

УДК 550.34

МЕТОД СЕЛЕКЦИИ И ОЦЕНИВАНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ЭВМ

Коротченко Р.А., к.т.н., старший научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: romankor@mail.ru

Ключевые слова: сейсмоакустика, селекция импульсов, фоновые колебания, импульсный паттерн, автоматизированный поиск, модуляция.

Введение

Целью работы является описание методики и алгоритмов обработки временных рядов геофизических данных, обеспечивающих автоматизированный поиск, выделение и оценку импульсов с возможностью настройки различной степени детальности селектирования составляющих импульсного пакета. Детализация импульсного паттерна предполагает выделение волновых составляющих импульсного пакета (мод) по времени вступления и, соответственно, по скорости распространения. Для большей ясности изложения процедуры обработки будут рассматриваться на примере временных рядов сейсмоакустических наблюдений. Перенос методов в условия регистрации других типов данных возможен при соблюдении подходящих пропорций между длительностями и амплитудами импульсов, характеристиками фона и частотой дискретизации входного сигнала.

Метод может применяться как в процессе оперативной регистрации сигналов, так и при постобработке. Оперативный анализ в режиме реального времени предполагает обработку очередного захваченного буфера данных, что типично для систем оперативной регистрации и усвоения данных.

При оценивании сейсмоакустических импульсов рассматриваются следующие интегральные характеристики:

– *RMS* (root mean square) – величина, пропорциональная мощности импульса. Для сейсмоакустических данных *RMS* – это среднеквадратичное значение звукового давления $p(t)$ в импульсе:

$$RMS_{imp} \equiv \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{T_{90\%}}} \quad (\text{мкПа}),$$

где $T_{90\%}$ – длительность импульса, вычисляемая в интервале от 5% до 95% кумулятивной энергии сигнала.

– *SEL* (*Sound Exposure Level*) – величина, пропорциональная общей энергии импульса

$$E_{imp} = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (\text{мкПа}^2\text{с}), \text{ где } t_2 - t_1 = T_{90\%},$$

Описаны метод и последовательность алгоритмов обработки, предназначенные для автоматизированного поиска, выделения и оценки параметров сейсмоакустических импульсов с различной степенью детализации волнового структурного шаблона (паттерна). Процедуры распознавания и селекции импульсов успешно работают в широком диапазоне отношения «сигнал/шум», благодаря использованию модели импульсов как низкочастотной модуляции фоновых колебаний. Приводятся примеры обработки реальных сигналов сейсмоакустического мониторинга.

$$SEL_{imp} \equiv SEL = 10 \log \left(\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \right) \quad (\text{дБ отн. } 1 \text{ мкПа}^2\text{с});$$

и *SPL* (*Sound Pressure Level*):

$$SPL_{RMS,imp} \equiv SPL_{rms} = 10 \log \left(\sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{T_{90\%}}} \right) \quad (\text{дБ отн. } 1 \text{ мкПа}).$$

– пиковое значение амплитуды импульса. В сейсмоакустике – максимальное значение модуля вариаций звукового давления в импульсе: $P_{peak}^{imp} = \max |p(t)|$ {Па} или

$SPL_{peak}^{imp} = 20 \log(\max |p(t)|)$ (здесь $p(t)$ в мкПа и, соответственно, SPL_{peak}^{imp} имеет размерность дБ отн. 1 мкПа).

Методика селекции и оценки импульсов Модель импульса

Типичный сейсмоакустический импульс содержит колебания с частотами от 5 до 250 Гц и характеризуется значительными изменениями амплитуды сигнала $p(t)$ и его огибающей. Импульсы, как локализованные пакеты волн различных частот и видов (продольные, поперечные и пр. моды), имеют структурный шаблон – паттерн, который может быть детализирован выделением отдельных волновых составляющих.

При наличии импульса наблюдается сильное изменение амплитуды огибающей временного ряда, обрисовывающие контур импульса (рис. 1). При более внимательном рассмотрении формы импульсного пакета и поведения огибающей можно выделить составные части паттерна: «вступление», основную часть, реверберационный «хвост». Без импульса огибающая временного ряда фоновых колебаний изменяется слабо. По сути, импульс обеспечивает низкочастотную амплитудную модуляцию несущих сейсмоакустических колебаний.

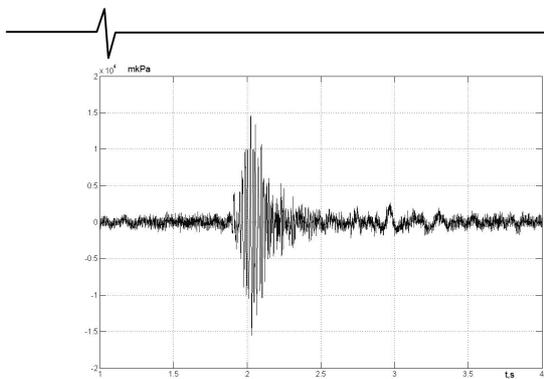


Рис.1 Типичный сейсмоакустический импульс

Поиск импульсов на фоне сейсмоакустического шума

Распознавание присутствия в сигнале $p(t)$ импульсов основано на количественной квалификации рассмотренных выше признаков. На первом шаге выполняется специальная обработка входного сигнала, далее определяются границы импульса и затем оцениваются его характеристики.

Для выделения амплитуды и фазы произвольный временной сигнал $p(t)$ представляется как вещественная часть комплексного сигнала $z(t)$. Поиск мнимой части (сопряженного сигнала) $v(t)$ производится с помощью преобразования Гильберта: ряду $p(t)$ сопоставляется сопряженный ряд с такой же огибающей [1]:

$$p(t) \rightarrow v(t) = p(t) * (1/\pi t), \quad (* - \text{свертка функций}).$$

Искомый комплексный аналитический сигнал можно записать в виде:

$$z(t) = p(t) + i \cdot v(t) = P(t) \cdot e^{i\omega t},$$

с амплитудной огибающей:

$$P(t) = |z(t)| = \sqrt{p(t)^2 + v(t)^2}.$$

Для быстрого вычисления преобразования Гильберта удобно использовать алгоритм БПФ.

Этапы работы с реальными данными состоят в следующей последовательности операций обработки.

1. Выбирается длина анализируемого блока данных. Длина блока определяется по ограничению отношения максимальной и минимальной амплитуд импульсов на сегменте как 5:1, чтобы избежать пропуска самых слабых импульсов. Отношение может меняться в зависимости от уровня шума в сигнале.

2. Блок данных дублируется. Выполняется удаление сбоев, подавление шумов и центрирование дублированного фрагмента – используется ограничение по максимально допустимой амплитуде и цифровая фильтрация полосовым фильтром в полосе 40-100 Гц [2].

3. Вычисляется огибающая фильтрованного временного ряда (цифровое преобразование Гильберта на основе БПФ с вычислением модуля сформированного комплексного сигнала).

4. Проводится медианное сглаживание огибающей с заданным окном для устранения высокочастотных колебаний.

5. Выполняется оценка минимума и максимума огибающей – поиск уровней фона и максимального пика. Разность уровней соответствует выделяемой амплитуде колебаний импульса.

6. Задаются критерии относительного превышения уровня амплитуды огибающей над фоном для переднего и заднего фронтов импульса. Типичные значения критериев – 20% и 10%. Выполняется проход вдоль огибающей ряда для поиска грубых границ импульсов.

7. Выделенный временной интервал импульса расширяется в 3-4 раза, чтобы включить слабые граничные колебания – этим достигается захват 100% временного интервала импульсных колебаний ($T_{imp(100\%)}$). Информация о границах сохраняется для оценивания параметров импульсов.

Особенности настройки селекция импульсов

При подстройке к особенностям регистрируемых временных рядов – «обучению» вычислительной системы – параметры сглаживания, расширения и пр. могут меняться.

1. Длина блока анализируемых данных выбирается исходя из изменчивости амплитуд поступивших импульсов. Внутри блока не должно быть импульсов, отличающихся более чем на порядок по амплитудам, т.к. критерии селекции нацелены на относительное превышение огибающей над фоном.

2. Выбор полос цифрового фильтра при обработке исходного временного ряда позволяет концентрировать внимание на нужном частотном интервале сигнала и подавить шумы в процессе регистрации.

3. Ширина окна медианного сглаживания и задание относительных уровней превышения максимума огибающей над фоном определяет уровень грубости выделения изменчивости ряда. Поскольку импульсный пакет «диспергирует» в процессе распространения, то эти параметры позволяют рассматривать импульс либо как одно целое, либо разделить импульс на комбинацию сигналов от составляющих волнового пакета с разным временем прибытия в точку регистрации.

Например, в условиях гидроакустики на шельфе полосовая частотная фильтрация позволяет выделить в импульсе водную составляющую со скоростью распространения около 1500 м/с и низкочастотные грунтовые группы волн. Зная дистанцию от источника до точки приема, легко оценить скорости распространения грунтовых волн.

Оценка характеристик импульса

Согласно найденным в исследуемом блоке данных границам импульсов, проводится дальнейшая обработка оригинальных данных по следующему алгоритму:

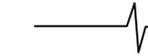
1. Оценка величины пропорциональной энергии импульса на определенном грубом 100% интервале при $E_{imp} = 90\%$ от E :

$$E = \int_{T_{imp100\%}} p^2(t) dt \approx \sum_{T_{imp100\%}} p_i^2 \cdot dt,$$

где dt – интервал между отсчетами (с), p – давление (мкПа).

2. Определение временного интервала 90% кумулятивной энергии импульса ($T_{90\%}$) предполагает:

2.1. Определение момента $t_{5\%}$ из условия



$\int_{T_0}^{t_{5\%}} P^2(t) dt = 0.05 \cdot E$, где T_0 – начало 100%-го временного интервала.

2.2. Определение момента $t_{95\%}$ из условия

$$\int_{T_0}^{t_{95\%}} P^2(t) dt = 0.95 \cdot E.$$

2.3. Оценка $T_{90\%} = t_{95\%} - t_{5\%}$, – интервала длительности импульса для изменения энергии сигнала от 5% до 95%.

3. Оценка величин *SEL* и *SPL* на интервале $T_{90\%}$.

Дополнительная фильтрация реальных импульсов от сбоев и импульсоподобных шумов производится сравнением времени $T_{90\%}$ и уровней *SEL* с минимальными и максимальными уровнями типичных сигналов. В частности, натурные фоновые акустические «всплески» имеют значения *SEL* на порядки меньшие, чем сигналы сейсмоисточников.

Примеры применения обработки импульсов в сейсмоакустических наблюдениях

Рассмотрим реальные примеры применения изложенной методики из практики обработки данных в ходе сейсмоакустического мониторинга [3].

На рис. 2 иллюстрируется работа реализованной компьютерной программы автоматического обнаружения для ситуации появления импульсов малой амплитуды в условиях зашумленного ряда данных. Отражены фрагмент исходного сигнала, результат полосовой фильтрации данных, рассчитанная огибающая, селективированные импульсы, выделенные временные интервалы $T_{100\%}$ и $T_{90\%}$.

На рис. 3 представлен результат автоматической уточняющей селекции хорошо проработанного гидроакустического импульса в процессе определения типичного паттерна волновых пакетов. Основная часть энергии пакета распространяется в водной среде со скоростью около 1500 м/с, но часть энергии передается в грунт, где возбуждаются различные типы волн, распространяющиеся с другими скоростями. В частности, для продольных и поперечных упругих волн скорости в грунте – 1800-2400 м/с. Обычно наблюдение подхода импульса к точке регистрации начинается со вступления низкочастотных грунтовых волн. На рис. 3 отчетливо видно, что по мере распространения импульса произошло существенное скоростное разделение волновых составляющих пакета. Установка подходящих критериев выделения фронтов импульса над уровнем шума и слабого сглаживания огибающей позволили разделить головные, водную и реверберационную части большого волнового пакета в виде отдельных импульсов при соотношениях амплитуд более чем 1:10.

Заключение

Разработанный метод распознавания и селекции импульсов успешно работает в широком отношении «сигнал/шум», благодаря использованию модели импульсов как низкочастотной модуляции сейсмоакустических фоновых колебаний. Набор применяемых про-

цедур обработки реализуется на основе эффективных цифровых алгоритмов и в процессе анализа данных управляется ограниченным числом параметров. Эффективность методики на практике была подтверждена в ходе сезонного мониторинга шумов сейсморазведки, обеспечив успешную автоматическую обработку многотерабайтного объема полевых данных. Число пропущенных импульсов было статистически не значимым (менее 0.1%). Следует отметить, что использование изложенной обработки применимо к разнообразным сигналам, содержащим импульсоподобные паттерны – например, к анализу речи, в сейсмологии, в системах связи и др.

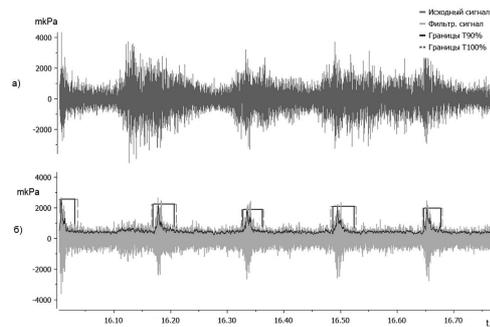


Рис. 2 Выделение слабых импульсов на фоне помех:

а) зарегистрированный сигнал,

б) результат обработки сигнала и селекции импульсов

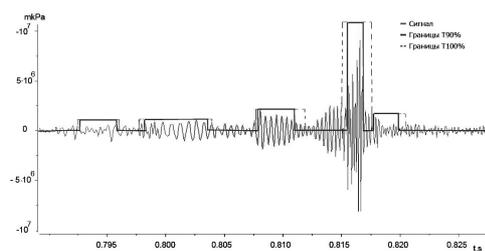


Рис.3 Селекция составляющих «диспергировавшего» импульсного пакета

Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002.
2. Хемминг Р. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987.
3. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Коротченко Р.А. и др. Мониторинг сейсмоакустических сигналов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // Акустический журнал, 2012, т. 58, № 2, С. 248-257.

METHOD FOR SEISMOACOUSTIC IMPULSES SELECTION AND ESTIMATION IN COMPUTER PROCESSING

Korotchenko R.A.

Method for detection of pulses in seismoacoustic data series is disclosed. Searching procedure can recognize pulse patterns with degrees of detail varying to separate the dispersed components of the wave packet. The method of pulses recognition and selection is based on a model of pulse shape as low-frequency modulation of the high-frequency signal and is successfully applied in a wide range of the «signal/noise» ratio. The examples of real-time signal data processing of seismoacoustic monitoring are presented.