

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Шулаков Д.Ю.

Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, shulakov@mi-perm.ru

Введение

Проведение локального сейсмологического мониторинга на горнодобывающих объектах связано с решением ряда технологических проблем, связанных с особенностями целевых сейсмических сигналов и условий поведения наблюдений. С одной стороны, регистрируемые сейсмические события, как правило, характеризуются относительно низкой энергией и высокой частотой колебаний. С другой стороны, размеры объектов мониторинга относительно невелики – от первых сотен метров до нескольких километров. Это обуславливает необходимость использования высокой частоты дискретизации – она необходима как для корректной регистрации волновых форм, так и для обеспечения достаточной точности определения координат очагов сейсмических событий.

Постановка задачи

В связи с вышеизложенным, при проведении локального мониторинга оптимальным представляется триггерный режим записи сейсмограмм – то есть, сохраняются не все непрерывные записи со всех датчиков, а только фрагменты, содержащие целевые сигналы. Это значительно снижает объемы хранимой и передаваемой информации, однако предъявляет серьезные требования к эффективности алгоритма выделения сигнала – необходимо минимизировать как количество ложных обнаружений, так и пропусков целевых сигналов. Также используемый алгоритм не должен быть очень требователен к вычислительным ресурсам (поскольку необходимо обеспечить анализ большого количества информации в режиме реального времени) и должен обеспечивать обработку непрерывного потока данных.

Как уже отмечалось, мониторинговые наблюдения ведутся на горнодобывающих предприятиях, характеризующихся высоким уровнем техногенных шумов. Кроме того, в силу относительно небольших размеров объектов и ряда технологических ограничений возможности для выбора мест расположения сейсмопавильонов, как правило, сильно ограничены. Следствием является очень сильная зашумленность получаемых сейсмограмм, причем помехи могут носить как регулярный, так и случайный характер.

Особую актуальность задача повышения эффективности обнаружения сейсмических событий и автоматизации определения их параметров приобрела при проведении мониторинговых наблюдений на аварийных участках калийных рудников. В данной ситуации мы получаем весь комплекс неблагоприятных факторов, осложняющих обработку и интерпретацию сейсмограмм, а также высокую интенсивность потока сейсмических событий. В отдельные интервалы времени здесь может регистрироваться до нескольких десятков событий в час [1].

Возможность оптимизация параметров алгоритма STA/LTA

Наиболее распространенным на сегодняшний день в сейсмологии алгоритмом-детектором является STA/LTA, использующий отношение энергии сигнала в коротком и длинном временных окнах. Для повышения его эффективности может быть использована предварительная частотная фильтрация сигнала, повышающая отношение сигнал/помеха. Данный алгоритм в настоящее время используется на всех системах мониторинга на территории Верхнекамского месторождения. Соответственно, в первую очередь была проверена возможность повышения эффективности его работы за счет подбора оптимального фильтра обнаружения сигнала. С этой целью с использованием тестового набора сигналов для каждого сейсмопавильона было рассчитано отношение сигнал/помеха (SNR) для разных параметров фильтров (частота среза фильтра ФВЧ F_1 и ФНЧ F_2). В результате для каждого события была получена зависимость $SNR(F_1; F_2)$. Данные распределения нормировались и осреднялись для каждого из типов сейсмических событий. Полученные в результате поля $\overline{SNR}(F_1; F_2)$ позволяют определить наиболее эффективный полосовой фильтр для данного типа сейсмических сигналов на конкретном сейсмопавильоне. Более подробно эта методика описана в работе [3].

В результате проведенного анализа было установлено, что сейсмические события, связанные с разными процессами, характеризуются значительно различающимися диапазонами частот колеба-

ний. Кроме того, сейсмические помехи даже для одного сейсмопавильона носят ярко выраженный нестационарный характер. К примеру, для одного и того же пункта наблюдений оптимальный фильтр для сигналов, связанных с процессами трещинообразования в коренных породах, имеет полосу пропускания 16 – 27 Гц, а для событий, вызванных процессами разрушения в слабо консолидированных породах, фильтр должен пропускать частоты от 1.3 до 4.5 Гц (рис. 1). Таким образом, либо должен использоваться фильтр с очень широкой полосой пропускания и, соответственно, низкой эффективностью, либо мы будем терять часть полезных сигналов.

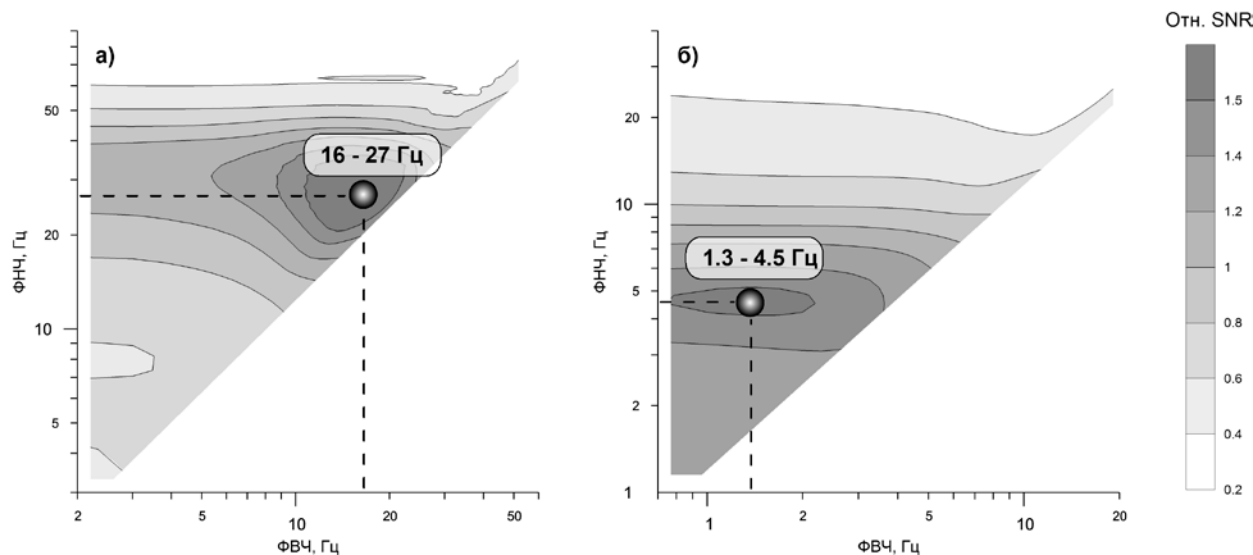


Рис. 1. Определение оптимальных фильтров обнаружения сигнала для сейсмических событий, связанных с трещинообразованием в коренных породах (а) и с разрушением в породах верхней части разреза (б).

Альтернативы алгоритму STA/LTA

Исходя из вышесказанного, было решено рассмотреть альтернативные алгоритмы обнаружения сигналов и определения времен их вступлений. Анализ литературных источников показал, что наиболее перспективными для наших условий являются алгоритмы Аллена и Баера-Крадолфера [4, 5]. Кроме того, значительный интерес представляет использование таких статистических характеристик сигнала, как эксцесс и асимметрия [8]. Суть всех используемых алгоритмов заключается в нелинейном преобразовании исходного сигнала в некоторую характеристическую функцию, превышение которой над пороговым значением считается признаком наличия полезного сигнала.

В первую очередь было выполнено тестирование этих алгоритмов на синтетических сигналах. В качестве целевого сигнала был использован импульс Берлаге с заниженным коэффициентом затухания, что приблизило его характеристики к сигналам, регистрируемым системами локального мониторинга. На этот импульс накладывались случайные и гармонические помехи с разной амплитудой и частотой. При отношении сигнал/помеха более 2 все рассмотренные алгоритмы показали удовлетворительный результат, однако когда это отношение приближалось к 1 и, особенно, когда становилось меньше, их результативность резко падала. Несколько лучше других показал себя алгоритм Баера-Крадолфера, позволяющий выделить высокочастотный сигнал на фоне интенсивной низкочастотной помехи. Однако когда частота помехи была выше, чем у полезного сигнала, его эффективность была сопоставима с остальными алгоритмами.

При тестировании на реальных записях было установлено, что асимметрия и эксцесс сигнала ведут себя совершенно иначе, чем при анализе синтетических сейсмограмм. Если для модельных примеров они давали резкие всплески в момент появления целевого импульса, то в случае реальных записей из-за нестационарного характера помех эти параметры всего лишь стабилизируются в районе какого-то значения, что значительно снижает эффективность их использования.

2-стадийное детектирование сигнала

В результате анализа полученных результатов было решено разделить процесс обработки сейсмограмм на 2 этапа. Первоначально исходные потоковые данные анализируются с использованием алгоритма STA/LTA с максимально «мягкими» настройками, т.е. он будет давать большое количество ложных обнаружений, но вероятность пропуска полезного сигнала при этом минимальна. Главные задачи этого этапа – значительно уменьшить объем данных, для которых будет проводиться углубленный анализ, и избавиться от потокового режима обработки. Режим пост-обработки относительно коротких записей позволяет использовать значительно более сложные алгоритмы.

В частности, для выявления сигнала на фоне интенсивных помех было решено использовать преобразование Гильберта-Хуанга, а точнее – его первую часть, так называемое «эмпирическое модовое разложение» (*Empirical Mode Decomposition - EMD*). Данный метод представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру разложения исходных данных (непрерывных или дискретных сигналов) на эмпирические моды или внутренние колебания. Предполагается, что любой сигнал может быть разложен на сумму колебательных режимов, каждый из которых представлен функцией внутренней моды (*intrinsic mode function - IMF*) со следующим определением:

- число экстремумов и число нулевых пересечений функции должны быть равными или отличаться самое большее на 1;
- в любой точке функции среднее значение огибающих, определенных локальными максимумами и локальными минимумами, должно быть нулевым.

Более подробно с описанием процедуры эмпирического модового разложения можно ознакомиться в работах [6,7]. Для нас ценность данного алгоритма заключается в том, что сигнал и помеха (при условии, что их частотные характеристики различаются) с большой вероятностью будут преобладать в разных эмпирических модах. При этом метод является адаптивным, т.е. нам не надо заранее знать характеристики целевого сигнала и помехи. На рис. 2 приведен пример подобного разделения. Экспериментально было установлено, что регистрируемые при локальном сейсмологическом мониторинге сигналы, как правило, оказываются в пределах первых 3-х мод, и лишь изредка их низкочастотная составляющая попадает в 4-ю и 5-ю моды [2]. При этом очень часто целевой сигнал оказывается не в одной а в 2 смежных модах (см. рис. 2).

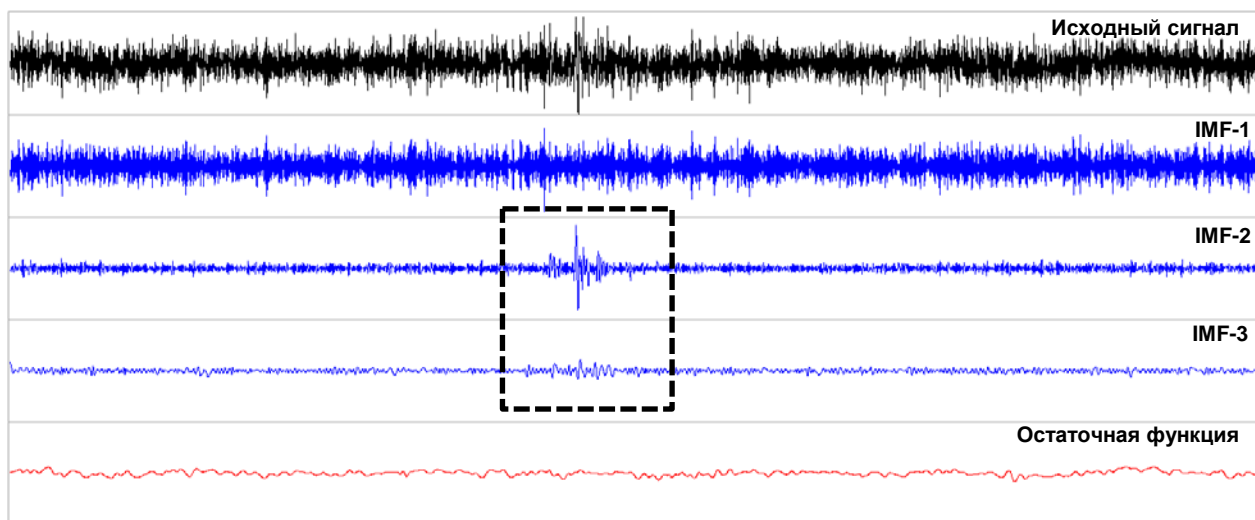


Рис. 2. Разделение сигнала и помехи при помощи алгоритма эмпирического модового разложения (EMD).

После проведения разложения каждая из полученных мод рассматривается, как самостоятельная сейсмограмма и анализируется с помощью алгоритма Баера-Крадолфера, поскольку он показал себя наиболее эффективным. Затем моды, для которых рассчитанная характеристическая функция превысила пороговое значение, суммируются, и полученный результат считается сейсмограммой, очищенной от помех. Она снова преобразуется в характеристическую функцию.

На рис. 3 на примере синтетического сигнала представлено сравнение характеристических функций, полученных при помощи алгоритма Баера-Крадолфера для исходного сигнала и для очищенного от помех при помощи алгоритма EMD. Как можно заметить, во втором случае пиковая величина характеристической функции возросла более чем на 2 порядка, что свидетельствует о высокой эффективности предлагаемого метода разделения сигнала и помехи.

Для полученной характеристической функции каждое превышение над пороговым значением считается возможным временем вступления целевого сигнала. Затем времена полученных потенциальных вступлений уточняются с использованием критерия максимального отношения сигнал/помеха.

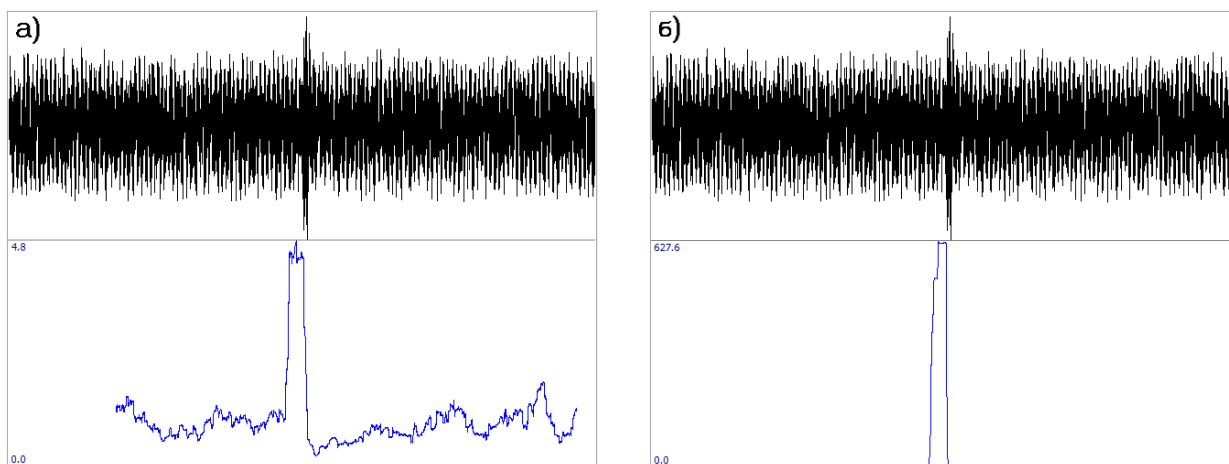


Рис. 3. Исходный сигнал и характеристические функции, полученные при помощи алгоритма Баера-Крадольфера для исходной сейсмограммы (а) и для очищенной от помех при помощи эмпирического модового разложения (б)

Подобным образом анализируется трасса с каждого из сейсмотавильонов и в результате получается набор отметок времен возможных вступлений сигнала. На каждой из трасс их может быть любое количество. Следующим шагом является «ассоциирование» - то есть выполняется проверка, могут ли отдельные вступления принадлежать одному и тому же сигналу. Эта проверка выполняется с учетом пространственной геометрии мониторинговой системы и скоростной модели среды. Если обнаруживается достаточное количество вступлений, потенциально принадлежащих одному событию, выполняется попытка определить параметры его очага. Если это удается сделать с допустимой невязкой как по временам вступлений, так и по амплитудам сигналов, анализируемая сейсмограмма помечается как содержащая полезный сигнал, а информация о характеристиках очага передается для дальнейшей обработки. Если же выделенные детектором вступления не ассоциируются в событие или результаты локации дают неудовлетворительный результат, запись помечается как «помеха». Разумеется, возможен и промежуточный результат – когда сейсмограммы нельзя с полной уверенностью отнести ни к сейсмическим событиям, ни к помехам. В этом случае запись отмечается как сомнительная и в дальнейшем ее анализирует оператор.

Вывод

Внедрение описанного алгоритма в систему обработки данных локального сейсмологического мониторинга позволяет значительно повысить как эффективность обнаружения полезных сигналов, так и скорость обработки, а также снизить объем рутинной ручной работы за счет эффективной разбраковки триггерных записей и автоматического определения параметров очагов сейсмических событий.

Список литературы

1. Дягилев, Р.А. Сейсмичность карстово-суффозионных процессов / Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, П.Г. Бутырин // Геофизика, №5, 2012. С.54-59.
2. Шулаков Д.Ю. Использование преобразования Гильберта-Хуанга для обработки данных сейсмологического мониторинга // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып.10. Пермь: ГИ УрО РАН, 2012. С. 204-206.
3. Шулаков Д.Ю. Развитие системы сейсмологического мониторинга территории г. Березники // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 358-361.
4. Allen, R. V. Automatic phase pickers: their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 72, pp. 225-242, 1982
5. Baer M. An automatic phase picker for local and teleseismic events / M. Baer, U. Kradolfer // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77, No. 4, pp. 1437-1445, 1987
6. Huang, N. E. Hilbert-Huang Transform and Its Applications / N. E. Huang, S. P. Shen.- Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005. 324 p.
7. Huang, N. E. Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long et al. // Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
8. Kuperkoch, L. Automated Recognition, Phase Arrival Time Estimation and Location of Local and Regional Earthquakes [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/net/html/HSS/Diss/KueperkochLudger/diss.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.