

УДК 621.391.519.24

Д.О. Соколова, А.А. Спектор

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННОЕ НА ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ С «НУЛЕМ»

Рассматривается задача обнаружения объектов в сейсмических системах охраны на основе счетчика пересечений сигналом нулевого уровня. Разработан непараметрический алгоритм, выполнено определение его эффективности.

Ключевые слова: *обнаружение сигналов, счетчик пересечений с «нулем».*

Известен широкий класс информационных систем, функционирование которых включает обнаружение стохастического сигнала, наблюдаемого на фоне случайной помехи. Помехи могут возникать в устройстве, регистрирующем информационный сигнал (например, внутренний шум приемника), а также вызваны действиями внешних источников (часто большого числа). Примерами таких систем являются обнаружители сигналов в гидролокации, радиотеплолокации, в системах передачи речевых сигналов, а также в сейсмических системах обнаружения. На рис. 1 в качестве примера приведена запись сигнала, записанного на выходе цифрового сейсмического датчика сейсмической системы охраны «Азимут» при проезде мимо него автомобиля. Как видно из рисунка, при появлении сейсмоактивного объекта начинается нарастание энергии сигнала, а затем ее спад. Максимум интенсивности соответствует наименьшему удалению объекта от датчика. Известны исследования, в которых обнаружение основано на энергетических свойствах сигналов [1–3]. Обычно используются характерные особенности модуляции интенсивности сигнала, свойственные тому или иному типу сейсмоактивных объектов. При этом алгоритм обнаружения оказывается жестко привязанным к типу объекта, что является не всегда удобным.

Представляется полезным исследование возможности применения иных, отличных от энергетических, характеристик сигналов, в поведении которых также отражается присутствие полезных компонент, чья регистрация была бы менее зависимой от особенностей различных объектов. Среди различных типов характеристик особого интереса заслуживают такие, на основе которых можно построить правила обнаружения, обладающие устойчивостью по отношению к параметрам помехи. В этом случае облегчается разработка обнаружителя Неймана – Пирсона, важным требованием к которому является стабилизация вероятности ложного обнаружения (ошибок первого рода).

Во многих случаях физическая природа полезного сигнала и помех содержит в себе суммирование большого числа случайных процессов, вызванных действием многих элементарных источников, а также наличием многих путей распространения сигналов в физических средах. Это приводит к гауссовским распределениям сигналов, наблюдаемых на приемных апертурах. Обычно параметры этих физических явлений для помех и для полезных сигналов различаются, поэтому у наблюдаемых процессов различаются спектрально-корреляционные характеристики полезного сигнала и помехи, которые обычно неизвестны. Одно из проявлений спектрально-корреляционных различий состоит в изменении количества пересе-

чений случайным процессом нулевого уровня при смене помехи на входе приемно-регистрирующего устройства смесью сигнала и помехи. В данной работе изучаются характеристики обнаружения, основанного на регистрации «нулей» на примере сейсмической системы обнаружения (ССО).

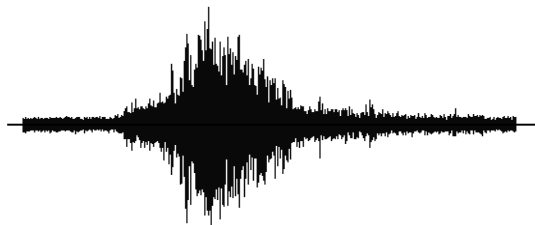


Рис. 1. Пример реализации сейсмосигнала

В состав ССО обычно входит большое количество сейсмических датчиков, аналоговые сигналы которых после преобразования в цифровую форму поступают в вычислительное устройство, также входящее в состав ССО. Здесь выполняются все операции, обеспечивающие обнаружение сигналов, оценку координат объекта-источника сигнала, его классификацию [1, 4 – 8]. Обнаружение сигнала может выполняться путем совместной обработки сигналов группы датчиков, однако элементами такой интегрированной обработки могут служить локальные обнаружители, работающие на сигналах отдельных датчиков. Такие же локальные обнаружители представляют интерес для многих других типов информационных систем, в том числе упомянутых выше. Поэтому ниже рассматривается обнаружение скалярного гауссовского сигнала на основе анализа пересечений с «нулем».

1. Постановка задачи

Как отмечалось выше, сигналы, регистрируемые датчиками системы, представляют собой гауссовские процессы. Их спектрально-корреляционные свойства позволяют использовать марковские модели, основанные на линейных механизмах предсказания. При обнаружении сейсмоактивных объектов, оценивании параметров и траекторий их движения в качестве первичной обработки в ряде исследований предлагается осуществлять адаптивную декорреляцию (выбеливание) фоновый сигнала [1, 5 – 6]. Обучение, выполняемое на участках, где присутствует только фоновый сигнал, сводится к измерению его корреляционной функции. С ее помощью затем определяются коэффициенты предсказания, описывающие линейный рекуррентный механизм порождения фона из белого шума. Эти же коэффициенты определяют и механизм выбеливания, при выполнении которого на участках фона образуется белый гауссовский шум. На участках же, где имеется смесь полезного сигнала и фона, составляющая полезного сигнала, также подвергнутая выбеливанию (но по параметрам модели фона) остается окрашенным гауссовским процессом, сохраняющим индивидуальные особенности спектрально-корреляционных характеристик, свойственные тому или иному типу сейсмоактивного объекта.

На рис. 2 представлены примеры сейсмического фона и смеси полезной составляющей сигнала автомобиля и сейсмического фона соответственно. Предварительно было проведено «выбеливание» сигналов по параметрам фоновой помехи. Как видно из рисунка, на участках одинаковой длительности сигнал с полез-

ной составляющей, являясь окрашенным гауссовским процессом, пересекает нулевой уровень около 20 раз, в то время как аналогичный показатель для фоновой составляющей в 2 раза выше. Это позволяет сделать предположение об использовании данного показателя в качестве признака при определении типа сигнала: фоновая помеха или полезный сигнал.

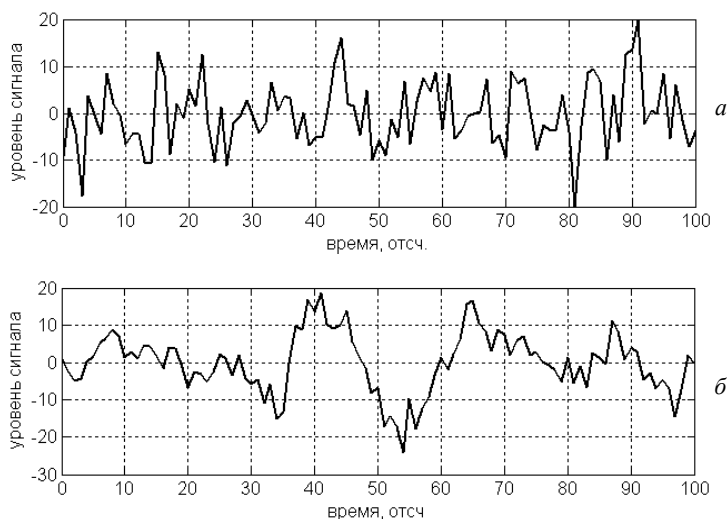


Рис. 2. Пример фоновой (а) и полезной (б) составляющих сейсмического сигнала

Задача обнаружения полезного сигнала, наблюдаемого на неоднородном фоне, в общем случае носит вероятностный характер. Для решения вопроса о наличии сигнала можно принять правило: полезный сигнал отсутствует, если количество пересечений превышает некоторое пороговое значение, и полезный сигнал присутствует в противоположном случае.

В рассматриваемой задаче обнаружения можно сформировать две гипотезы: гипотеза H_0 – наблюдаемый сигнал x_i , $i = 1 \dots I$, длительностью I отсчетов представляет собой сейсмический фон ξ_i ; и гипотеза H_1 – наблюдаемый сигнал x_i , $i = 1 \dots I$, длительностью I отсчетов складывается из полезного сигнала s_i и сейсмического фона ξ_i , то есть

$$\begin{aligned} H_0 : x_i &= \xi_i, & i &= 1 \dots I, \\ H_1 : x_i &= s_i + \xi_i, & i &= 1 \dots I. \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим участок выделенного сигнала x_i , $i = 1 \dots I$, длительностью I отсчетов. Для каждой пары соседних отсчетов введем случайную величину v_i равную единице, если в пределах этой пары сигнал x_i пересекает уровень $x = 0$ (произведение $x_i x_{i+1}$ меньше нуля) и равную нулю, если такого пересечения не происходит:

$$v_i = v(x_i, x_{i+1}) = \begin{cases} 1, & x_i x_{i+1} < 0, \\ 0, & x_i x_{i+1} \geq 0. \end{cases}$$

Полученная случайная величина v_i распределена по закону Бернулли и представляет собой индикатор пересечения. Общее число пересечений на интервале I образует решающую статистику:

$$z = \sum_{i=1}^I v_i. \quad (3)$$

Как отмечалось ранее, при построении решающей статистики z используются предварительно выбеленные сигналы, представляющие собой гауссовские процессы с нулевым средним значением. Так как математическое ожидание $\bar{x}$ анализируемого сигнала x равно нулю, то z инвариантно относительно преобразования масштаба, то есть z не зависит от дисперсии фона. При появлении в x_i коррелированной компоненты число пересечений нулевого уровня уменьшается, что может служить информацией о наличии полезного сигнала. Другими словами, если на интервале I количество пересечений z сигналом нулевого уровня превышает некоторый заранее определенный порог, то обнаружителем принимается решение об отсутствии информационной составляющей в сигнале, регистрируемом датчиком; если же количество пересечений меньше указанного порогового значения – принимается решение о наличии полезной составляющей. Исходя из вышесказанного, решающее правило обнаружителя можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_0^* : z &\geq z_0, \\ H_1^* : z &< z_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где z_0 – порог обнаружения, решение H_0^* принимается, когда на интервале I количество пересечений z сигналом нулевого уровня превышает порог; решение H_1^* – количество пересечений z сигналом нулевого уровня меньше порога.

Необходимо отметить, что вследствие предварительного выбеливания сигнала, при гипотезе H_0 (на участке помехи), предлагаемая процедура обнаружения (4) обладает непараметрическим свойством: статистика счетчика нулей (3) не зависит от исходных спектрально-корреляционных характеристик фона. Это позволяет стабилизировать уровень вероятности ложного обнаружения, а следовательно, облегчить разработку обнаружителя Неймана – Пирсона.

2. Анализ решающего правила

Как указывалось выше, в качестве предварительной обработки при предлагаемом подходе к обнаружению используется выбеливание наблюдаемого сигнала по параметрам фоновой помехи. Так, в ходе операции предсказания отсчеты фоновой составляющей сигнала становятся независимыми. В случае же полезного сигнала, после процедуры выбеливания он содержит остаточную корреляцию отсчетов, то есть является гауссовским окрашенным процессом. Для анализа решающего правила (4) при гипотезах H_0 и H_1 необходимо знать соответствующие им распределения числа пересечений $p(z | H_0)$ и $p(z | H_1)$.

В случае гипотезы H_0 величины v_i являются независимыми, и следовательно, статистика пересечений z , равная числу «успехов» ($v_i = 1$) в серии I независимых испытаний, имеет биномиальное распределение [9]. То есть для любого $z = 0 \dots I$ вероятность $p(z | H_0)$ определяется следующим выражением:

$$p(z | H_0) = \frac{I!}{2^I z!(I-z)!}, \quad z = 0 \dots I, \quad (5)$$

и, следовательно, вероятность ложного обнаружения F может быть определена по формуле

$$F = \frac{I!}{2^I} \sum_{z=0}^{z_0} \frac{1}{z!(I-z)!}. \quad (6)$$

При больших объемах выборки используем гауссовскую аппроксимацию [9]

$$w(z | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{z|H_0}}} \exp \left(-\frac{(z - m_{z|H_0})^2}{2D_{z|H_0}} \right), \quad (7)$$

где $m_{z|H_0}$ – математическое ожидание, $D_{z|H_0}$ – дисперсия числа пересечений на интервале I при гипотезе H_0 . Тогда вероятность ложной тревоги

$$F = \int_{-\infty}^{z_0} w(z | H_0) dz = \Phi \left(\frac{z_0 - m_{z|H_0}}{\sqrt{D_{z|H_0}}} \right), \quad (8)$$

где $\Phi(\cdot)$ – интеграл Лапласа. Параметры $m_{z|H_0}$ и $D_{z|H_0}$ распределения (7) рассчитываются как первый начальный и второй центральный моменты соответственно и при заданном значении I определяются выражениями

$$m_{z|H_0} = \frac{I}{2}, \quad D_{z|H_0} = \frac{I}{4}. \quad (9)$$

При гипотезе H_1 , по аналогии с гипотезой об отсутствии в наблюдаемой смеси полезной составляющей, для определения $p(z | H_1)$ использовалась гауссовская аппроксимация распределения

$$w(z | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{z|H_1}}} \exp \left(-\frac{(z - m_{z|H_1})^2}{2D_{z|H_1}} \right). \quad (10)$$

Математическое ожидание числа пересечений сигналом нулевого уровня $m_{z|H_1}$ рассчитывается как

$$m_{z|H_1} = 2(I-1) \int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} w(x_i, x_{i+1}) dx_i dx_{i+1},$$

а дисперсия $D_{z|H_1}$ определяется согласно выражениям

$$D_{z|H_1} = m_{z^2|H_1} - m_{z|H_1}^2,$$

$$m_{z^2|H_1} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \overline{v_i v_j},$$

$$\overline{v_i v_j} = \int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} w(x_i, x_{i+1}, x_j, x_{j+1}) dx_i dx_{i+1} dx_j dx_{j+1},$$

где $\overline{v_i v_j}$ – корреляция между i -м и j -м индикаторами пересечений, определяемая степенью связи между разнесенными на расстояние $i - j$ парами отсчетов выделенного сигнала x . Так как наблюдаемый сигнал $x_i, i = 1 \dots I$, представляет собой гауссовский шум, его двумерная и четырехмерная плотности распределения вероятности $w(x_i, x_{i+1})$ и $w(x_i, x_{i+1}, x_j, x_{j+1})$ определяются выражением

$$w(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^2 |\mathbf{K}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X}\right),$$

где $\mathbf{X} = \|x_i, x_{i+1}\|^T$ или $\mathbf{X} = \|x_i, x_{i+1}, x_j, x_{j+1}\|^T$, соответственно; $\mathbf{K}$ – корреляционная матрица, элементы которой определяются корреляционной функцией $R_x(\tau) = \overline{x(t)x(t-\tau)}$ информационной (полезной) составляющей сигнала $x_i, i = 1 \dots I$:

$$\mathbf{K} = \overline{\mathbf{X}\mathbf{X}^T} = \begin{pmatrix} R_x(0) & R_x(1) \\ R_x(1) & R_x(0) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \overline{\mathbf{X}\mathbf{X}^T} = \begin{pmatrix} R_x(0) & R_x(1) & R_x(i-j) & R_x(i-j-1) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(i-j+1) & R_x(i-j) \\ R_x(i-j) & R_x(i-j+1) & R_x(0) & R_x(1) \\ R_x(i-j-1) & R_x(i-j) & R_x(1) & R_x(0) \end{pmatrix}.$$

Вероятность правильного обнаружения определяется выражением

$$D = \int_{-\infty}^{z_0} w(z | H_1) dz = \Phi\left(\frac{z_0 - m_{z|H_1}}{\sqrt{D_{z|H_1}}}\right). \quad (11)$$

Сейсмический сигнал с заданным отношением сигнал/шум (ОСШ) $x_{i|q}$ можно описать при помощи модели

$$x_{i|q} = qs_i + n_i, \quad i = 1 \dots I,$$

где s_i – информационный сигнал, n_i – помеха с единичной дисперсией и нулевым средним, q – ОСШ. Тогда корреляционная функция такого сигнала

$$R_x(\tau)|_q = q^2 R_s(\tau) + N(\tau).$$

где $R_x(\tau)|_q$, $R_s(\tau) = \overline{s(t)s(t-\tau)}$, $N(\tau) = \overline{n(t)n(t-\tau)}$ – корреляционные функции сигнала с заданным ОСШ, полезного сигнала при отсутствии помехи и белого шума соответственно.

3. Результаты исследования

Исследование предложенного алгоритма проводилось для сигналов, регистрируемых чувствительными датчиками сейсмической системы охраны «Азимут». Длительность представленного на рис. 1 сигнала составляет 25000 отсчетов, что соответствует 42 с времени наблюдения. Обнаружение выполняется на интервале длительностью $I = 5000$ отсчетов. В соответствии с (9) имеем

$$m_{z|H_0} = 2500, \quad D_{z|H_0} = 1250.$$

Как отмечалось выше, в случае, когда на входе обнаружителя действует сигнал сейсмического фона (гипотеза H_0), предложенный алгоритм обнаружения обладает непараметрическим свойством: статистика количества пересечений нуля не зависит от параметров исходного фона. Вследствие этого, уровень вероятности ложной тревоги является фиксированной величиной. Соответствие между заданной вероятностью ложной тревоги и порогом для решающего правила, рассчитанным с использованием выражения (8), отражено в таблице.

Соответствие между вероятностью ложной тревоги и порогом

Вероятность ложной тревоги F	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Порог z_0	2418	2391	2369	2349	2332	2316

Для оценки условий, при которых обнаружение становится возможным, на рис. 3 приведена зависимость среднего значения (сплошная линия) числа пересечений от ОСШ (штриховыми линиями ограничен интервал $\pm 3\sqrt{D_{z|H_0}}$). Также на рисунке выделена область, ограниченная пороговыми значениями $z_0 = 2418$ и $z_0 = 2316$, обеспечивающих вероятности ложной тревоги $F = 10^{-2}$ и $F = 10^{-7}$, соответственно (см. таблицу). На рис. 3 можно выделить три характерные области: 1) $q < 0,05$ – среднее значение числа пересечений больше порогового значения, обнаружения не происходит; 2) $0,05 \leq q \leq 0,2$ – среднее значение числа пересечений лежит в области, ограниченной порогами $z_0 = 2316$ и $z_0 = 2418$, обнаружение возможно, вероятность ложных срабатываний $10^{-7} \leq F \leq 10^{-2}$; 3) $q > 0,2$ – среднее число пересечений меньше порога $z_0 = 2316$, область устойчивого обнаружения с вероятностью ложных срабатываний не выше 10^{-7} .

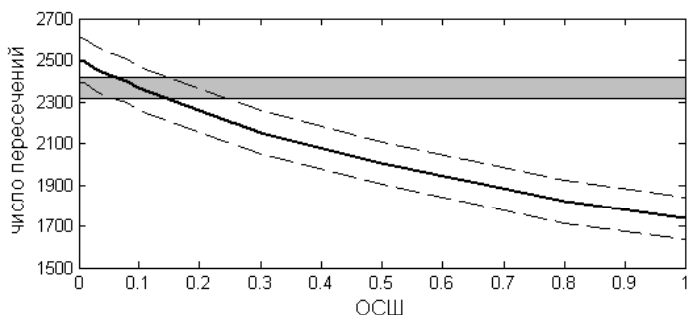


Рис. 3. Зависимость среднего значения числа пересечений от ОСШ

На рис. 4 приведено семейство характеристик обнаружения построенных для различных уровней вероятности ложной тревоги (см. таблицу). Из рисунка видно, что вероятность правильного обнаружения $0,9 - 0,95$ достигается при достаточно низких требованиях к величине ОСШ входного сигнала ($q = 0,1 \dots 0,2$, в зависимости от допустимого значения вероятности ложных тревог). В целом, полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенного мето-

да в ССО, поскольку доля правильных решений отвечает требованиям, реально предъявляемым к этим системам.

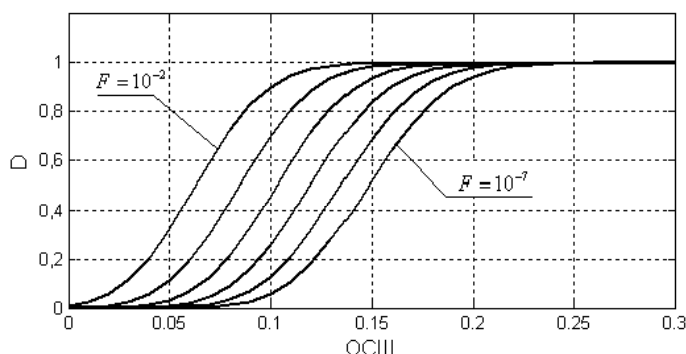


Рис. 4. Характеристики обнаружения

На рис. 5 приведена запись сигнала, регистрируемого датчиком системы при проезде мимо него автомобиля. Также сплошной линией обозначено число пересечений этим сигналом нулевого уровня, определенное на интервале $I = 5000$ (подсчет числа пересечений осуществлялся скользящим окном). Выделенная на рисунке область — область значений порога, обеспечивающего вероятность ложной тревоги в пределах $10^{-2} - 10^{-7}$ (см. таблицу). Как видно из рисунка, по мере приближения автомобиля к датчику (нарастание интенсивности сигнала), количество пересечений уменьшается, что позволяет обнаружить объект. При удалении автомобиля, интенсивность регистрируемого сигнала резко падает, и дальнейшее обнаружение объекта по энергетическому признаку становится невозможным, при этом спектрально-корреляционные свойства полезного сигнала сохраняются еще на какое-то время. Следовательно, использование счетчика пересечений с «нулем» позволяет обнаружить сигнал даже при низком уровне сигнала.

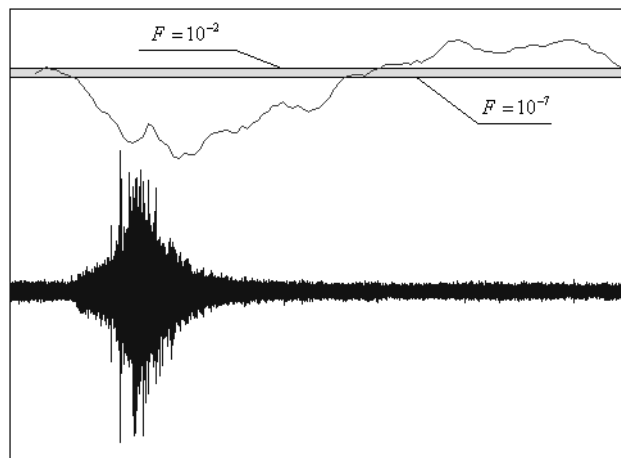


Рис. 5. Пример сигнала автомобиля

Заключение

Данная публикация представляет собой один из подходов, дающих возможность решения задачи обнаружения при анализе сейсмической обстановки в реальном масштабе времени. Полученные здесь результаты показывают, что использование количества пересечений сигналом нулевого уровня в качестве признака позволяет получить характеристики обнаружения, приемлемые для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райфельд М.А., Спектор А.А. Обнаружение сигналов движущегося человека в сейсмической системе наблюдения // Автометрия. 2005. № 6. С. 88–97.
2. Succi G., Prado G., Gampert R., Pedersen T. Problems in seismic detection and tracking // Unattended Ground Sensor Technologies and Applications II. Proc. SPIE. 2000. V. 4040. P. 165–173.
3. Gramann R.A., Bennett M.B., O'Brien T.D. Vehicle and personnel detection using seismic sensors // Part of the SPIE Conference on Sensors, C31. Information, and Training Technologies for Law Enforcement. Boston, Massachusetts. 1998. V. 3577. P. 74–85.
4. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 496 с.
5. Мархакишинов А.Л., Спектор А.А. Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. № 5. С. 48–53.
6. Спектор А.А., Филатова С.Г. Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. № 4. С. 68–74.
7. Митрохин М.А., Чистова Г.К. Алгоритм классификации техники по сейсмическому сигналу // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Пенза, 2008. С. 151–153.
8. Liang Z., Wei J., Zhao J., Shen J. The statistical meaning of kurtosis and its new application to identification of persons based on seismic signals // Sensors. 2008. No. 8. P. 5106–5119.
9. Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1980. 574 с.

Соколова Дарья Олеговна

Спектор Александр Аниселевич

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: sokolovado@gmail.com; spectoraa@mail.ru

Поступила в редакцию 3 мая 2012 г.

Sokolova Darya O., Spector Alexander A. (Novosibirsk State Technical University). **The non-parametric detection of stochastic signals based on zero level crossing.**

Keywords: signal detection, counter of zero level crossing.

The problem of object detection is solved by its seismic signal analyzing. The seismic signal is obtained with the seismic guard system. The statistical approach is used. Counter of zero level crossing is used as attribute vector. Detection procedure is created; investigation of its efficiency is performed. The obtained results showed the possibility of real time operating with acceptable quality index for practical use.