

Информационное противодействие угрозам терроризма: научн-практ. журн. /ФГПУ НТЦ гос. рег. №0320600189, Москва. 2007, №9

4. *Котенко В.В., Евсеев А.С.* Новый подход к оценке эффективности защиты аудиоинформации на основе комплексного определения разборчивости и избыточности. // “Информационная безопасность”. Сборник трудов девятой международной научно-практической конференции. ТРТУ 2007.
5. *Котенко В.В., Евсеев А.С.* Компьютерная технология оценки эффективности скремблирования на основе определения разборчивости и избыточности. // Информационное противодействие угрозам терроризма: научн-практ. журн. /ФГПУ НТЦ гос. рег. №0320600189, Москва. 2007, №9. С.35-40.

УДК 621.391

**В.И. Марчук, С.В. Токарева**

### **СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ**

В системах автоматической обработки и передачи сигналов возникают ситуации, когда в реализации сигнала содержатся одно или несколько аномальных значений, значительно выделяющихся на фоне остальных [1, 2]. Наличие аномальных значений оказывает существенное влияние на оценку функции низкочастотной составляющей случайного сигнала. В связи с этим обнаружение и исключение аномальных значений должно предшествовать процедуре обработки исследуемого сигнала [1, 2]. Причины появления аномальных значений в анализируемом сигнале связаны с различными факторами: отказ оборудования, кратковременное внешнее воздействие на измерительный элемент, сбой в работе регистрирующей аппаратуры, «залипание» старшего разряда цифрового счетчика и т.д.

В ходе анализа существующих методов и алгоритмов [1–3] выявлено, что для обнаружения аномальных значений в реализации нестационарного случайного сигнала используются способы, основанные на оценке функции низкочастотной составляющей сигнала с последующим ее вычитанием из исходной реализации и дальнейшей установки порогового значения по полученным остаткам. Остатками, в данном случае, называется разность между исходной реализацией и оценками функции низкочастотной составляющей сигнала. Однако, аномальные значения нарушают начальные условия использования метода наименьших квадратов – независимость дисперсии остатка и его математического ожидания в каждом сечении. Следовательно, наличие аномальных значений в выборке нестационарного случайного сигнала приводит к несимметричности распределения остатков и к нарушению начальных условий метода наименьших квадратов.

Обнаружение аномальных значений, основанное на предварительной оценке функции низкочастотной составляющей сигнала, снижает эффективность обнаружения аномальных значений из-за погрешности оценки функции низкочастотной составляющей сигнала, которая, в свою очередь, зависит от наличия аномальных значений. Таким образом, любому анализу нестационарного случайного сигнала, построенному на методе наименьших квадратов, должен предшествовать анализ на содержание аномальных значений.

В данной работе предлагается способ обнаружения аномальных значений без оценки функции низкочастотной составляющей нестационарного случайного сигнала.

В предлагаемом способе используется дискретноменяющийся уровень анализа нестационарного случайного сигнала [4]. При этом значения превышающие

уровень анализа штрафуются до тех пор, пока не обнаружится нестационарность в сечении.

Определение нестационарности в сечении сигнала определяется в соответствии со следующим алгоритмом: начало нестационарности фиксируется по наличию  $d$  единиц в  $m$  позициях или  $m$  единиц в  $m$  позициях и конец сигнала по невыполнению этого условия [5]. Где  $d$  получено на основе проведения имитационного моделирования и задается априорно.

Пусть нестационарный случайный сигнал представляет собой единственную реализацию дискретного сигнала  $\{Y_k\}_{k=1}^N$ , полученного в равноотстоящие моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , где  $Y(t_k) = Y_k$  и  $k = \overline{1, N}$ .

Математическая модель реализации исходного сигнала может быть представлена выражением

$$Y_k = \lambda_k + \eta_k + \varepsilon_k, \quad (1)$$

где  $\lambda_k$ ,  $\eta_k$ ,  $\varepsilon_k$  - значения низкочастотной, составляющей сигнала, аддитивной высокочастотной и аномальной составляющих сигнала соответственно.

Предлагаемый способ обнаружения аномальных значений заключается в следующем: определяется максимальное  $Y_{\max} = \max(\{Y_k\})$  и минимальное  $Y_{\min} = \min(\{Y_k\})$  значения исходного сигнала  $\{Y_k\}_{k=1}^N$  и рассчитывается шаг изменения уровня анализа по выражению:

$$\Delta Y = \frac{(Y_{\max} - Y_{\min})}{P},$$

где  $P$  - априорно заданное количество уровней анализа сигнала.

Значения уровней анализа вычисляется в соответствии с выражением

$$L_i = Y_{\max} - \Delta Y \cdot i.$$

Для каждого значения уровня  $L_i$  проверяется условие:

$$Y_k \geq L_i, \text{ где } k = \overline{1, N}, \quad i = \overline{0, P}. \quad (2)$$

При выполнении условия (2) на каждом шаге  $k$ -му отсчету ставится в соответствие штрафное значение, т.е.  $m_k = 1$ ,  $k = \overline{1, N}$ . Таким образом, с изменением уровня анализа  $L_i$  происходит накопление штрафных значений для элементов исходного сигнала, т.е.:

$$m_k = m_k + 1, \quad (3)$$

где  $\{m_k\}_{k=1}^N$ ,  $k = \overline{1, N}$  ряд штрафных значений с соответствующим номером элемента выборки.

Одновременно после установки уровня  $L_i$  и проверки условия (2), исследуемый сигнал анализируется на наличие участков нестационарности.

Найденные участки нестационарности локализуются, то есть, если в ряде  $\{m_k\}_{k=1}^N$  появится последовательность в  $d$  ненулевых элементов,  $\{m_k\}_{k=j}^r > 0$ ,  $\{m_k\}_{k=j}^r \in \{m_k\}_{k=1}^N$ ,  $d = r - j + 1$ , где  $d$  - априорно задаваемое значение, то предполагается, что на отрезке  $[j, r]$  ряда  $\{Y_k\}_{k=1}^N$  присутствует низкочастотная составляющая.

щая исходного сигнала  $Y_k$ , и на этом интервале при дальнейшем изменении уровня анализа  $L_i$  штрафы не назначаются.

В результате обработки, ряд значений  $\{m_k\}_{k=1}^N$ , представляет собой ряд штрафов для высокочастотной  $\eta_k$  и аномальной составляющей  $\varepsilon_k$  исходного сигнала  $Y_k$ . При этом низкочастотная составляющая  $\lambda_k$  исключается из рассмотрения.

Штрафные значения при наличии низкочастотной составляющей  $\lambda_k$  не назначаются. Так как амплитуда аномальных значений превосходит амплитуду высокочастотной составляющей  $\eta_k$ , предполагается что, количество штрафов, полученных аномальными значениями превосходит количество штрафов, полученных высокочастотной составляющей  $\eta_k$ . При анализе штрафных значений  $\{m_k\}_{k=1}^N$  определяется максимальное значение ряда  $m_{\max} = \max(\{m_k\})$  и проверяется условие:

$$m_k > 0,5 \cdot m_{\max}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (4)$$

При выполнении условия (4) принимается решение, что соответствующее значение  $Y_k$  является аномальным. Условие (4) получено на основе проведения имитационного моделирования.

Принцип работы способа обнаружения аномальных измерений с дискретно-меняющимся уровнем анализа сигнала наглядно отображается на рисунках 1 – 3. На рисунке 1а представлена исходная реализация результатов измерений, описываемая выражением (1), а горизонтальной линией – уровень анализа. На рисунке 1б представлен ряд штрафов, полученных при превышении каждым из отсчётов  $\{Y_k\}_{k=1}^N$  уровня анализа  $L_1$ . Далее изменяется значение уровня  $L_i = Y_{\max} - \Delta Y \cdot i$  и снова проверяется условие (2). На рисунке 2а представлена исходная реализация результатов измерений и пятый уровень анализа, а на рисунке 2б соответственно полученный ряд штрафов (3). После последовательного перебора всех уровней  $\{L_i\}_{i=0}^P$  и проверки условия (2) формируется ряд результирующих штрафов изображенных на рисунке 3а, где штриховой линией показано пороговое значение, устанавливаемое соответственно выражению (4). На рисунке 3б представлены исходная реализация результатов измерений и обнаруженные аномальные значения, полученные по предложенной методике.

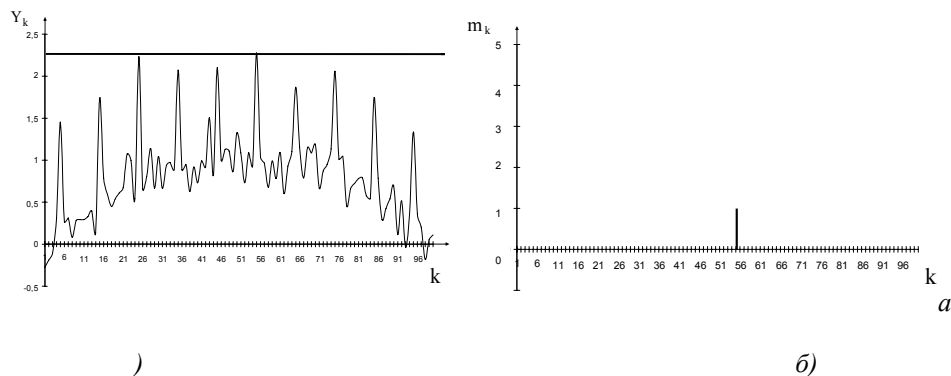


Рис. 1. Первый этап работы предлагаемого метода обнаружения аномальных значений: а) - исходная реализация результатов измерений и первый уровень анализа значений; б) - массив штрафов

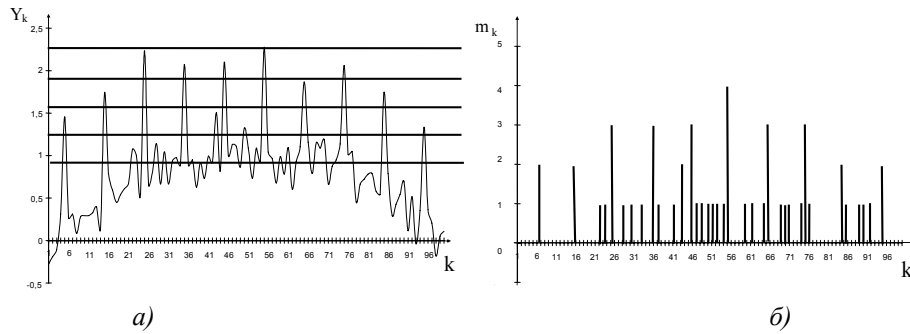


Рис. 2. Пятый этап работы предлагаемого метода обнаружения аномальных значений: а) - исходная реализация результатов измерений и пятый уровень анализа значений; б) - массив штрафов

Для исследования эффективности рассмотренного способа, в работе предложены результаты оценок ошибки первого рода  $\alpha$  и вероятности правильного обнаружения  $\beta$  для нестационарных случайных сигналов при различных значениях амплитуды аномальных значений [1].

Нестационарный случайный сигнал представлен выражением (1). Для примера, в качестве модели функции низкочастотной составляющей  $\lambda_k$  выбираются нормированные, функции: синусоидальная, экспоненциальная. Аддитивная высокочастотная составляющая  $\eta_k$  имеет гауссовский, равномерный и рэлеевский закон распределения. Количество аномальных значений  $\varepsilon_k$  составляют 10% от объема выборки  $N$  исходного нестационарного случайного сигнала  $Y_k$ . Аномальные значения располагаются равномерно по все реализации нестационарного случайного сигнала. Амплитуда аномальных значений  $Amp$  принимает дискретные значения от  $3\sigma_{ш}$  до  $7\sigma_{ш}$ , где  $\sigma_{ш} = 0.1$  - среднеквадратическое отклонение аддитивной высокочастотной составляющей  $\eta_k$ . Результаты, представленные на рисунках 4 и 5, получены при  $P = 25$  и  $d = 8$ .

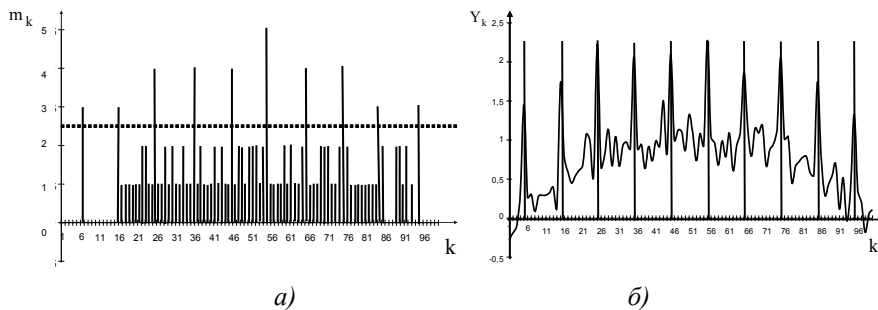


Рис. 3. Пример поэтапной работы предлагаемого метода обнаружения аномальных значений: а) результирующий массив штрафов; б) - исходная реализация результатов измерений и обнаруженные аномальные значения

В результате исследований получены зависимости оценок ошибки первого рода  $\alpha$  и вероятности правильного обнаружения  $\beta$  от амплитуды аномальных значений  $Amp$ , для различных функций низкочастотной составляющей  $\lambda_k$  нестационарного случайного сигнала  $Y_k$ .

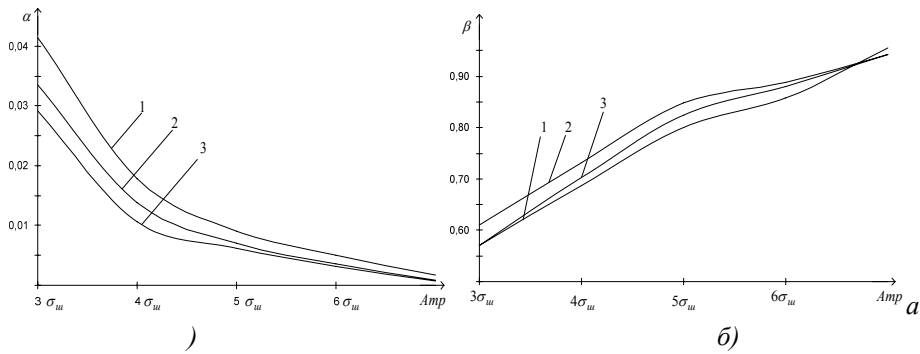
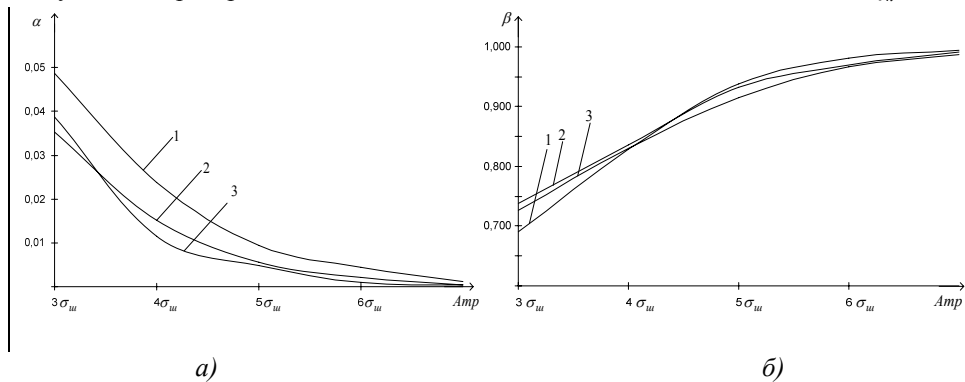


Рис.4. а) зависимость оценок ошибки первого рода  $\alpha = f(Amp)$  для синусоидальной функции низкочастотной составляющей; б) зависимость оценок вероятности правильного обнаружения  $\beta = f(Amp)$  для синусоидальной функции низкочастотной составляющей

На рисунке 4а и рисунке 4б представлены кривые зависимости оценок ошибки первого рода  $\alpha$  и оценок вероятности правильного обнаружения  $\beta$  для случая, когда функция низкочастотная составляющей  $\lambda_k$  является синусоидальной. А аддитивная высокочастотная составляющая  $\eta_k$  имеет соответственно: кривая 1 – рэлеевский закон распределения кривая 2 – гауссовский закон распределения; кривая 3 –равномерный закон распределения. Аналогично на рисунках 5а и 5б представлены зависимости  $\alpha = f(Amp)$  и  $\beta = f(Amp)$  для экспоненциальной функции низкочастотной составляющей  $\lambda_k$  нестационарного случайного сигнала  $Y_k$ . Кривые 1, 2 и 3 так же соответствуют рэлеевскому, гауссовскому и равномерному законам распределения аддитивной высокочастотной составляющей  $\eta_k$ .



*Рис. 5. а) зависимость оценок ошибки первого рода  $\alpha = f(Amp)$  для экспоненциальной функции низкочастотной составляющей, б) зависимость оценок вероятности правильного обнаружения  $\beta = f(Amp)$  для экспоненциальной функции низкочастотной составляющей*

Анализ результатов представленных на рисунке 4а и 5а (кривая 1) показывает, что при амплитуде аномальных значений порядка  $Amp = 3 \cdot \sigma_{ш}$ , оценка ошибки первого рода  $\alpha$  достигает своего максимального значения  $\alpha = 0.041$  и  $\alpha = 0.049$  в зависимости от функции низкочастотной составляющей  $\lambda_k$ . А оценка вероятности правильного обнаружения  $\beta$  на рисунке 4б и 5б (кривая 1) при тех же условиях имеет минимальные значения для синусоидальной модели функции низкочастотной составляющей  $\lambda_k$   $\beta = 0.570$  и  $\beta = 0.690$  для экспоненциальной модели функции. При амплитуде аномальных значений  $Amp = 5 \cdot \sigma_{ш}$  для случая, когда аддитивная высокочастотная составляющая  $\eta_k$  имеет гауссовский и равномерный законы распределения, значения оценок ошибки первого рода  $\alpha$ , практически совпадают, т.е. отличие в оценках  $\alpha$  порядка 0.14% независимо от функции низкочастотной составляющей  $\lambda_k$  (рисунок 4а и рисунок 5а – кривые 2,3). Наилучшими оценками вероятности правильного обнаружения  $\beta$  являются оценки, получаемые при гауссовском законе распределения аддитивной высокочастотной составляющей  $\eta_k$ , как для синусоидальной функции низкочастотной составляющей так и для экспоненциальной  $\lambda_k$  (рисунок 4б и 5б кривая 2). При увеличении амплитуды аномальных значений оценки вероятности правильного обнаружения  $\beta$  практически не зависят от закона распределения аддитивной высокочастотной составляющей  $\eta_k$  (рисунок 4б и рисунок 5б) и стремятся к единице.

### Заключение

Из представленных результатов следует, что для повышения достоверности результатов обработки нестационарных случайных сигналов может быть рекомендован предлагаемый способ, т.к. благодаря последовательному анализу сигнала по предложенной методике не требуется выделять низкочастотную полезную составляющую сигнала, что заведомо уменьшает погрешность ее дальнейшей оценки.

При использовании способа обнаружения аномальных значений без выделения низкочастотной составляющей сигнала, получены оценки ошибки первого рода  $\alpha$  и вероятности правильного обнаружения  $\beta$ , которые с увеличением амплитуды аномальных значений практически не зависят от закона распределения аддитивной высокочастотной составляющей.

Оценки ошибки первого рода  $\alpha$  и вероятности правильного обнаружения  $\beta$  стремятся к своим минимальным и максимальным значениям соответственно, с увеличением амплитуды аномальных значений в зависимости от функции низкочастотной составляющей нестационарного случайного сигнала.

Использование предложенного способа обнаружения аномальных значений позволяет получать результаты, при которых оценки ошибки первого рода  $\alpha$  стремятся к своим минимальным значениям в то время, когда оценки вероятности правильного обнаружения  $\beta$  стремятся к своим максимальным значениям

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фомин, А.Ф.* Отбраковка аномальных результатов измерений [Текст]/А.Ф. Фомин, О.Н. Новоселов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200с
2. *Переверткин, С.М.* Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов [Текст]/ С.М. Переверткин, А.В. Кантор, Н.Ф. Бородин и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
3. *Марчук, В.И.* Первичная обработка результатов измерений при ограниченном объеме априорной информации [Текст]/Монография. Под ред. К.Е. Румянцева. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2003. – 160с.
4. *Мирский, Г.Я.* Аппаратное определение характеристик случайных процессов [Текст]/ Г.Я. Мирский. – Изд. 2-е переработ. И доп. –М.: Энергия, 1972. – 456 с.
5. *Стратонович, В.Л.* Принципы адаптивного приема [Текст]/В.Л. Стратонович. – М.: Сов. радио, 1973. – 210с.