

**Непараметрическое обнаружение сигналов  
детектором средней энергии**

*В.А. Галкин*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,  
Россия*

*vtchgalkin@mail.ru*

Основой оперативного анализа состояния эфира является детектор средней энергии в выделенной полосе частот, определяющий наличие/отсутствие детерминированных сигналов и стационарных помех любого типа в каналах заданной ширины. В работе рассмотрена реализация цифрового детектора энергии для анализатора занятости эфира в радиостанциях, отвечающих требованиям программно-конфигурируемого радио. Детектор может быть реализован программно в существующих радиостанциях без изменения аппаратной части. Основой работы детектора является экспериментально измеренная гистограмма средней энергии в узкополосных каналах, последовательно расположенных в предполагаемой рабочей полосе частот. На основании гистограммы средней энергии шума и гистограммы средней энергии детерминированных сигналов и стационарных помех вычислены интеграл вероятности ложной тревоги и интеграл вероятности правильного обнаружения соответственно. Порог принятия решения о состоянии каналов свободно/занятно, определенный по критерию заданной ложной тревоги, статистически достоверен и отражает текущее состояние эфира без априорного предположения о статистике распределения шума и независимо от типа обнаруживаемых узкополосных сигналов.

**Ключевые слова:** программно-конфигурируемое радио; когнитивное радио; детектор энергии; динамический доступ к эфиру; гистограмма энергии

**Для цитирования:** Галкин В.А. Непараметрическое обнаружение сигналов детектором средней энергии // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 595–604. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-595-604

## Nonparametric Signal Detection by Average Energy Detector

V.A. Galkin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vtchgalkin@mail.ru

**Abstract:** The basis of the operating analysis of the state on the air is an average energy detector in singled out frequency band, determining presence/absence of the determined signals and stationary noises of any type in the channels of specified width. The implementation of the digital energy detector for analyzer of busy time on the air in the radio stations, corresponding to the requirements of the program-configurable radio, has been considered. The detector can be implemented by programs in the existing radio stations without hardware changes. The basis of the detector operation is the experimentally measured average energy histogram in the narrow-band channels, sequentially located in the assumed operating frequency band. Based on the noise average energy histogram and the average energy histogram of the determined signals and stationary noises the integral of the false alarm probability and the integral of correct detection probability, respectively, have been calculated. The threshold of taking decision about the states of the channels idle/busy, determined by the specified false alarm criterion, is statistically reliable and reflects the current state on the air without a priory assumption about the noise distribution statistics and independently from the type of being detected narrow-band signals.

**Keywords:** soft-defined radio; cognitive radio; energy detector; dynamic spectrum access; average energy detector

**For citation:** Galkin V.A. Nonparametric signal detection by average energy detector. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 595–604. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-595-604

**Введение.** Оперативный анализ состояния эфира и динамический доступ к временно свободным участкам спектра – необходимая функция современных радиостанций. Изменение рабочей частоты и расширение рабочей полосы частот с использованием временно свободных участков спектра обеспечивают организацию режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты, формирование вторичных сетей радиосвязи, повышение достоверности обмена информацией. Важно, чтобы расширенные функциональные возможности не только были доступны новым радиостанциям, но и могли быть реализованы в уже существующих путем обновления программного обеспечения без модернизации аппаратной части [1]. Основой оперативного анализа состояния эфира является детектор средней энергии в выделенной полосе частот, определяющий наличие/отсутствие детерминированных сигналов и стационарных помех любого типа в каналах заданной ширины [2, 3].

В настоящей работе рассматриваются алгоритм работы и ожидаемые параметры цифрового детектора средней энергии для использования в радиостанциях, допускающих оперативное (программное) изменение рабочей частоты и полосы частот рабочего канала. Работа детектора основана на измерении текущего распределения сигналов в эфире и не предполагает специальных измерений уровня шума или использования априорного закона распределения шума и сигналов.

**Статистика распределения средней энергии сигнала и шума.** Классический метод определения параметров обнаружения и порога принятия решения для детектора средней энергии заключается в априорном выборе ожидаемого распределения средней энергии сигналов и шумов в диапазоне частот и определении абсолютной энергии шума как нормирующего параметра распределения.

В режиме последовательного анализа средняя энергия  $E_{ch}$  в каждом  $n$ -канале шириной  $F_{ch}$  определяется по  $N$  отсчетам мгновенных значений квадратурных компонент  $I(t)$ ,  $Q(t)$  всех сигналов и шумов, находящихся в полосе пропускания  $F_{ch}$  узкополосного фильтра основной селекции:

$$E_{ch}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (I^2(t_i) + Q^2(t_i)), \quad n = 0, \dots, K_{ch}. \quad (1)$$

Если в анализируемой полосе частот  $F_{ch}$  находится детерминированный сигнал или стационарная помеха, то оценка средней энергии в канале по конечной выборке  $N$  отсчетов (1) является несмещенной и статистически достоверной. Для независимых шумовых переменных  $\{x_1 \dots x_n\}$  с нормальным распределением и единичной дисперсией плотность распределения квадратичной формы  $y(\mathbf{x}) = \sum (x_j)^2$  определяется центральным  $\chi^2$ -распределением. С учетом нормирования выходного сигнала детектора ( $y = E_{ch} 2N / \sigma^2$ ) к квадратичной форме  $y(\mathbf{x})$  стандартное  $\chi^2$ -распределение средней энергии шумового сигнала на выходе детектора преобразуется к виду

$$p(E_{ch}) = \frac{N}{\sigma^2 \Gamma(N)} \left( \frac{E_{ch} N}{\sigma^2} \right)^{N-1} e^{-\left( \frac{E_{ch} N}{\sigma^2} \right)}, \quad (2)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия распределения квадратурных  $I(t)$ ,  $Q(t)$  компонент шумового сигнала;  $\Gamma(N)$  – гамма-функция.

Первый момент  $\chi^2$ -распределения плотности средней энергии шума (2)  $M = 2N / (2N / \sigma^2) = \sigma^2$ , второй момент (дисперсия распределения)  $D = 4N / (2N / \sigma^2)^2 = \sigma^4 / N$ . Графически распределение плотности средней энергии гауссова шума (2) в зависимости от нормированной средней энергии показано на рис.1. Как и следовало ожидать, максимум плотности вероятности при любом количестве отсчетов приходится на среднюю энергию, равную дисперсии шума. С увеличением количества отсчетов  $N$  дисперсия распределения неограниченно уменьшается пропорционально количеству отсчетов. Следовательно, оценка среднего значения энергии шума на выходе детектора энер-

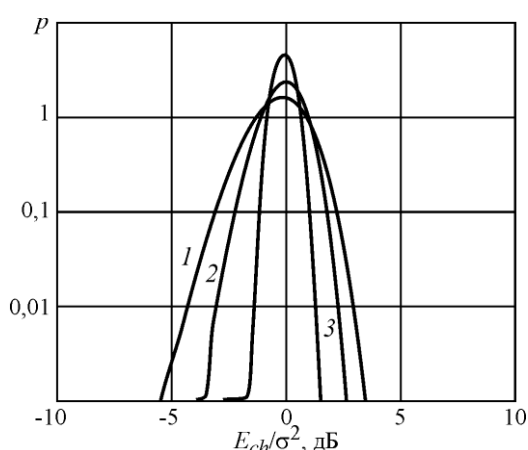


Рис.1. Плотность распределения средней энергии гауссова шума: 1 –  $N = 16$ ; 2 –  $N = 32$ ; 3 –  $N = 128$   
Fig.1. Probability density function of Gaussian noise energy: 1 –  $N = 16$ ; 2 –  $N = 32$ ; 3 –  $N = 128$

гии, как и энергии детерминированного сигнала, является несмещенной и статистически достоверной.

Плотность вероятности средней энергии для аддитивной смеси детерминированного сигнала с ожидаемой энергией  $E$  и шума с дисперсией  $\sigma^2$  определяется смещенным (нецентральный)  $\chi^2$ -распределением:

$$p(E_{ch}) = \frac{N}{\sigma^2} \left( \frac{E_{ch}}{E} \right)^{(N-1)/2} e^{-\frac{E_{ch}+E}{\sigma^2} N} I_{N-1} \left( \frac{2N}{\sigma^2} \sqrt{E_{ch}E} \right), \quad (3)$$

где  $I_{N-1}(\cdot)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода  $(N-1)$ -го порядка.

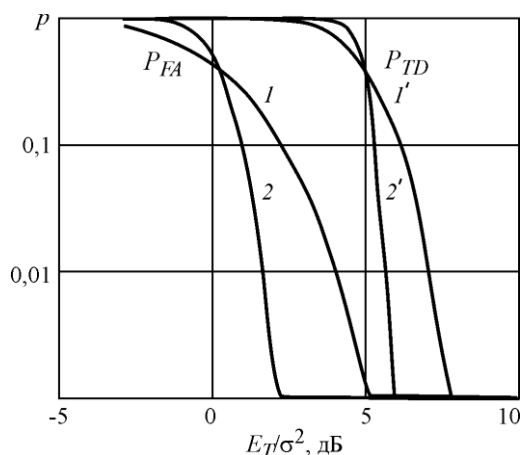


Рис.2. Вероятность ложной тревоги и правильного обнаружения: 1, 1' –  $N = 8$ ; 2, 2' –  $N = 64$

Fig.2. Probability of false alarm and true detection: 1, 1' –  $N = 8$ ; 2, 2' –  $N = 64$

Ожидаемая вероятность ложной тревоги  $P_{FA}(E_T / \sigma^2)$  и правильного обнаружения  $P_{TD}(E_T / \sigma^2)$ , показанные на рис.2, рассчитаны как интеграл от выражений (2), (3) в зависимости от нормированного порога принятия решения и количества отсчетов. Как и следовало ожидать, вероятности ложной тревоги  $P_{FA} = 0,5$  соответствует пороговое значение, равное энергии шума. Вероятность правильного обнаружения  $P_{TD}$  аддитивной смеси шума и детерминированного сигнала с постоянной энергией смещается относительно вероятности ложной тревоги  $P_{FA}$  на величину, пропорциональную энергии обнаруживаемого

сигнала. Повышение количества отсчетов  $N$  приближает форму зависимостей ложной тревоги  $P_{FA}$  и правильного обнаружения  $P_{TD}$  к ступенчатой. В предельном случае вся область возможных пороговых значений разделяется на интервал от  $E_{tFA} / \sigma^2$  до  $\infty$ , в котором  $P_{FA} = 0$ , и интервал от 0 до  $E_{tTD} / \sigma^2$ , в котором  $P_{TD} = 1$ . Зависимости параметров обнаружения для детектора средней энергии, аналогичные (2), (3), могут быть получены для многолучевых каналов с распределением Рэлея, Райса, Накагами, каналов с логнормальным распределением для теневых/освещенных зон и т.д. [4].

**Предельная энергия обнаружения сигнала.** Формально решение о наличии/отсутствии детерминированного сигнала или стационарной помехи с постоянной энергией  $E$  на интервале измерения принимается на основании сравнения средней энергии в канале  $E_{ch}$  с пороговым значением  $E_T$ :

$$E_{ch} = E + \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N-1} (n_I^2)_i + (n_Q^2)_i \stackrel{<}{>} E_T, \quad (4)$$

где  $n_I, n_Q$  – квадратурные компоненты шумового сигнала.

При неограниченном увеличении количества отсчетов  $N$  энергия шума приближается к истинному значению  $\sigma^2$  с точностью лучше, чем  $1/\sqrt{N}$ , и согласно выражению (4)

$$E + \sigma^2[1 \pm 1/\sqrt{N}] > E_T > \sigma^2[1 \pm 1/\sqrt{N}]. \quad (5)$$

Условия (5) совместимы для любого значения энергии детерминированного сигнала  $E > 0$  вне зависимости от вероятности ложной тревоги и вероятности правильного обнаружения. Это означает, что идеальный детектор энергии является устойчивым (robust) при неограниченном возрастании количества отсчетов  $N$ , т.е. обнаруживает в белом шуме детерминированный сигнал с любым отношением сигнал/шум, постоянным на интервале анализа, с заданной вероятностью ложной тревоги и вероятностью правильного обнаружения. Уменьшение ожидаемой энергии детерминированного сигнала  $E$  приводит к уменьшению относительного порога до предельной величины  $E_T / \sigma^2 \rightarrow 1$ , что соответствует предельной оценке для отношения сигнал/шум обнаруживаемого сигнала:

$$\text{SNR} = E / \sigma^2 > 1 / \sqrt{N}. \quad (6)$$

Существуют принципиальные ограничения на точность измерения энергии шума, обусловленные как характером самого шума, так и условиями измерений. В частности, время измерений ограничено временем стационарности радиоканала, энергия сигнала  $E$  и энергия шума  $\sigma^2$  должны быть постоянны на интервале измерения, максимальное количество независимых измерений  $N$  ограничено величиной базы сигнала  $fT$ . Случайные отклонения измеренных значений сигналов также приводят к погрешности в принятии решения. Например, если измеренная средняя энергия шума во всех каналах, по которой установлен порог принятия решения  $E_T$ , случайно меньше энергии шума в некотором частном канале, то вероятность ложной тревоги в этом канале будет выше предельной величины  $P_{FA} = 0,5$  при любом количестве отсчетов. Случайные изменения измеренной энергии шума в различных каналах в процессе анализа влияют не только на достоверность обнаружения, но и на минимальное отношение сигнал/шум, при котором детектором может быть обнаружен детерминированный сигнал. При ошибочном определении вычисления энергии шума по квадратурным компонентам шумового сигнала  $n_I, n_Q$  относительно истинного значения  $\sigma^2$  условия (5) не выполняются для произвольно малого отношения сигнал/шум обнаруживаемого сигнала. При возможной ошибке измерения шума в диапазоне  $\sigma_{\min}^2 - \sigma_{\max}^2$  и значительном количестве отсчетов  $N$  простейшая оценка минимально допустимого отношения сигнал/шум обнаруживаемого сигнала при  $\rho = \sigma_{\max}^2 / \sigma_{\min}^2$  равна:

$$\rho - 1 < \text{SNR} < \rho + 1 / \rho. \quad (7)$$

Детектирование сигналов при минимальном отношении сигнал/шум имеет большое значение при анализе эфира, так как обнаружение сигналов сторонних радиостанций происходит на предельной дальности, что уменьшает вероятность работы на занятом канале.

**Гистограмма средней энергии в каналах.** Практическое применение распределения плотности энергии (2), (3) для определения ожидаемых параметров обнаружения на основе детектора средней энергии ограничено в общем случае негауссовым характером

шума в эфире, многолучевым распространением радиоволн, наличием теневых/освещенных зон и ошибками в определении энергии шума. Использование более сложных распределений, отражающих негауссов характер шума и многолучевой канал, не решает проблемы, так как параметры распределений не могут быть надежно определены при неопределенных условиях работы. Методики измерения энергии шума  $\sigma^2$ , рекомендуемые международным союзом электросвязи МСЭ-R [5, 6], требуют практически не выполнимого априорного определения участков спектра, свободных от сигналов и стационарных помех на интервале измерения и расположенных в предполагаемой области рабочих частот. Одновременно требования к точности измерения средней энергии шума достаточно велики: согласно рис.2 вероятность ложной тревоги в разы изменяется при ошибке измерения энергии шума всего на 1 дБ.

Одним из вариантов повышения вероятности правильного определения наличия/отсутствия детерминированных сигналов и стационарных помех при неизвестных (и оперативно неопределимых) параметрах распределений энергии шума и сигналов является использование экспериментальной гистограммы распределения средней энергии в полосе анализа. Такая гистограмма позволяет определить порог принятия решения и ожидаемые параметры обнаружения без априорных предположений о характере шумов и сигналов. Критически важное значение средней энергии шума  $\sigma^2$  в анализируемом диапазоне частот определяется непосредственно в этом же диапазоне в режиме реального времени.

**Построение гистограммы.** Предполагается, что в полосе анализа  $BW$  выделено  $K_{ch}$  каналов, ширина канала  $F_{ch}$  определяется необходимой шириной спектра для работы радиостанции на вторичной основе. При узкополосном последовательном анализе во временной области гетеродин приемника последовательно изменяет частоту с шагом  $F_{ch}$ , преобразуя сигналы и шумы из высокочастотной области в baseband-диапазон в полосу фильтра основной селекции [1]. Для каждого значения частоты гетеродина по  $N$  отсчетам квадратурных компонент демодулированного сигнала в полосе канала определяется среднее значение энергии в очередном канале согласно (1).

Для построения гистограммы область всех измеренных значений средней энергии в  $K_{ch}$  каналах в диапазоне значений  $E_{ch \min} - E_{ch \max}$  разбивается на интервалы усреднения  $K_{sm} < K_{ch}$ , каждый из которых содержит несколько каналов. Оптимальное количество интервалов усреднения  $K_{sm}$  оценивается одним из следующих выражений [7]:

$$K_{sm} \approx 1 + \text{int}[\log_2 K_{ch}], \quad K_{sm} \approx \text{int}[\sqrt{K_{ch}}]. \quad (8)$$

Небольшое количество интервалов усреднения  $K_{sm} \ll K_{ch}$  приводит к уменьшению точности представления распределения энергии, так как в одном интервале усредняются как большие, так и малые значения средней энергии в каналах. При значительном количестве интервалов усреднения  $K_{sm} \approx K_{ch}$  точность представления плотности энергии сигнала также падает, так как некоторые из интервалов усреднения могут оказаться пустыми, и распределение становится изрезанным (многолепестковым).

Аргумент гистограммы  $E_k$  представляет граничное значение энергии  $k$ -го интервала усреднения:

$$E_k = E_{sm \min} + \frac{k(E_{sm \max} - E_{sm \min})}{K_{sm}}, \quad k = 0, \dots, K_{sm}. \quad (9)$$

Функция гистограммы  $p_k$  представляет собой плотность средней энергии сигналов, шумов и стационарных помех, которая на каждом  $k$ -м интервале усреднения определяется относительным количеством значений средней энергии в каналах  $E_{ch}$ , находящихся в интервале усреднения:

$$p_k = \frac{1}{K_{ch}} \sum_{n=0}^{K_{ch}-1} h_{n,k}, \quad h_{n,k} = \begin{cases} 1 & \text{при } E_k < E_{ch}(n) < E_{k+1}, \\ 0 & \text{при остальных,} \end{cases} \quad k = 0, \dots, K_{sm}, \quad (10)$$

где  $E_k$ ,  $E_{k+1}$  – граничные значения энергии  $k$ -го и  $(k+1)$ -го интервала усреднения.

**Гистограмма шумового сигнала.** Гистограмма энергии случайных сигналов, определенная согласно выражениям (9), (10), отражает плотность распределения как энергии шума в каналах без сигналов, так и энергии аддитивной суммы шума, детерминированных сигналов и стационарных помех. Для принятия решения по критерию Неймана – Пирсона допустимой вероятности ложной тревоги необходимо определить распределение энергии только шума. Наличие на гистограмме мощных сигналов и помех в области больших энергий не влияет на распределение энергии шума в области малых значений, но может исказить отражение истинных шумов на гистограмме и увеличить погрешность вычислений. С увеличением разницы между максимальным и минимальным значением энергии увеличивается диапазон энергий в интервале усреднения. В результате неизменное количество отсчетов энергии шума оказывается сосредоточенным во все меньшем количестве интервалов усреднения, что приводит к вероятности повышения ошибки в определении среднего значения энергии шума. Для построения гистограммы только шумового сигнала следует исключить из гистограммы все каналы, средняя энергия которых превышает некоторое граничное значение, определенное относительно средней энергии  $E_{ch \text{ mid}}$  во всех  $K_{ch}$  каналах:

$$E_{ch}(n) = E_{ch}(n)h_n, \quad h_n = \begin{cases} 1 & \text{при } E_{ch}(n) < \delta E \cdot E_{ch \text{ mid}}, \\ 0 & \text{при } E_{ch}(n) > \delta E \cdot E_{ch \text{ mid}}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $E_{ch}(n)$  – средняя энергия в  $n$ -м канале.

Применимость оценки (11) основана на относительно малом количестве детерминированных сигналов в ограниченном частотном диапазоне. В частности, пиковая загрузка каналов в УКВ-диапазоне 30 МГц – 1 ГГц в г. Нью-Йорке в 2004 г., за исключением каналов сотовой связи, не превышает 15 % [8]. Еще меньший процент составляют радиостанции, которые создают мощный сигнал на ареале измерений. Следовательно, неточность априорной оценки ограничения  $\delta E$  в (11) и ошибки в количестве исключенных каналов не приводят к значительным изменениям средней энергии  $E_{ch \text{ mid}}$ , в основном зависящей от истинной энергии шума  $\sigma^2$  в свободных каналах. Диапазон значений параметра  $\delta E$  можно оценить по вероятности ложной тревоги  $P_{FA}$  для гауссова шума (см. рис.2). При смещении относительно порогового уровня  $E_T/\sigma^2 = 0$  дБ на величину  $\delta E > 3$  дБ вероятность ложной тревоги в зависимости от количества отсчетов  $N$  составляет порядка 0,01, т.е. всего несколько каналов из 100 будут ошибочно исключены из последующего построения гистограммы шума как каналы, содержащие мощный детерминированный сигнал. Компьютерное моделирование показывает, что для сильно загруженного участка спектра (относительное количество занятых каналов со средней энергией  $E \gg E_{ch \text{ mid}}$  более 15 %) оптимальная величина  $\delta E = 1...3$  дБ, для диапазона частот с малым количеством работающих радиостанций (относительное количество занятых каналов со средней энергией  $E \approx E_{ch \text{ mid}}$  менее 5 %) оптимальная величина  $\delta E < 6$  дБ.

**Гистограмма детерминированных сигналов.** Формально на основании полной гистограммы (9), (10) может быть построена гистограмма детерминированных сигналов и стационарных помех. Гистограмма сигналов строится аналогично гистограмме шумов (11) путем удаления всех каналов, в которых средняя энергия не превышает установленного граничного значения энергии  $E_{ch}(n) < \delta E \cdot E_{chmid}$ . Следует ожидать, что достоверность плотности распределения средней энергии сигналов и помех будет не-большая, так как абсолютное количество каналов, в которых существует мощный сигнал или помеха, невелико.

**Параметры обнаружения и порог принятия решения.** Гистограмма для средней энергии шума  $p(E_k)$  в узкополосных каналах фактически является экспериментально измеренной плотностью распределения энергии шума на анализируемом интервале частот. Это распределение отражает истинное распределение энергии шума вне зависимости от его типа и источника (шум с нормальным распределением, «окрашенный» шум, внеполосное излучение передатчиков и т.п.), наличие мощных сторонних сигналов и помех и поэтому является основой для статистически достоверного определения порога принятия решения по критерию допустимой ложной тревоги.

Вероятность ложной тревоги  $P_{FA}(E_T)$  определяется как дискретный интеграл вероятности по гистограмме энергии шума  $p(E_k)$ :

$$P_{FA} = 1 - \sum_{j=0}^k p_j \quad \text{для} \quad 0 < k < K_{sm}, \quad (12)$$

где  $k$  – номер интервала усреднения (нормированный порог принятия решения  $E_T$ );  $p_j$  – плотность энергии на гистограмме шумового сигнала.

Абсолютный порог энергии  $E_T$  принятия решения по заданной величине ложной тревоги  $P_{FA0}$  определяется граничным значением интервала усреднения  $k_0 = F^{-1}(P_{FA0})$ , которому соответствует заданная вероятность ложной тревоги (9).

**Пример определения порога принятия решения.** В полосе частот анализа определено:  $K_{ch} = 80$  каналов, гауссов шум с единичной дисперсией, равномерный шум с единичной дисперсией и 10 детерминированных сигналов с относительной энергией 0 дБ и случайным значением центральной частоты, не обязательно совпадающей с центральной частотой канала. Всего 12 % занятых каналов отражают достаточно высокую степень загруженности анализируемой полосы частот. Средняя энергия в каждом канале  $E_{ch}$  определяется по  $N=16$  отсчетам. Распределение средней энергии по каналам и случайное расположение в полосе частот 10 детерминированных сигналов показаны на рис.3,а.

Для построения гистограммы распределения средней энергии шума в анализируемой полосе частот исключаются каналы, средняя энергия в которых на 3 дБ превышает среднюю энергию, вычисленную для всех 80 каналов. На рис.3,б показаны гистограмма энергии шумового сигнала  $p(k)$ , построенная согласно выражениям (9), (10) для  $K_{sm} = 15$  интервалов усреднения, и вероятность ложной тревоги  $P_{FA}(k)$ , построенная согласно выражению (12) в зависимости от нормированной энергии (номера интервала усреднения). Величина порога принятия решения  $E_T = 12,6$  дБ, определенная по графику рис.3,б при заданной ложной тревоге  $P_{FA0} = 0,05$ , показана на рис.3,а.

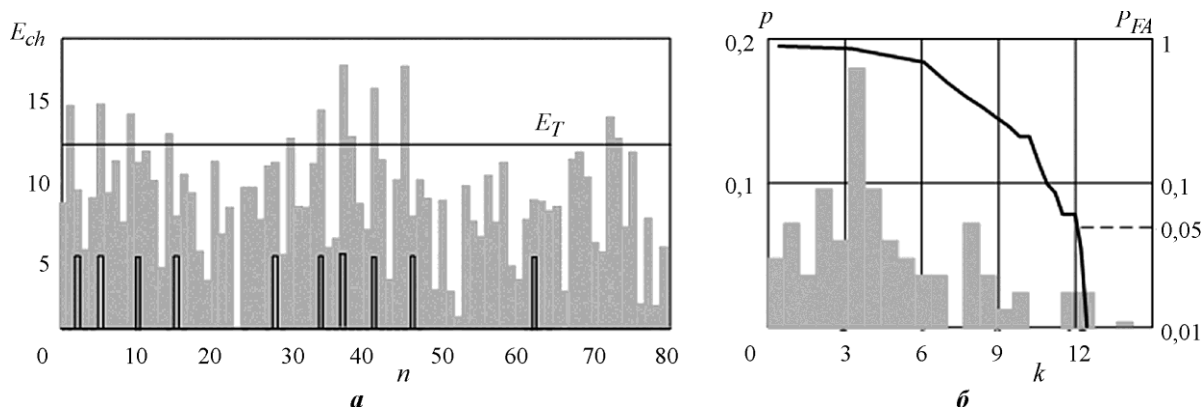


Рис.3. Распределение средней энергии в каналах (а) и гистограмма средней энергии шума и вероятность ложной тревоги (б)

Fig.3. Allocation of average energy into narrow band channels (a) and histogram of noise energy and probability of false alarm (b)

В тестовом режиме при заранее известном распределении частот детерминированных сигналов канал с частотой  $F_{ch}$  определяется как ложно занятый, если при энергии в канале, превышающей пороговое значение, на основном канале  $F_{ch}$  и на соседних каналах  $F_{ch-1}$  и  $F_{ch+1}$  отсутствует ожидаемый детерминированный сигнал. Это правило применяется, поскольку случайная частота детерминированного сигнала может не совпадать с центральной частотой канала и часть энергии сигнала перераспределяется в соседний канал. Аналогично определяется вероятность необнаружения занятого канала. Согласно принятому критерию, для порогового значения  $E_T = 12,6$  дБ из всех 80 каналов определены три ложно занятых канала, что соответствует вероятности ложной тревоги  $P_{FA} = 0,0375$ , и два необнаруженных занятых канала, что соответствует вероятности правильного обнаружения  $P_{TD} = 0,8$ . Ожидаемая вероятность правильного обнаружения может быть определена из интеграла вероятности правильного обнаружения, вычисленного согласно (12) по гистограмме энергии детерминированных сигналов и стационарных помех. Точность оценки ожидаемой вероятности правильного обнаружения возрастает с увеличением количества ожидаемых занятых каналов в анализируемой полосе частот.

**Закключение.** Предложенная программная реализация детектора средней энергии для анализа состояния эфира в радиостанциях программно-конфигурируемого радио имеет следующие преимущества: алгоритм детектирования основан только на измерении распределения полной энергии в анализируемой полосе частот, не требует априорных предположений о типе распределения энергии шума и сигналов, специальных измерений энергии шума и аппаратной доработки радиостанций.

### Литература

1. Галкин В.А. Анализатор состояния эфира в радиостанциях адаптивного радио // Радиотехника. – 2016. – №9. – С.146–155.
2. Armi N. Energy detector threshold under white Gaussian noise channel in cognitive radio system // 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering 2015. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7437832> (дата обращения: 20.01.2018).
3. Atapatti S. Energy detection for spectrum sensing in cognitive radio. – Springer, 2014. – 83 p.
4. Atapattu S. Performance of an energy detector over channels with both multipath fading and shadowing // IEEE Transactions on Wireless Communication. – 2010. – Vol. 9. – No. 12. – P. 3662–3670.

5. Методы измерения радишума. Рекомендация МСЭ-R SM.1753-2 (09/2012). – URL: [www.itu.int/pub/R-REC](http://www.itu.int/pub/R-REC) (дата обращения: 20.01.2018).
6. Измерения и оценка занятости спектра. Отчет МСЭ-R SM.2256 (09/2012). – URL: [www.itu.int/pub/R-REP](http://www.itu.int/pub/R-REP) (дата обращения: 20.01.2018).
7. **Галанов Ю.И.** Практическая статистика. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 80 с.
8. **Mchenry M.A.** NSF spectrum occupancy measurement project summary. Shared Spectrum Company Report, Aug.2005. – URL: [www.sharespectrum.com](http://www.sharespectrum.com) (дата обращения: 20.01.2018).

Поступила 22.01.2018; принята к публикации 25.09.2018 г.

**Галкин Вячеслав Александрович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), [vtchgalkin@mail.ru](mailto:vtchgalkin@mail.ru)

### References

1. Galkin V.A. Dynamical spectrum access in personal cognitive radios. *Radiotekhnika = Radio engineering*, 2016, no. 9, pp. 146–155. (in Russian).
2. Armi N. Energy detector threshold under White Gaussian Noise channel in cognitive radio system. *2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering 2015*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7437832> (accessed 20.01.2018).
3. Atapatti S. *Energy detection for spectrum sensing in cognitive radio*. Springer, 2014. 83 p.
4. Atapattu S. Performance of an energy detector over channels with both multipath fading and shadowing. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2010, vol. 9, no. 12, pp. 3662–3670.
5. *Methods of Noise Measurement. Recommendation МСЭ-R SM.1753-2*, 2012. Available at: [www.itu.int/pub/R-REC](http://www.itu.int/pub/R-REC) (accessed 20.01.2018). (in Russian).
6. *Measurements and Estimation of Spectrum Occupancy. Report МСЭ-R SM.2256*. Available at: [www.itu.int/pub/R-REP](http://www.itu.int/pub/R-REP) (accessed 20.01.2018). (in Russian).
7. Galanov Yu.I. *Practical Statistic*. Tomsk, TPU Publ., 2014. 80 p. (in Russian).
8. Mchenry M.A. *NSF spectrum occupancy measurement project summary*. Shared Spectrum Company Report, Aug. 2005. Available at: [www.sharespectrum.com](http://www.sharespectrum.com) (accessed 20.01.2018).

Submitted 22.01.2018; Accepted 25.09.2018.

### Information about the author:

**Vyacheslav A. Galkin** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [vtchgalkin@mail.ru](mailto:vtchgalkin@mail.ru)

## Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2018 гг.,  
аннотациями и содержанием последних номеров на русском  
и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>