

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.3>

УДК: 537.86

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ МЕТОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

А. А. Потапов

**Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**

Статья поступила в редакцию 30 августа 2021 г.

Аннотация. Разработан и апробирован метод расчета пороговых значений отношения сигнал/шум для обнаружения слабых радиосигналов с помощью оригинальной реализации энергетического детектора, основанной на применении непараметрических статистик, рассчитываемых на базе спектральных выборок, поступающих с измерительного оборудования. Расчетные значения порогов определяются дисперсией собственных шумов приемника и могут быть заранее установлены для конкретных режимов измерения и объемов выборок. Для широко используемой модели анализатора спектра расчетные пороги надежного обнаружения радиосигнала по соотношению сигнал/шум составили от +0,6 дБ для выборки объемом в 470 спектров до -11 дБ для выборки объемом в 30 000 спектров. Эксперимент подтвердил расчетные значения порогов обнаружения и одинаковую эффективность энергетического детектора как в отношении шумового сигнала от аналогового генератора, так и эфирных LTE сигналов. Предложенная реализация энергетического детектора не налагает требований на тип вероятностного распределения и применяемую сигнально-кодую конструкцию детектируемого радиосигнала, а также на характер распределения

суммарного времени активности в течении периода записи данных для непостоянных и спорадических сигналов.

Ключевые слова: энергетический детектор, радиомониторинг, обнаружение низкоуровневых радиосигналов.

Abstract. The estimation method for signal-to-noise ratio threshold values pertinent for low-level signals detection is developed and employed. The method is applicable for original energy detection technique based upon distribution-free statistics computed using spectrum samples provided by measuring equipment. Estimated thresholds are determined by measuring equipment inherent noise fluctuations and can be established in advance for certain hardware settings and sample lengths. For a typical spectrum analyzer model estimated sensitivity threshold varied from +0,6 dB to -11 dB for spectrum samples lengths ranged between 470 and 30 000 spectrums respectively. Experimental data confirmed estimated values and equivalence of sensitivity thresholds for white noise (generated by analog generator) and broadcasted LTE signals (generated by cellular base stations). The suggested energy detection technique is independent of signal's modulation, signal's probability distribution features, and intermittent or sporadic signal's total duration allotment profile within data acquisition period.

Key words: energy detection, radiomonitoring, low-level radio signal detection.

Введение.

Метод энергетического детектора – *energy detection* (далее – ЭД) является одним из универсальных методов обнаружения радиосигналов, который отличается методической простотой реализации и не требует применения распределенной системы технических средств мониторинга. Метод ЭД основан на обнаружении изменения средней мощности сигнала в искомой полосе частот и сравнении ее с пороговым значением P_{Tr} , которое определяется дисперсией собственных шумов используемого измерительного оборудования [1-3].

При использовании метода ЭД не требуется априорной информации о характеристиках детектируемого сигнала (ширина полосы частот и

используемая сигнально-кодовая конструкция), в связи с чем это направление активно развивается не только как метод пассивной оценки радиочастотной обстановки, но и в качестве одного из компонентов активного динамического управления спектром – оценки текущего состояния радиочастотного спектра (*spectrum sensing*) в соответствующих частотных полосах, используемых системами когнитивного радио [4].

Оценка порогов обнаружения радиосигналов методом ЭД обычно сводится к определению зависимости вероятности обнаружения (P_d) и ложного обнаружения (P_f) радиосигнала от соотношения сигнал/шум (далее – SNR), включая определение граничного SNR ниже которого обнаружение радиосигнала невозможно при используемых параметрах измерения (т.н. *SNR wall*) [1, 2].

Применение в разных реализациях ЭД постоянных величин P_{Tr} направлено на достижение фиксированных значений P_d и P_f , а применение динамически изменяемых значений P_{Tr} имеет целью максимизацию P_d в зависимости от текущего SNR [5, 6].

Системными недостатками опубликованных аналитических оценок порогов чувствительности ЭД являются априорные предположения о соответствии функций распределения шумов и сигнала тому или иному стандартному распределению [7], наличие определенной модуляции сигнала [8], не основанный на эксперименте учет возможных вариаций дисперсии шумов приемника, что влияет на оцениваемую чувствительность метода [9]. Все это ограничивает проводимый анализ возможностей ЭД как сигнало-независимого метода из-за частного и трудно сравнимого между собой характера соответствующих аналитических оценок.

Оценка временных порогов обнаружения радиосигналов методом ЭД, т.е. зависимости достижимой чувствительности от отношения продолжительности существования (активности) искомого сигнала к общей продолжительности периода измерения, в рамках опубликованных материалов не проводится, т.к.

принимается, что характеристики детектируемого сигнала остаются неизменными в ходе периода измерений [6], отсутствует влияние на параметры сигнала интерференционных замираний [8], а сам сигнал описывается симметричным одномодальным распределением с неизменными параметрами [9, 10].

Имеющиеся ограничения аналитических оценок эффективности метода ЭД, связанные как с определением порогов обнаружения радиосигналов, так и отсутствием учета характеристик реальных аппаратных платформ, могут быть преодолены с использованием разработанной реализации метода ЭД, базирующейся на применении непараметрических (*distribution-free*) статистик, рассчитываемых на базе поступающих с используемого измерительного оборудования периодических спектральных выборок, и учитывающей технические параметры такого оборудования.

1. Практическая реализация непараметрического метода энергетического детектора.

При сканировании искомого частотного диапазона с помощью анализатора спектра (измерительного приемника) в режиме получения периодических спектральных выборок пользователю поступает информация об амплитуде радиосигнала в каждой из частотных полос F_k ($k=1..n$) шириной равной установленному значению разрешения по частоте – RBW , количество которых n определяется настройками, а периодичность получения – аппаратными характеристиками используемого прибора.

Обнаружение искомого радиосигнала возможно с применением следующих статистик для каждой k -ой частотной полосы шириной RBW , составлявших сканируемый диапазон:

1) набора значений *верхних* (Q_j^{UP}) доверительных границ (с доверительной вероятностью P_c) для ряда j квантилей ($0 < j < 1$) экспериментально установленного распределения *мощности собственных шумов* используемого

оборудования в условиях изоляции приемного тракта от внешних шумов и сигналов – $Q_{0,01}^{UP}, Q_{0,05}^{UP}, Q_{0,1}^{UP} \dots Q_{0,95}^{UP}, Q_{0,99}^{UP}$ ($Q_{0,01}^{UP}$ – верхняя доверительная граница 1 % квантиля и т.д.);

2) набора значений *нижних* (Q_j^{Low}) доверительных границ (с доверительной вероятностью P_c) для ряда j квантилей ($0 < j < 1$) экспериментально установленного распределения фиксируемой оборудованием *мощности сигнала* по данным анализируемой совокупности спектров – $Q_{0,01}^{Low}, Q_{0,05}^{Low}, Q_{0,1}^{Low} \dots Q_{0,95}^{Low}, Q_{0,99}^{Low}$ ($Q_{0,01}^{Low}$ – нижняя доверительная граница 1 % квантиля и т.д.).

Решение о наличии сигнала в k -ой частотной полосе принимается при выполнении условия (1) для соответствующих квантилей j собственных шумов приемника и внешнего сигнала:

$$Q_j^{Low} > Q_j^{UP}, \quad (1)$$

не менее чем для одного квантиля j .

Решение об отсутствии сигнала в k -ой частотной полосе принимается при выполнении условия (2):

$$Q_j^{Low} \leq Q_j^{UP}, \quad (2)$$

для всех значений j .

Значения вышеуказанных верхних и нижних доверительных границ вычисляются с помощью соотношений (3) и (4) [11]:

$$N_j^{UP} = F_{icdf}(P_c, N, j) + 1, \quad (3)$$

$$N_j^{Low} = N - F_{icdf}(P_c, N, 1 - j), \quad (4)$$

где N_j^{UP} и N_j^{Low} – номера позиций в упорядоченных по возрастанию рядах значений $L_1 \dots L_N$ шумов и сигнала соответственно в выборке объемом в N значений, величины в которых равны доверительным границам Q_j^{UP} и Q_j^{Low} , а F_{icdf} – квантильная функция биномиального распределения.

Для исключения ложных срабатываний ЭД значение Q_j^{UP} в (1) и (2) должно соответствовать пороговому критерию P_{Trj}^{UP} , который определяется для каждого j квантиля k -ой частотной полосы и рассчитывается на основе опорной выборки значений шумов оборудования N_M объемом $M > 20N$. P_{Trj}^{UP} принимается равным максимальному значению Q_j^{UP} из последовательности, полученной с помощью скользящего окна величиной N по выборке N_M (5):

$$P_{Trj}^{UP} = \max(Q_j^{UP(i...(i+(N-1)))}), \quad (5)$$

где $i = 1...M - (N - 1)$, а $(Q_j^{UP(i...(i+(N-1)))})$ – скользящее окно, включающие элементы от i до $i + (N - 1)$ последовательности N_M , по которым определяется значение Q_j^{UP} посредством (3).

Условием применимости критериев (1) и (2) для обнаружения сигналов является измерение собственных шумов измерительного прибора и рабочих измерений сигнала с полностью аналогичными настройками (частотный диапазон, RBW и т.п.).

Принятие решения о наличии или об отсутствии радиосигнала в искомой частотной полосе с применением одновременно двух доверительных границ, рассчитываемых по данным опорной выборки шума N_M и рабочей выборке сигнала объемом N , обеспечивает для сигнала с минимально детектируемым уровнем номинальную вероятность правильного решения P_d^{Nom} на базе критерия (1) равную P_c^2 , а вероятность принятия ошибочного решения P_f^{Nom} равную $1 - P_c^2$, что для $P_c = 0,99$ составит 0,9801 и 0,0199 соответственно.

2. Метод определения амплитудных порогов обнаружения радиосигналов методом непараметрического энергетического детектора.

Анализ опорной выборки шума N_M позволяет определить амплитудный порог обнаружения радиосигнала методом непараметрического энергетического

детектора, т.е. минимальное значение отношения сигнал/шум SNR_{Tr} для k -ой частотной полосы, при котором P_d и P_f составят P_d^{Nom} и P_f^{Nom} соответственно при $P_c = 0,99$ (6):

$$SNR_{Tr} = 10 \log_{10} (10^{\Delta * 0,1} - 1), \quad (6)$$

где SNR_{Tr} – амплитудный порог обнаружения радиосигнала, дБ; а Δ – минимальная разность, получаемая по всему используемому набору соответствующих значений j с помощью (7):

$$\Delta = \min(P_{Trj}^{UP} - P_{Trj}^{Low}), \quad (7)$$

где P_{Trj}^{Low} – минимальное значение Q_j^{Low} , определяемое с помощью (8):

$$P_{Trj}^{Low} = \min(Q_j^{Low(i \dots (i+(N-1)))}), \quad (8)$$

где $i = 1 \dots M - (N - 1)$, а $(Q_j^{Low(i \dots (i+(N-1)))})$ – скользящее окно, включающие элементы от i до $i + (N - 1)$ последовательности N_M , по которым определяется значение Q_j^{Low} посредством (4). Соотношения (6) и (7) справедливы при подстановке величин P_{Trj}^{UP} и P_{Trj}^{Low} в логарифмических единицах мощности сигнала (дБмВт и т.п.). При экспериментальной проверке применимости соотношений (6)-(8), результаты которой приведены ниже, был использован набор из 21 значения j – 0,01, 0,05, 0,10 ... 0,95, 0,99.

3. Амплитудно-временные пороги обнаружения радиосигналов методом непараметрического энергетического детектора.

Пусть обнаруживаемый радиосигнал присутствует (активен) в течение только части периода записи данных t , необходимого для получения выборки объемом N спектров. Обозначим общую длительность активности такого сигнала, выраженную в долях t , как T .

Примем следующее определение амплитудно-временного порога обнаружения: амплитудно-временным порогом обнаружения непостоянного радиосигнала длительности T ($0 < T < 1$) энергетическим детектором является

минимальное отношение сигнал/шум SNR_T при котором обеспечивается его обнаружение с вероятностью равной P_d^{Nom} . При $T = 1$, очевидно, $SNR_T = SNR_{Tr}$.

В общем случае значения SNR_T будут зависеть как от конкретного значения T , так и характера вариаций амплитуды искомого радиосигнала в пределах периода активности. Вместе с тем, для оценки базовой чувствительности метода ЭД к непостоянным радиосигналам, SNR_T можно оценить для частного случая для которого примем, что в период активности искомый радиосигнал имеет постоянную амплитуду, а вне этого периода он отсутствует и записанные данные представлены шумами приемника. В данном частном случае снижение чувствительности относительно SNR_{Tr} для непостоянных и спорадических радиосигналов будет определяться уменьшением среднего значения сигнал/шум и SNR_T может быть представлен в виде (9), который справедлив для любого объема выборки:

$$SNR_T = SNR_{Tr} - 10 \log_{10}(T). \quad (9)$$

4. Экспериментальное определение амплитудных порогов обнаружения радиосигналов методом непараметрического энергетического детектора.

Экспериментальная апробация метода определения амплитудных порогов обнаружения радиосигналов для предложенной реализации ЭД была проведена с использованием анализатора спектра Tektronix RSA306B (№ 66696 в Государственном реестре средств измерений). В ходе нее для полосы 40 МГц (центральная частота 2,64 ГГц, RBW 100 кГц) на основе опорной выборки N_M объемом $3 \cdot 10^6$ спектров, полученных в условиях подключения согласованной нагрузки 50 Ом к входному порту прибора, для каждой из 400 частотных полос шириной 100 кГц с помощью (6)-(8) были определены значения SNR_{Tr} .

На рис. 1 (кривая 1) приведены средние по полосе 40 МГц значения SNR_{Tr} для ряда стандартных объемов выборок в диапазоне от 470 до 30 000 спектров, полный перечень которых приведен в таблице 1. Из рис. 1, видно, что при объеме

выборки начиная от 470 спектров имеется возможность надежного обнаружения радиосигналов с $SNR \approx 0$ дБ, с дальнейшим улучшением чувствительности на $\approx 1,9$ дБ при каждом удвоении объема выборки.

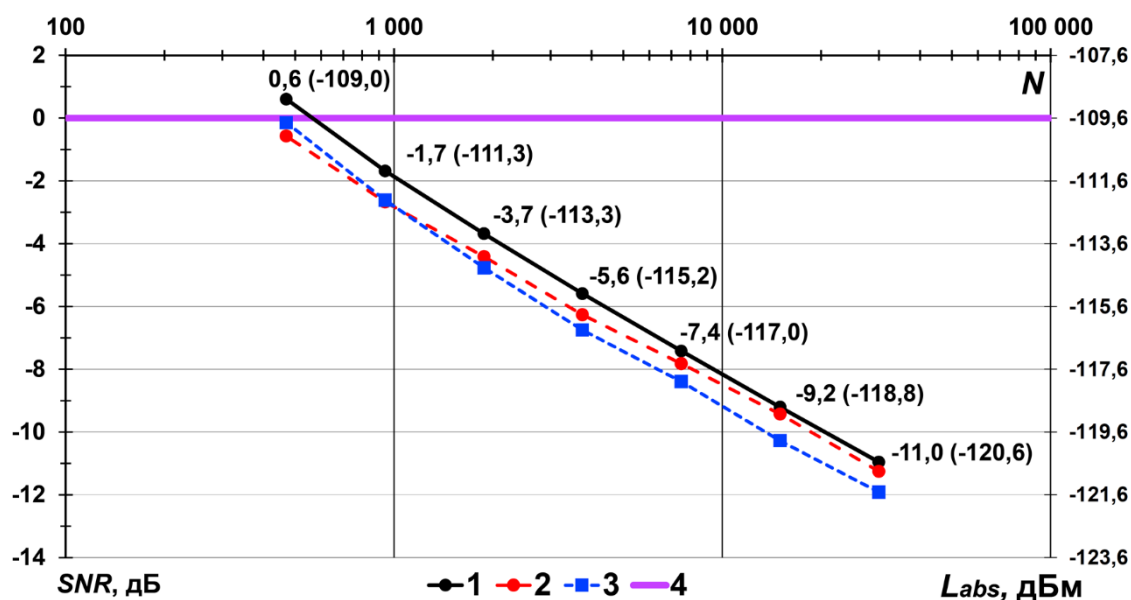


Рис. 1. 1 – Расчетные значения SNR_{Tr} , цифрами указаны соответствующие величины для разных значений N (в скобках указаны соответствующие им абсолютные значения уровней сигнала); экспериментальные значения SNR_{Tr} : 2 – шумовой сигнал от аналогового генератора; 3 – эфирный LTE сигнал; 4 – средний уровень собственного шума использованного в эксперименте анализатора спектра.

Таблица 1. Стандартные объемы спектральных выборок и длительности их накопления анализатором спектра.

№	Объем выборки N , спектров	Время накопления данного количества спектров, сек	Шаг движения скользящего окна при обработке данных, спектров
1	30 000	207,0	7 500
2	15 000	103,5	7 500
3	7 500	51,8	7 500
4	3 750	25,9	3 750
5	1 880	13,0	1 880
6	940	6,5	940
7	470	3,2	470

Средний по всем полосам F_k среднеквадратический уровень собственного шума анализатора спектра Tektronix RSA306B при RBW 100 кГц по данным выборки N_M составил $-109,6$ дБм, эта величина позволяет "привязать" значения SNR_{Tr} к абсолютной шкале уровня сигнала, т.к. значения SNR_{Tr} характеризуют среднюю по полосе измерений чувствительность ЭД относительно уровня собственных шумов приемника. В правой части рис. 1 приведена шкала абсолютных уровней мощности L_{abs} сигнала (в дБм), соответствующая значениям шкалы SNR в левой части рисунка, а в составе цифровых подписей кривой 1 (в скобках) указаны соответствующие значениям SNR_{Tr} абсолютные амплитудные пороги обнаружения сигнала. Уровень собственных шумов Tektronix RSA306B на рис. 1 показан утолщенной линией фиолетового цвета (кривая 4); данный уровень соответствует пределу к которому стремится отображаемый на экране программы управления анализатором спектра среднеквадратический уровень собственного шума (т.н. *noise floor* [1, 2]) при осреднении спектральных данных во времени и одновременно определяет порог мощности сигнала для его обнаружения с помощью встроенных в программное обеспечение инструментов визуального анализа радиочастотного спектра (кривые максимальных/минимальных/средних значений и т.п.) без привлечения изложенного в настоящей статье метода ЭД; с помощью этих инструментов пользователь может выявлять сигналы, которые на несколько децибел и более превышают *noise floor* измерительного прибора даже при малом времени накопления или осреднения данных.

После определения опорных значений SNR_{Tr} на основе анализа вариаций собственных шумов измерительного прибора, была проведена верификация величин соответствующих порогов в условиях обнаружения внешнего радиочастотного сигнала, поступающего в измерительный тракт.

Источником внешнего сигнала был аналоговый генератор белого шума, который обеспечивал наличие соответствующего сигнала в частотной полосе проведения измерений со средним по всем полосам F_k отношением сигнал/шум

равным +32 дБ при установке ослабления 0 дБ на применявшемся в эксперименте программно-управляемом аттенуаторе. С использованием этого аттенуатора были получены выборки объемом по $15 \cdot 10^4$ спектров для 200 значений ослабления сигнала (с шагом в 0,25 дБ), обеспечивших его реализации с SNR от +20 до -25 дБ (расчет осуществлялся для каждой частотной полосы с учетом значения вносимого аттенуатором затухания и величины опорного уровня сигнала при ослаблении 0 дБ). При обработке результатов эксперимента общая выборка объемом $15 \cdot 10^4$ спектров с помощью скользящего окна разбивалась на рабочие выборки стандартных объемов N , приведенных в таблице 1 (там же указан шаг движения скользящего окна для всех объемов выборок). Также в таблице 1 указана длительность накопления соответствующего числа спектров при проведении измерений в полосе 40 МГц.

Наряду с записью периодических спектральных выборок внешних сигналов, в ходе эксперимента на каждые 240 000 спектров сигнала записывалось 60 000 спектров текущего уровня собственных шумов анализатора спектра. Запись шумов прибора осуществлялась при ослаблении внешнего сигнала на 90 дБ; запись шумовых спектров велась блоками по 15 000 спектров, равномерно распределенных между периодами записи внешних сигналов. В ходе обработки данных (по общему блоку из 300 000 спектров) по записанным шумовым спектрам для каждой частотной полосы вычислялся среднеквадратический уровень текущих шумов спектроанализатора и определялось его отклонение от аналогичной величины по выборке N_M . С учетом вычисленного отклонения вводилась поправка к уровню записанных внешних сигналов, учитывающая смещение среднего уровня собственных шумов измерительного прибора за счет неизбежных флуктуаций температурно-влажностных характеристик помещения относительно условий записи опорной последовательности N_M . В ходе измерений с применением генератора белого шума между блоками из 300 000 спектров дополнительно проводился периодический контроль опорного уровня его сигнала, относительно которого проводился расчет SNR .

Зависимость $P_d(SNR)$ для выборки объемом N определялась посредством расчета вероятности обнаружения непрерывного сигнала, определяемой отношением количества частотных полос для которых выполнялось условие (1) при $P_c = 0,99$, к общему количеству полос в группе с данным средним по группе SNR (группы были выделены по величине SNR и имели ширину $\pm 0,25$ дБ относительно кратных $0,5$ дБ значений); соответствующие оценки проведены для всех значений N из таблицы 1. На рис. 1 (кривая 2) показаны полученные интерполяцией на экспериментальной кривой $P_d(SNR)$ значения SNR для P_d^{Nom} шумового сигнала.

Аналогичные результаты были получены и для эфирных *Downlink* радиосигналов стандарта LTE, исходящих от базовых станций сотовой связи и находящихся в том же частотном диапазоне [12]. Прием эфирных сигналов проводился на антенну, расположенную в апертуре оконного проема внешней стены здания. В рамках полосы 40 МГц фиксировалось два сигнала, каждый из которых занимал полосу $17,8$ МГц (средний уровень сигнала при ослаблении 0 дБ имел $SNR \approx +30$ дБ). Зависимость $P_d(SNR)$ для сигналов стандарта LTE определялась таким же образом, что и для белого шума, с той разницей, что расчет соответствующих величин проводился только для частотных полос, попадавших в частотные границы устойчивого LTE сигнала, а значения SNR определялись с помощью соотношения (6) в котором величина Δ рассчитывалась как разница между среднеквадратическим уровнем сигнала по соответствующей рабочей выборке и среднеквадратическим уровнем шума прибора по выборке N_M . На рис. 1 (кривая 3) показаны полученные интерполяцией на экспериментальной кривой $P_d(SNR)$ значения SNR для P_d^{Nom} LTE сигнала.

Экспериментальные значения SNR для P_d^{Nom} для шумового и LTE сигналов (кривые 2 и 3 на рис. 1) отклонялись от соответствующих априорных значений SNR_{Tr} не более чем на $1,2$ дБ, поэтому разработанный метод определения амплитудных порогов обнаружения радиосигналов с помощью (6)-(8) можно

считать корректной и консервативной оценкой чувствительности предлагаемой реализации ЭД.

Длительность накопления самой большой из стандартных выборок составляла 3,5 минуты (см. таблицу 1), что с учетом необходимости контроля уровня шумов приемника (при отношении рабочих и калибровочных измерений 1:4) в сумме было равно 4,3 минуты. Это позволяет использовать ЭД для оперативного контроля полосы в 40 МГц, равной полосе приема реального времени использованного прибора. При применении более совершенного оборудования с полосой реального времени от нескольких сотен мегагерц, получающего все более широкое распространение, реализуемо расширение частотной полосы оперативного контроля до 1 ГГц и более без значительного увеличения длительности измерений относительно приведенных.

Для контроля вероятности ложных срабатываний ЭД была получена независимая от N_M выборка объемом $5,7 \cdot 10^6$ спектров в условиях подключения ко входу анализатора спектра согласованной нагрузки 50 Ом. Результаты обработки всего объема данных данной выборки ранее описанным способом при всех стандартных значениях N не выявили фактов ложного срабатывания предлагаемой реализации ЭД.

5. Определение амплитудно-временных порогов обнаружения радиосигналов методом непараметрического энергетического детектора на базе экспериментальных данных.

Определение амплитудно-временных порогов обнаружения радиосигналов было реализовано посредством дополнительной обработки ранее описанных результатов измерений шумового сигнала от аналогового генератора и эфирных LTE сигналов. Определение порогов проводилось для следующих значений T : 0,75, 0,50, 0,25 и 0,10. При этом было принято, что временное распределение амплитуды искомого сигнала соответствует вышеописанному частному случаю, когда в период активности радиосигнал имеет постоянную или

квазипостоянную амплитуду, а в остальные периоды времени сигнал соответствует собственным шумам приемника.

Для определения амплитудно-временных порогов для данного значения T общая выборка объемом $15 \cdot 10^4$ спектров, полученная для данного ослабления сигнала, с помощью скользящего окна разбивалась на рабочие выборки стандартных объемов N , при этом в каждой рабочей выборке случайно выбранные $(1 - T) \cdot N$ спектров сигнала заменялись на ранее записанные спектры собственных шумов анализатора спектра.

При обработке записанных спектров шумового сигнала от аналогового генератора расчет соотношения сигнал/шум по соответствующей рабочей выборке велся только по оставшимся спектрам реального сигнала, что обеспечило непосредственное определение зависимости $P_d(SNR)$ для данного значения T и объема выборки N .

При обработке записанных спектров LTE сигнала расчет значения SNR проводился на базе разницы между среднеквадратическим уровнем сигнала по всей соответствующей рабочей выборке и среднеквадратическим уровнем шума прибора по выборке N_M с помощью соотношения (6), но к полученному значению вводилась поправка равная $-10 \log_{10}(T)$ для текущего значения T , что позволяло учитывать снижение фактического среднего отношения сигнал/шум по набору спектров.

Все дальнейшие этапы обработки данных при определении значения SNR для P_d^{Nom} для всех анализируемых значений T были аналогичны ранее описанным. На рис. 2 показаны значения SNR_T для четырех выборок с объемами в 3750, 7500, 15000 и 30000 спектров для которых при $T = 0,1$ экспериментальная величина SNR_T не превышала + 3,7 дБ.

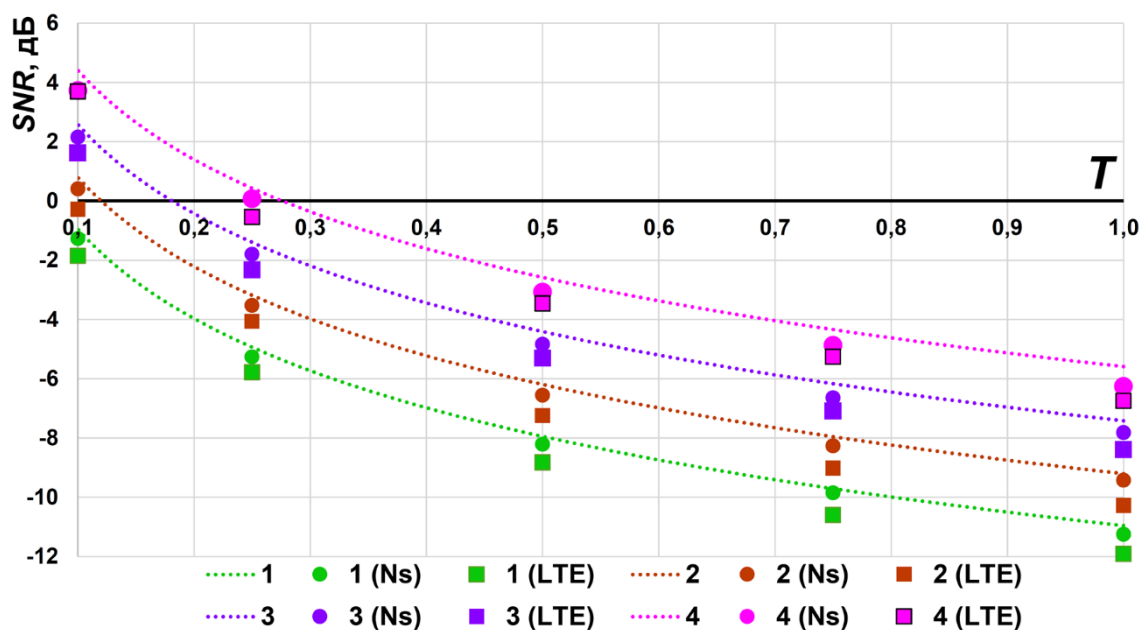


Рис. 2. Амплитудно-временные пороги обнаружения сигналов для четырех стандартных объемов выборок (цифры 1...4 соответствуют объемам выборок в строках таблицы 1 с аналогичными номерами); пунктир – расчетные значения SNR_T относительно опорных SNR_{T_r} , полученные с помощью (9); круглые маркеры – экспериментальные значения SNR_T для шумового сигнала (Ns), квадратные маркеры – для LTE сигнала; для $T = 1$ маркеры соответствуют кривым 2 и 3 на рис. 1.

На рис. 2 пунктирными кривыми показаны расчетные значения SNR_T , полученные исходя из опорных значений SNR_{T_r} , к которым была введена поправка за значение T , определенная с помощью (9). Точечными символами (маркерами) показаны экспериментально установленные значения SNR_T для разных объемов выборок и четырех анализируемых значений T .

Для шумового сигнала среднее отклонение по всем значениям T и N , показанным на рис. 2, экспериментально установленных порогов SNR_T от расчетных значений, полученных с помощью (9), составило 0,4 дБ, а максимальное 0,7 дБ. Аналогичные величины для эфирных LTE сигналов составили 0,9 и 1,1 дБ соответственно.

Данные на рис. 2 хорошо иллюстрируют возможности предлагаемой реализации метода энергетического детектора по обнаружению непостоянных и спорадических сигналов в рамках рассмотренного частного случая распределения амплитуды сигнала (постоянный уровень искомого сигнала в

период активности); например, чувствительность ЭД снижается на 3 дБ при наличии сигнала в течение половины времени от общей продолжительности накопления данных. При этом предлагаемая реализация метода энергетического детектора не накладывает каких-либо ограничений на характер распределения суммарного времени активности сигнала внутри периода записи соответствующей спектральной выборки.

Заключение.

Представлена практическая реализация метода энергетического детектора, основанная на применении непараметрических статистик, рассчитываемых на базе поступающих с используемого измерительного оборудования периодических спектральных выборок, обеспечивающая обнаружение слабых радиосигналов – с низким и отрицательным отношением сигнал/шум.

Определены амплитудные пороги обнаружения радиосигналов с помощью разработанной реализации ЭД. Для широко используемой модели анализатора спектра соответствующие экспериментально подтвержденные пороги надежного ($> 0,98$) обнаружения радиосигнала по соотношению сигнал/шум составили от +0,6 дБ для выборки объемом 470 спектров до –11 дБ для выборки объемом 30 000 спектров.

На основе экспериментальных данных определены амплитудно-временные пороги обнаружения радиосигналов с помощью разработанной реализации ЭД. При обнаружении непостоянных и спорадических сигналов в рамках рассмотренного частного случая (постоянный уровень искомого сигнала в период активности) повышение порога чувствительности ЭД относительно базовых амплитудных порогов не превышает 3 дБ при наличии сигнала в течение 1/2 и 6 дБ в течении 1/4 периода накопления данных, т.е. соответствующие величины полностью определяются уменьшением среднего отношения сигнал/шум по соответствующей выборке.

Предложенная реализация ЭД не налагает специальных требований на тип вероятностного распределения и применяемую сигнально-кодую

конструкцию детектируемого радиосигнала, а также на характер распределения суммарного времени активности непостоянных и спорадических сигналов внутри периода записи спектральной выборки.

Предложенная реализация ЭД показала одинаковую эффективность при обнаружении как немодулированного шумового сигнала от аналогового генератора, так и эфирных LTE сигналов, использующих современные сигнально-кодовые конструкции, осложненные эффектами многолучевого распространения радиоволн и непостоянностью среднего уровня, зависящего от активности абонентов.

Экспериментально определенные значения SNR_{T_r} для шумового и LTE сигналов с отклонением менее 1,2 дБ совпали с соответствующими расчетными значениями, определенными на основе анализа флуктуаций собственных шумов анализатора спектра. Среднее отклонение расчетных значений SNR_{T_r} от экспериментальных составило 0,4 и 0,9 дБ для шумового и эфирного LTE сигналов соответственно.

В ходе эксперимента не было выявлено фактов ложного срабатывания ЭД при отсутствии внешнего сигнала в измерительном тракте, что обеспечивает возможность его применения в задачах, требующих надежного обнаружения слабых сигналов от различных источников.

Разработанная практическая реализация ЭД и методы определения соответствующих амплитудно-временных порогов обнаружения радиосигналов могут быть использованы в исследованиях в областях мониторинга радиочастотной обстановки, электромагнитной совместимости технических средств и при оценках характеристик радиотрасс со значительным затуханием сигнала при изучении распространения радиоволн.

Литература

1. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. *Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*. New York, Springer. 2014. 83 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0494-5>
2. Zhang W. – Ed. *Handbook of cognitive radio*. Singapore, Springer Nature. 2019. 2048 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1394-2>
3. Mandloi M., Gurjar D., Pattanayak P., Nguyen H. – Eds. *5G and beyond wireless systems: PHY layer perspective*. Singapore, Springer Nature. 2021. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6390-4>
4. Liang Y-C. *Dynamic Spectrum Management: From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Singapore, Springer Open. 2020. 166 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0776-2>
5. Kumar A., Thakur P., Pandit S., Singh G. Performance analysis of different threshold selection schemes in energy detection for cognitive radio communication systems. *2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. Shimla, IEEE. 2017. P.1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIIP.2017.8313702>
6. Kumar A., Thakur P., Pandit S., Singh G. Analysis of optimal threshold selection for spectrum sensing in a cognitive radio network: an energy detection approach. *Wireless Networks*. 2019. №25. P.3917-3931. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-01927-y>
7. Suneel A.S., Shiyamala S. Peak detection based energy detection of a spectrum under Rayleigh fading noise environment. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021. №12. P.4237-4245. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01818-1>
8. Lorincz J., Ramljak I., Begušić D. A review of the noise uncertainty impact on energy detection with different OFDM system designs. *Computer Communications*. 2019. №148. P.185-207. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.09.013>
9. Mahendru G., Shukla A., Banerjee P. A novel mathematical model for energy detection based spectrum sensing in cognitive radio networks. *Wireless Personal*

Communications. 2020. №110. P.1237-1249. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06783-3>

10. Verma P. Adaptive threshold based energy detection over Rayleigh fading channel. *Wireless Personal Communications*. 2020. №113. P.299-311. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07189-2>
11. Meeker W.Q., Hahn G.J., Escobar L.A. *Statistical intervals: A guide for practitioners and researchers – 2nd. Ed.* Hoboken, John Wiley & Sons, Inc. 2017. 592 p. <https://doi.org/10.1002/9781118594841>
12. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G – 3rd. Ed.* London, Academic Press. 2016. 590 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01834-2>

Для цитирования:

Потапов А.А. Определение порогов обнаружения радиосигналов для метода энергетического детектора. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.3>