

УДК 681.51

ДЕТЕКТОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МОМЕНТА ВСТУПЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ.

А.Б. ДАВЫДОВ, А.И. ШЕМАРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Белорусский национальный технический университет
пр. Скорины, 65, 220027, Беларусь*

Поступила в редакцию 14 октября 2010

Рассмотрены алгоритмы распознавания сейсмических событий, предложена структурная схема устройства детектора для обнаружения момента вступления сейсмической волны.

Ключевые слова: скачкообразное изменение сигнала, сейсмические события, сейсмический шум, детектор для обнаружения скачка.

Введение

В настоящее время в результате интенсивного внедрения цифровых способов регистрации и обработки сигналов все более актуальное значение приобретают методы автоматизированной регистрации и обработки информации о происходящих сейсмических событиях. Для определения момента наступления сейсмического события автоматизированные системы обработки сейсмической информации должны работать в непрерывном режиме. Это требует, с одной стороны, непрерывной записи данных о регистрируемых событиях в устройство буферной памяти большого объема. С другой стороны, время непрерывного ожидания сейсмического события может значительно превышать время регистрации сейсмического события, что, в свою очередь, приводит к нерациональному использованию ресурсов системы в целом. Например, время работы от автономного источника питания в полевых условиях и т.д. Поэтому обычно приходится идти на компромисс за счет точности регистрации события.

Основной задачей автоматизированных систем обработки сейсмической информации является задача идентификации сейсмического события, т. е. определение координат и магнитуды землетрясения. Задача, связанная с обнаружением и оценкой сейсмического сигнала на фоне микросейсмического шума состоит в исследовании различия между сигналом и шумом для улучшения способности обнаружения.

Поэтому время начала регистрации события должно быть внешним прерыванием для регистрирующей системы. В этом случае легко обойтись коротким, а следовательно, относительно дешевым и малопотребляющим энергией буфером типа FIFO.

Обнаружение момента вступления сейсмической волны (формирование внешнего прерывания) возможно с помощью метода, основанного на регистрации скачкообразного изменения (скачка) наблюдаемого параметра процесса [1]. Скачок сигнала представляется в виде резкого изменения наблюдаемого параметра процесса. Обнаружение скачка изменения сигнала на фоне шума осуществляется с помощью детектора, регистрирующего скачок сигнала в реальном масштабе времени.

Постановка задачи

Для решения задачи идентификации сейсмического события, т.е. определение координат и магнитуды землетрясения, необходима точная информация о времени прихода, амплитуде и фазе основных сейсмических волн (P , S , L) [2]. Азимут на эпицентр землетрясения определяется первичной оценкой момента вступления продольной P -волны, а также ее фазой.

Регистрация в точке приема сейсмических волн осуществляется на фоне широкополосного сейсмического шума (помехи). Процесс обнаружения и оценки сейсмического сигнала на фоне помехи состоит в исследовании различия между сейсмическими сигналами и помехой для улучшения способности обнаружения.

Исследования амплитуд и периодов основных сейсмических сигналов, а также их спектров на телесеизмических расстояниях для Минской области показывают, что исходя из наблюдаемых спектров сейсмических помех, наибольшее отношение сигнал/шум может быть получено для сейсмических сигналов с периодами в диапазоне $0,1\text{ñ} - 1,0\text{ñ}$. Именно в этой области частот возможно получение максимального отношения сигнал/шум [3]. В общем случае статистические характеристики помехи зависят от времени и места наблюдения, т.е. они нестационарные как во времени, так и в пространстве [4].

Точность определения амплитуд и времени прихода сейсмической волны обуславливается отношением сигнал/шум и степенью совпадения спектрального состава волны с полосой пропускания регистрирующей аппаратуры.

Решение задачи, связанной с обнаружением момента вступления P -волны анализируемого сейсмического сигнала, возмущаемого шумом, возможно с использованием различных алгоритмов [1, 4, 5]. В качестве критерия принятия решения в рассмотренных алгоритмах используется факт наступления события превышения уровня анализируемого параметра над уровнем опорного значения, задаваемый параметром на интервале времени, выделяемом для анализа факта наступления события скачка (метод скользящего среднего).

Теоретический анализ

Анализ предлагаемого метода построения детектора скачка разобьем на два этапа. Прием сейсмических волн осуществляется на фоне широкополосного сейсмического шума. Поэтому первый этап предварительной обработки заключается в повышении качества анализируемого сигнала. Под качеством сигнала понимается отношение сигнал/шум. Повышение качества анализируемого сигнала достигается проведением полосовой фильтрации, позволяющей уменьшить уровень шума.

С помощью полосовой фильтрации из исходного сигнала выделяется узкий диапазон частот, в котором ожидается появление регистрируемого события. Полоса пропускания фильтра должна содержать частоту максимума спектральной плотности приходящей P -волны для точки регистрации.

Предположим, что необходимо определить момент и величину скачкообразного изменения анализируемого сигнала, возмущаемого белым шумом. Для решения данной задачи представим регистрируемый сигнал $y(t)$ в виде

$$y(t) = s(t) + n(t),$$

где $s(t)$ – анализируемый сигнал, $n(t)$ шум.

Зависимость выходного сигнала $z(t)$ во временной области с учетом реакции полосового фильтра может быть представлена в виде

$$z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(\tau) h(t - \tau) d\tau,$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика полосового фильтра.

Если $n(t)$ – белый шум, то в качестве полосового фильтра может быть использован фильтр с импульсной характеристикой вида [6]:

$$h(\tau) = \frac{\sin \pi \tau / kT}{\pi \tau / kT} \sin \frac{2\pi}{T} \tau; \quad \text{где } |\tau| \leq kT,$$

где k – параметр, управляющий селективностью фильтра, T – период сигнала, на выделение которого настроен фильтр. Предложенный фильтр имеет полосу пропускания (при $k=1$) на уровне 0,5, равную $0,8 T$, что является оптимальным для выделения сейсмического сигнала на фоне белого шума.

Вторым этапом обработки является определение спектральной плотности мощности отфильтрованного сигнала или его среднего значения.

Определяющим параметром периодического сигнала $z(t)$ является средняя мощность P , измеренная на ограниченном интервале T [7]:

$$P = \overline{z_0^2(t_0, T)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |z(t)|^2 dt.$$

Регистрируемый сигнал во временной области $z(t)$ в частотной области может быть определен функцией спектральной плотности $F(\omega)$, представляющей прямое преобразование Фурье сигнала $z(t)$.

Средняя мощность сигнала P , определяемая спектром плотности энергии $|F(\omega)|^2$, имеет вид [8]

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |z(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F(\omega)|^2}{T} d\omega.$$

Выражение для спектра плотности мощности $S_f(\omega)$ сигнала $z(t)$ равно

$$S_f(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} |F(\omega)|^2 / T.$$

Средняя мощность сигнала P связана со спектром плотности мощности $S_f(\omega)$ соотношением

$$P = \overline{z_0^2(t_0, T)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |z(t)|^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_f(\omega) d\omega.$$

Решение о начале регистрируемого события принимается в случае, если средняя мощность регистрируемого сигнала превышает среднюю мощность шума.

В ряде аналоговых устройств распознавания вместо возведения в квадрат используется его выпрямление [9].

Периодическая функция $z(t)$ на интервале $(t_0 < t < t_0 + T)$ с периодом $T = 2\pi/\omega$, при $T=1$ есть «выпрямленная» синусоидальная функция. Тригонометрический ряд Фурье которой равен

$$z(t) = \frac{4}{\pi} A \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega - \frac{1}{15} \cos 4\omega + \frac{1}{35} \cos 6\omega - \dots \right) \quad [10].$$

Спектр рассматриваемой функции существует на частотах, равных $0, \pm 2\omega, \pm 4\omega, \pm 6\omega \dots$ с соответствующими амплитудами составляющих $2A/\pi, 4A/3\pi,$

$4A/15\pi, 4A/35\pi \dots$. Среднее значение равно функции $\langle z(t) \rangle = 2A/\pi$. Высокочастотные гармоники (помеха), возникающие в результате нелинейной операции выпрямления, подвергаются низкочастотной фильтрации.

В источнике [5] рассмотрен алгоритм решение задачи распознавания наступления сейсмического события на основе использования оценок мгновенной спектральной плотности сигнала с помощью построения его огибающей. С этой целью при проведении полосовой фильтрации определяются квадратурная и синфазная составляющие сигнала, путем умножения входного сигнала на $\cos \omega_c t$ и $\sin \omega_c t$ с последующим суммированием. Действительная и мнимая части вычисляются по формулам

$$\operatorname{Re} z_T^-(t, \omega) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} z(\tau) \sigma_T(t-\tau) \cos \omega \tau dt,$$

$$\operatorname{Im} z_T^-(t, \omega) = - \int_{t-T/2}^{t+T/2} z(\tau) \sigma_T(t-\tau) \sin \omega \tau dt,$$

где $\sigma_T(t)$ – полосовой фильтр, настроенный на период T .

Спектр амплитуды регистрируемого сигнала определяется выражением

$$E = \left| z_T^-(t, \omega) \right| = \left\{ \left[\operatorname{Re}^2 z_T^-(t, \omega) + \operatorname{Im}^2 z_T^-(t, \omega) \right] \right\}^{1/2}.$$

При достижении величиной E опорного значения вырабатывается сигнал о начале регистрируемого события.

В источнике [1] рассмотрен алгоритм, определения момента времени наступления сейсмического события в зависимости от величины анализируемого сигнала. Данный алгоритм предполагает, что если определено среднее значение $\langle z_0(t) \rangle$ анализируемого сигнала соответствующее отсутствию наступления сейсмического события, то принятие решения об обнаружении начала события минимальной величины γ_m определяется превышением среднего значения функции с учетом знака над заданным пороговым значением λ . Величина регистрируемого события определяется решением следующей системы уравнений.

Для обнаружения уменьшения среднего имеем

$$\begin{cases} T_0 = 0, \\ T_n = \sum_{k=1}^n \left[z_k(t) - \langle z_0(t) \rangle + \frac{\gamma_m}{2} \right] \quad (n \geq 1), \\ M_n = \max_{0 \leq k \leq n} T_k \\ \text{и } M_n - T_n \geq \lambda \end{cases}$$

а для обнаружения увеличения среднего:

$$\begin{cases} U_0 = 0, \\ U_n = \sum_{k=1}^n \left[z_k(t) - \langle z_0(t) \rangle - \frac{\gamma_m}{2} \right] \quad (n \geq 1), \\ m_n = \min_{0 \leq k \leq n} U_k \\ \text{и } U_n - m_n \leq \lambda \end{cases}$$

За оценку момента времени наступления сейсмического события γ_m , определяемого превышением анализируемого сигнала заданного порогового значения, берется момент времени непосредственно перед обнаружением максимума M_n (соответственно минимума m_n).

Среднее значение $\langle z_0(t) \rangle$ анализируемого сигнала $z(t)$ за период наблюдения T , определяется либо путем интегрирования, либо путем определения среднеквадратического значения

$$\langle z_0(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt \leq \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt}.$$

В качестве интегрирующего элемента возможно применение схемы интегратора, выполненного на основе активного элемента (операционный усилитель), либо пассивного интегрирующего звена.

Рассмотрим возможность использования в качестве интегрирующего элемента пассивного интегрирующего звена. Простейшим интегрирующим звеном (инерционным звеном первого порядка) является RC -цепь, одновременно являющаяся фильтром низкой частоты (ФНЧ) первого порядка. Реализация интегрирующего элемента с помощью RC -цепи позволяет упростить схемотехническое решение по сравнению с применением интегратора выполненного на активном элементе.

При выполнении условия $U_{\dot{A}\dot{O}} \gg U_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}$, что обеспечивается при частоте входного сигнала $f \gg f_{\dot{N}D}$, выходное напряжение интегрирующего звена равно

$$U_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}} = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\dot{A}\dot{O}}(t) dt.$$

Значение фазового сдвига выходного сигнала для RC звена при различных отношениях частоты текущего значения f к частоте среза $f_{\dot{N}D} = 1/2\pi RC$ будет равно

$$\begin{aligned} \phi &= 45^\circ, & f/f_{\dot{N}D} &= 1 & \delta[\%] &= 50,00; \\ \phi &= 84,29^\circ, & f/f_{\dot{N}D} &= 10; & \delta[\%] &= 6,34; \\ \phi &= 89,43^\circ, & f/f_{\dot{N}D} &= 100. & \delta[\%] &= 0,63. \end{aligned}$$

Коэффициент передачи инерционного звена первого порядка равен

$$U_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}/U_{\dot{A}\dot{O}} = [1 - \exp(-t/\tau)], \text{ где } \tau = RC.$$

При времени $t = 10\tau$ выходное напряжение на конденсаторе \tilde{N} обеспечивает точность анализа с погрешностью 0,005% относительно изменения входного напряжения.

Передаточная функция инерционного звена первого порядка в операторной форме описывается выражением

$$T(p) = 1/pRC,$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени RC — звена.

Спектральная плотность на выходе инерционного звена определяется выражением

$$S(\omega) = 2\alpha/(\alpha^2 + \omega^2), \text{ где } \alpha = 1/\tau.$$

Импульсная характеристика инерционного звена первого порядка равна

$$h(t) = (1/\tau) \exp[-(1/\tau)t]$$

Передаточная функция реального интегратора в операторной форме описывается выражением

$$T(p) = \hat{E}_{OU}/(pRC + 1),$$

где RC — звено, включенное в цепь обратной связи операционного усилителя.

Следовательно, реальный интегратор, имеющий коэффициент усиления по постоянному току операционного усилителя равный \hat{E}_{OU} и эквивалентную постоянную времени $\tau = \hat{E}_{OU}RC$, ведет себя как инерционное звено первого порядка.

Анализ параметров фазового сдвига, а также передаточных функций, позволяет сделать вывод, что на частотах входного сигнала, превышающих $10f_{NB}$, пассивное RC звено первого порядка можно представить с определенной погрешностью в виде интегрирующего звена.

С учетом импульсной характеристики инерционного звена, среднее значение $\langle z_0^-(t) \rangle$ функции $z(t)$ за период T определяется выражением

$$\langle z_0^-(t) \rangle = \int_0^T \exp \left[-\frac{1}{\tau}(T-t) \right] |z(t)| dt.$$

Изменив постоянную времени (RC) звена таким образом, чтобы частота среза частотной характеристики фильтра была ниже, чем нижняя частота ожидаемого сигнала, получим новое значение $\langle z_{01}^-(t) \rangle$.

Составив отношение $\langle z_0^-(t) \rangle / \langle z_{01}^-(t) \rangle$, проведем тем самым нормировку отношения сигнал/шум в текущий момент времени. Таким образом, отпадает необходимость введения временной задержки.

Структурная схема устройства для обнаружения момента вступления сейсмического сигнала, реализующего данный алгоритм, представлена на рис. 1.

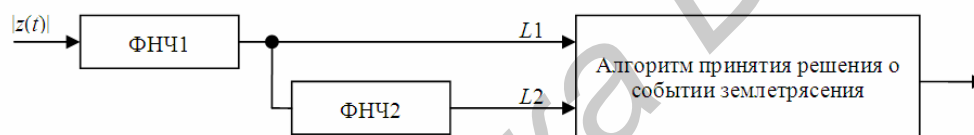


Рис. 1. Структурная схема устройства для обнаружения момента вступления сейсмического сигнала

Отношение $L1/L2$, где $L1$ уровень сигнала соответствующий текущему моменту времени, $L2$ уровень сигнала, характеризующий предысторию процесса с учетом шумов, используется для принятия решения о сейсмическом событии. До тех пор пока не происходит резких изменений анализируемого сигнала, отношение $L1/L2$ не превышает единицы. Превышение вышеуказанного отношения единичного значения указывает на изменение сигнала, свидетельствующего о сейсмическом событии, что и положено в основу алгоритма, используемого для принятия решения.

Частота среза ФНЧ1, а следовательно и постоянная времени фильтра, определяется исходя из требований системы на степень подавления высокочастотных гармоник. Частота среза фильтра предыстории ФНЧ2 рассчитывается на основе предположения, что резких изменений анализируемого сигнала не происходит или не будет происходить.

Особенностью реализации данного метода является то, что алгоритм, связанный с принятием решения в малой степени зависит от уровня помех и обладает малым запаздыванием в обнаружении искомого события.

С целью уменьшения числа ложных тревог методы обнаружения сейсмического события могут быть дополнены проверкой анализируемого сигнала на признак регулярности. Признак регулярности заключается в анализе количества пересечений заданного порогового уровня за определенное время. При этом момент определения сейсмического события отождествляется с моментом первого пересечения порогового уровня. Преимуществом совмещения выше рассмотренных методов обнаружения сейсмического события с проверкой на регулярность является уменьшение частоты появления ложных тревог. Однако при этом увеличивается вероятность пропуска сейсмического события при задании большого значения числа анализируемых пересечений порогового уровня.

На основании рассмотренных методов обнаружения сигнала сейсмического события нами предлагается структурная схема устройства детектора для обнаружения момента вступления сейсмической P -волны. (рис. 2).

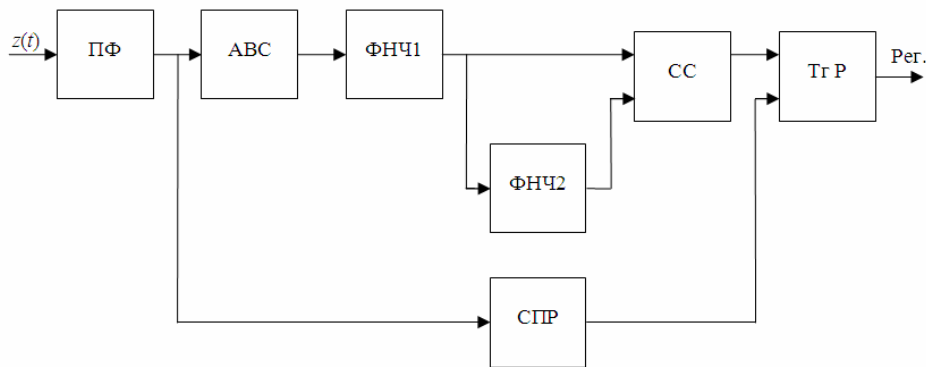


Рис. 2. Структурная схема устройства детектора для обнаружения момента вступления сейсмической волны

Анализируемый сигнал подвергается полосовой фильтрации с помощью блока полосового фильтра (ПФ), для выделения максимума энергии полезного сигнала. Далее сигнал характеризующий изменяющуюся во времени энергию, ограниченную в заданной полосе выделенной для анализа в момент времени t сравнивается с энергией этого же сигнала, наблюдаемого ранее (в момент времени $t - t_{зад}$). При этом фиксируются события превышения энергией выделенного сигнала в K раз по сравнению с энергией задержанного сигнала. Одновременно производится анализ регистрируемого сигнала по признаку регулярности появления события.

Устройство, анализирующее отфильтрованный сигнал по энергетическому признаку включает блок выделения абсолютной величины сигнала (АВС), блоки фильтров нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 и блок схемы сравнения (СС). При этом частота среза ФНЧ1 не должна превышать верхнюю частоту среза полосового фильтра. Частота среза ФНЧ2 выбирается из условия, чтобы частота среза фильтра была бы меньше или равна нижней частоте анализируемого сигнала. Блок ФНЧ2 является элементом привязки порогового напряжения к уровню помех. ФНЧ1 и ФНЧ2 совместно со схемой сравнения образуют пороговую схему. Особенностью данного детектора является изменение уровня опорного напряжения пороговой схемы в зависимости от уровня помех. Выходной сигнал пороговой схемы поступает на вход установки блока триггера разрешения (ТгР). Выходной сигнал блока схемы проверки регулярности (СПР), включающий счетчик пересечений заданного уровня и таймер, поступает на вход сброса триггера разрешения. При выполнении условий, заключающихся в наличии в анализируемом сигнале энергетического признака и признака регулярности, характеризующих скачкообразное изменение сигнала, на выходе триггера разрешения формируется сигнал «Запуск» поступающий на исполнительное устройство, в качестве которого может быть использован цифровой регистратор с буфером предыстории регистрации относительно сигнала запуска.

Заключение

С целью повышения достоверности распознавания сейсмических событий предложен алгоритм, основанный на сравнении энергетических характеристик анализируемого сигнала с проверкой происходящего события по признаку регулярности. Особенностью данного метода распознавания сейсмических событий является то, что алгоритм, связанный с принятием решения о наличии землетрясения в малой степени зависит от уровня микросейсмических помех и обладает малым запаздыванием в обнаружении. На основании рассмотренного метода предложена структурная схема устройства детектора для обнаружения момента вступления сейсмической волны, которое может быть использовано в качестве сигнализатора момента вступления сейсмической P -волны, то есть начала землетрясения. Предлагаемые алгоритмы и устройства могут иметь более широкое применение. В частности они могут использоваться для обнаружения развивающихся механических дефектов в деталях машин и механизмах, а также раннего выявления дефектов в источниках питания импульсной, цифровой и вычислительной техники.

DETECTOR FOR LOCATION OF THE ENTRANCE OF A SEISMIC WAVE

A.B. DAVYDOV, A.I. SHEMAROV

Abstract

Algorithms for recognition of seismic events in given article are presented. The block diagram of the detector device for using in seismograph was designed.

Литература

1. *Бассвиль М.* Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем М., 1989.
2. *Эйби Дж.А.* Землетрясения. М., 1982.
3. *Кондорская Н.В.* // Геология Белоруссии. 1981. С. 138–141.
4. *Мостовой С.В.* Оптимальные оценки параметров геофизических полей. Киев, 1987.
5. *Емельянов А.П., Астапенко В.Н., Долгополов Д.В.* // Геология Белоруссии. С. 141–145.
6. *Уломов В.И.* Автоматизация сбора и обработки сейсмологической информации. Ташкент, 1976.
7. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М., 1983.
8. *Лахти Б.П.* Системы передачи информации. М., 1971.
9. *Голд Б., Рэйдер Ч.* Цифровая обработка сигналов. М., 1973.
10. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М., 1974.