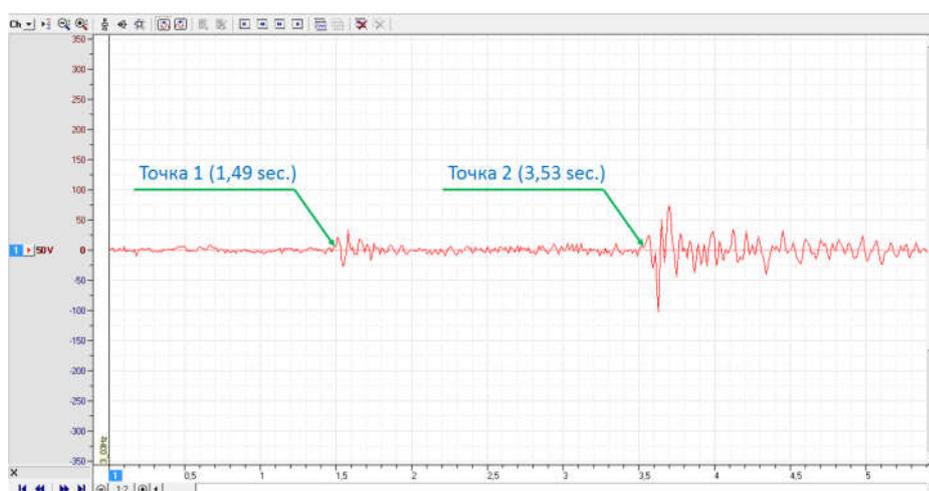


Рис. 5. Результат поиска времен вступлений для первого сейсмического события в исследуемой записи

Подробное сопоставление полученных результатов с исследуемой записью показало достаточно точное совпадение значений времен вступления с истинными характеристиками сигнала. Однако одним из недостатков работы программы является то, что на данный момент времени не реализован алгоритм определения типа сейсмической волны. В целом это возможно сделать, сопоставляя полезный сигнал с моделью волновой формы, но такая схема решения приведет к серьезным затратам оперативной и процессорной памяти в работе программы, что существенно увеличит время обработки данных.

Заключение

Для выделения полезной части сигнала в сейсмограммах землетрясений, записанных локальной сетью в Исландии, мы применили разработанный ранее численный алгоритм распознавания пар сходных строк. Результаты показывают, что в случае присутствия синусоидальной составляющей в данных необходимым условием качественной работы алгоритма является предварительная обработка временных рядов путем применения ФВЧ Баттерворта. Предложенный алгоритм может успешно использоваться для выявления шумовых значений в сейсмической записи. Алгоритм достаточно точно проявил себя в задаче определения времени вступления сейсмической волны, однако, для определения типа волны требуется значительная доработка программного кода.

Статья написана в рамках выполнения Государственного задания в сфере научной деятельности на 2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ghassemi A.* Geomechanics-Based Stochastic Analysis of Microseismicity for Analysis of Fractured Reservoir Stimulation // Proceedings. 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 13–15, 2017. SGP-TR-212. 9 p.
2. *Смагличенко А.В., Смагличенко Т.А., Саянкина М.К.* Подход к разработке жадных алгоритмов выделения неискаженных данных в задачах сейсморазведки // Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления. 2015. Том 2, № 1. С. 45–56.

3. *Rajabi N. and Rajabi O.* Real Time Earthquake Prediction Using Cross-Correlation Analysis & Transfer Function Model // Journal of knowledge – Based Engineering and Innovation. 2016. Vol. 2(6). P. 379–386.

4. *Смагличенко А.В., Калинюк И.В.* Применение алгоритма определения шумовой составляющей записи сигнала на сейсмостанциях Крыма // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: Материалы науч.-практ. конф. с междунар. уч. Севастополь, 2017. С. 1246–1248.

5. *Butterworth S.* On the Theory of Filter Amplifiers // Wireless Engineer. 1930. Vol.7. P.536–541.