

# Детектор свободных участков радиочастотного спектра

В.А. Жмылев

МИЭТ, г. Москва, vz-75@yandex.ru

**Аннотация** — В статье рассматриваются программно-аппаратные средства, способные определять свободные участки радиочастотного спектра. При помощи этих средств можно устанавливать сеансы связи на временно свободных участках радиочастотного спектра. Представлены требования, предъявляемые к детектору. Предложены различные варианты аппаратных средств. Рассмотрены способы анализа, применяемые на различных аппаратных средствах. Подробно описан алгоритм формирования гистограммы энергии, определения порога принятия решения.

**Ключевые слова** — программно-конфигурируемое радио, когнитивное радио, вторичные сети связи, концепция вторичных пользователей, детектор энергии, анализатор эфира.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время весь радиочастотный спектр распределён между различными пользователями. По данным международной статистики относительная занятость участков радиочастотного спектра даже в пиковые часы не превышает 16% [4]. Поскольку все частоты распределены, для работы новых пользователей существует проблема доступа к свободным участкам радиочастотного спектра. Эффективность использования радиочастотного спектра можно повысить за счет использования временно свободных участков спектра, что позволяет в том числе и повысить помехоустойчивость, например, работать в режиме ППРЧ (псевдослучайная перестройка радиочастоты), оперативно изменять рабочую полосу частот, чтобы повысить скорость передачи данных и т.п. Важно, чтобы при работе на вторичной основе не нарушалась работа первичных пользователей. Для организации вторичных сетей связи необходим детектор свободных каналов, позволяющий с высокой степенью достоверности определять свободные участки радиочастотного спектра.

Развитие цифровых технологий привело к идеологии систем связи основанной на идее программно-конфигурируемого радио – Software Defined Radio (SDR). Системы связи программно-конфигурируемого радио получили широкое распространение во многих областях техники. Зачастую, на одной аппаратной платформе приходится совмещать различные стандарты связи, работать в различных режимах, модернизировать протоколы и т.д. В аппаратуру систем связи программно-конфигурируемого радио закладывается элементная

база с запасом производительности (вычислительных ресурсов). Конфигурация таких систем связи осуществляется, в основном, путем обновления программного обеспечения. Программными средствами управляются такие параметры радиостанция как: вид модуляции, скорость передачи информации, способы кодирования, режим работы и т.д.

В настоящее время параметры радиоканала (ширина и центральная частота канала) строго закреплены за пользователем, и пользователь может работать только в пределах выделенных участков радиочастотного спектра. Управление параметрами радиоканала, а именно установка сеансов связи на временно свободных участках спектра позволяет повысить эффективность использования спектра, повысить помехоустойчивость связи, при необходимости увеличить скорость передачи данных и т.п. Поэтому реализация детектора свободных участков радиочастотного спектра представляется актуальной задачей.

## II. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Технические требования, предъявляемые к детектору, продиктованы постановкой задачи – определять свободные участки радиочастотного спектра.

Диапазон частот, в котором осуществляется анализ, и ширину канала задает пользователь. Это требование объясняется тем, что свободные участки спектра определяются для нужд пользователя, и в зависимости от своих нужд пользователь устанавливает требуемую ширину канала и диапазон частот, в котором желает установить сеанс связи.

Детектор определяет свободные участки радиочастотного спектра независимо от типа сигналов. В радиочастотном спектре присутствуют не только сигналы различных радиостанций, но и стационарные помехи, например исходящие от производственных станков. Наличие в канале стационарной помехи или сигнала сторонней радиостанции должно приводить к решению о занятости канала, поскольку такой канал не пригоден для установки сеанса связи.

Время анализа сравнимо с временем стационарности радиоканала, поскольку состояние канала за время измерения не должно меняться.

Детектор является детектором энергии. Энергия является общим параметром для любых сигналов.

Поскольку параметры обнаруживаемых сигналов заранее неизвестны, то сигналы детектируются по средней энергии.

Обнаружение сигналов осуществляется на основе критерия Неймана-Пирсона. Вычисление порогового значения происходит по измеренным значениям средних энергий в каждом канале и по заданной (допустимой) вероятности ложной тревоги.

### III. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Аппаратные средства необходимые для реализации детектора свободных участков радиочастотного спектра представляют собой собственный приемник радиостанции программно-конфигурируемого радио или специализированный приемник.

Реализовать детектор свободных участков радиочастотного спектра можно на аппаратной базе собственного приемника радиостанции программно-конфигурируемого радио путем обновления программного обеспечения.

Специализированный приемник представляет собой отдельное устройство. В процессе разработки, можно заложить широкую полосу ВЧ (высокочастотного) тракта, что способствует меньшему времени анализа.

Функциональная схема приемника программно-конфигурируемого радио представлена на рис. 1.

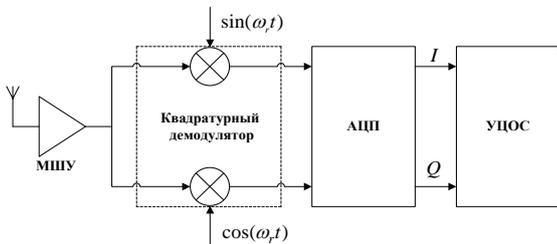


Рис. 1. Функциональная схема приемника

МШУ (малозумящий усилитель) усиливает входной высокочастотный сигнал, квадратурный демодулятор преобразовывает высокочастотный сигнал в baseband-диапазон и выделяет I/Q, АЦП (аналого-цифровой преобразователь) оцифровывает baseband-сигналы. После этого сигнал поступает в устройство цифровой обработки сигналов. Синтезатор частоты генерирует высокочастотный сигнал, с частотой  $\omega_r$ .

Функция аппаратных средств заключается в преобразовании высокочастотного участка спектра в baseband-диапазон и представлении baseband-сигналов в цифровом виде для измерения значений средних энергий в каждом канале анализируемого диапазона частот.

### IV. СПОСОБЫ АНАЛИЗА

Существует два способа анализа – последовательный и параллельный. При

последовательном анализе (рис. 2), что характерно для собственного приемника радиостанции, средняя энергия каждого канала вычисляется последовательно. Частота гетеродина устанавливается в середину первого канала с полосой  $W_{ch2}$ . Высокочастотный участок спектра с помощью демодулятора переносится на нулевую ПЧ (промежуточная частота). Измеряется  $N$  временных отсчетов, которые ограничиваются фильтром основной селекции с шириной полосы равной ширине канала  $W_{ch2}$ . После этого временные отсчеты усредняются. Полученное значение есть средняя энергия первого канала из анализируемой полосы частот  $BW$ . Для вычисления средней энергии следующего канала из анализируемой полосы частот выполняется оперативная перестройка частоты гетеродина на величину ширины канала  $W_{ch2}$  и аналогичным образом вычисляется средняя энергия следующего канала из анализируемой полосы частот  $BW$ .

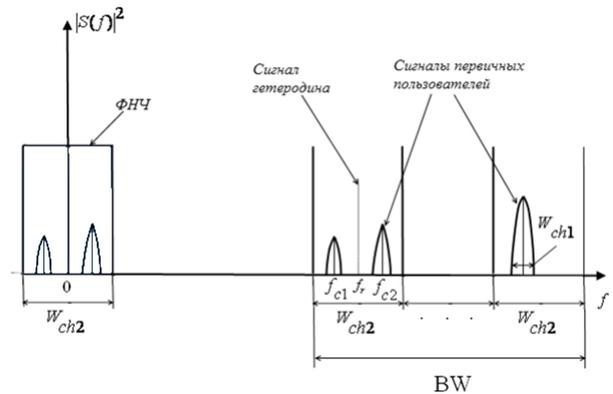


Рис. 2. Последовательный способ анализа

В результате анализа имеются значения средней энергии для каждого канала из анализируемой полосы частот  $BW$ . Важно отметить, что время измерения средней энергии одного канала не должно превышать время стационарности радиоканала.

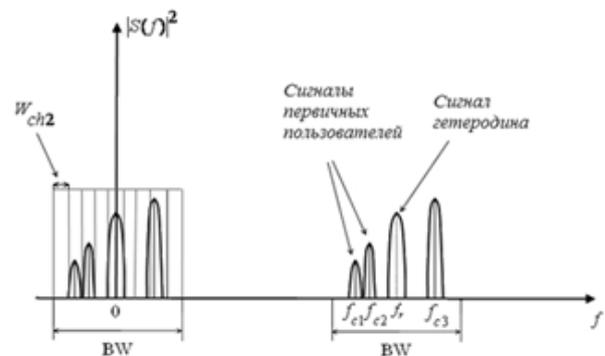


Рис. 3. Параллельный способ анализа

При параллельном анализе (рис. 3) частота гетеродина устанавливается в середину всего анализируемого диапазона частот  $BW$ . С помощью

демодулятора весь спектр частот  $BW$  переносится на нулевую ПЧ. Измеряется  $k$  групп по  $N$  отсчетов на канал, где  $k$  – количество каналов. По сигналу, состоящему из  $k*N$  временных отсчетов, выполняется БПФ (быстрое преобразование Фурье). Частотные отсчеты, попавшие в один и тот же канал  $W_{ch2}$ , линейно усредняются. Полученные значения представляют собой среднюю энергию в каждом канале анализируемого диапазона частот.

В результате анализа, как и в случае последовательного анализа, имеются значения средней энергии для каждого канала из анализируемой полосы частот  $BW$ . В случае параллельного анализа время измерения средних энергий всех каналов не должно превышать время стационарности радиоканала.

При использовании аппаратной базы собственного приемника радиостанции обычно можно использовать только последовательный способ анализа, который занимает больше времени по сравнению с параллельным анализом. Параллельный способ анализа можно применить в специализированном приемнике. Отличительной особенностью такого приемника является широкая полоса ВЧ тракта, поскольку преобразуется сразу весь анализируемый диапазон частот. При широкой полосе ВЧ тракта потребуются широкополосные элементы, высокоскоростные АЦП и т.п. Аппаратные затраты повлияют на характеристики приемника, например на параметр энергопотребления, при этом характеристики обнаружения повысятся, в частности увеличится скорость анализа.

#### V. АЛГОРИТМ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА

Детектор предназначен для принятия решения о состоянии канала – свободно или занято. Функциональная схема алгоритма работы детектора представлена на рис. 4.



Рис. 4. Функциональная схема детектора

Исходными данными для детектора служат baseband-сигналы  $I/Q$  квадратур. По  $I/Q$  сигналам, полученным с помощью приемника, вычисляется средняя энергия в каждом канале анализируемой полосы частот.

При последовательном анализе средняя энергия в каждом канале определяется в полосе частот, ограниченной фильтром основной селекции. При параллельном способе анализа частотные отсчеты, полученные после преобразования Фурье, попавшие в один канал, линейно усредняются, и полученное значение представляет собой среднюю энергию в канале. Величина средней энергии в канале, и при параллельном и при последовательном способе анализа, определяется нормированной суммой

квадратурных компонент демодулированного сигнала (1)

$$E_{ch} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (I_i^2 + Q_i^2) \quad (1)$$

где  $E_{ch}$  – средняя энергия в канале,  $N$  – количество отсчетов на канал,  $I/Q$  – квадратуры демодулированного сигнала.

После вычисления средней энергии в каждом канале формируется гистограмма энергии. Гистограмма средней энергии является основой для статистически достоверного определения свободных участков спектра, поскольку не зависит от типа сигналов и шумов. Гистограмма отражает текущую плотность распределения вероятности средней энергии в месте проведения анализа в данный момент времени. По полученной гистограмме энергии и по заданному значению вероятности ложной тревоги определяется пороговое значение. Вероятность ложной тревоги в случае обнаружения сигналов есть вероятность того, что канал, в котором нет сигнала, определяется как занятый. Далее принимается решение о состоянии каждого канала путем сравнения средней энергии в каждом канале и порогового значения. В случае, когда средняя энергия превышает пороговое значение, канал считается занятым. Когда средняя энергия не превышает пороговое значение, канал считается свободным.

#### VI. ГИСТОГРАММА ЭНЕРГИИ

Рассмотрим процесс формирования гистограммы энергии. Измеренные значения средней энергии  $E_{ch}$  во всех каналах расположены в диапазоне  $E_{min} \dots E_{max}$ . Для формирования гистограммы область возможных значений средней энергии в этом диапазоне разбивается на  $m$  интервалов усреднения. Оптимальное количество интервалов усреднения  $m$  оценивается следующим выражением (2)

$$m \approx \text{int} \left[ \sqrt{K_{ch}} \right] + 1 \quad (2)$$

где  $K_{ch}$  – количество каналов.

Аргумент гистограммы  $E_k$  представляет граничное значение энергии  $k$ -го интервала усреднения (3)

$$E_k = \frac{k * (E_{max} - E_{min})}{m} + E_{min} \quad (3)$$

где  $m$  – количество интервалов усреднения,  $E_{min}$  и  $E_{max}$  – минимальное и максимальное значение средней энергии,  $k = 0 \dots m$ .

Функция гистограммы  $p_k$  представляет нормированную плотность энергии. Дискретное значение плотности энергии  $h_{n,k}$  на каждом  $k$ -ом интервале усреднения определяется относительным

количеством значений средней энергии  $E_{ch}$ , находящихся в этом интервале усреднения (4)

$$P_k = \frac{1}{K_{ch}} \sum_{n=0}^{K_{ch}-1} h_{n,k}, \quad h_{n,k} = \begin{cases} 1 & \text{при } E_k < E_{ch\ n} \leq E_{k+1} \\ 0 & \text{остальных} \end{cases} \quad (4)$$

где  $K_{ch}$  – количество каналов,  $E_{ch\ n}$  – средняя энергия в  $n$ -ом канале,  $h_{n,k}$  – дискретное значение плотности энергии.

Для определения порогового значения до начала формирования гистограммы следует удалить из рассмотрения большие значения энергий. Механизм удаления сигналов с большими энергиями следующий. По всем значениям средней энергии находится среднее значение. После этого из рассмотрения удаляются сигналы, средняя энергия которых превышает среднее значение на 3 дБ. Затем проводится вторая итерация удаления сигналов таким же образом.

Статистика (1) для нормального шума имеет центральное распределение хи-квадрат. Для распределения хи-квадрат при значениях  $N=16$  или  $N=32$ , которые являются оптимальными, как установлено в ходе проведения исследований, все значения, которые превышают среднее значение на 3 дБ, составляют порядка 3-5% от общего числа значений. В случае если мощные детерминированные сигналы отсутствуют, потеря 3-5% значений не сильно повлияет на точность и информативность гистограммы. В свою очередь, если детерминированные сигналы присутствуют, то они удалятся из рассмотрения на первой или второй итерации. Величину 3 дБ можно изменять в зависимости от решаемых задач. Если предполагается наличие мощных детерминированных сигналов на первой итерации рационально изменить величину с 3 дБ до 6 дБ. Таким образом, уменьшится количество шумовых сигналов, которые удалятся из рассмотрения. В реальной жизни шумовое распределение не совпадает с распределением Гаусса, но это не влияет на качество отображения гистограммы. В общем случае всегда останется достаточное количество шумовых сигналов для точного определения порогового значения.

Как видно из рис. 5а (гистограмма по всем энергиям) в области малых значений энергии плотность энергии высокая, что соответствует большому количеству шумовых сигналов. В области больших энергий плотность энергии низкая, что соответствует малому количеству мощных детерминированных сигналов. При наличии мощных детерминированных сигналов все энергии, соответствующие шумовым сигналам, попадут в несколько (в пределе в один) начальных интервалов усреднения, и вычисление порогового значения по такой гистограмме будет способствовать низкой

вероятности правильного обнаружения (что повлечет за собой нарушение работы первичных пользователей). Гистограмма на рис. 5б, сформированная с ограничением энергии, представляет собой гистограмму шума, поскольку в основном состоит из энергий соответствующим шумовым сигналам.

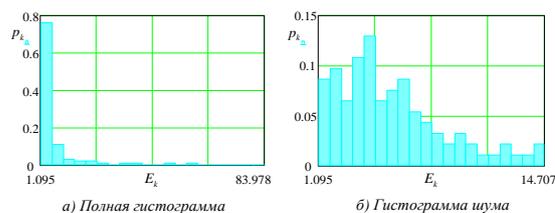


Рис. 5. Гистограмма энергии

По гистограмме шума и по заданному значению вероятности ложной тревоги вычисляется пороговое значение в соответствии с выражением (5)

$$p_{FA}(w_T) = 1 - \int_0^{w_T} p_k(w) dw \quad (5)$$

где  $p_k(w)$  – плотность распределения средней энергии шума,  $w_T$  – пороговое значение.

Решение о состоянии каждого канала (свободно или занято) принимается путем сравнения средней энергии каждого канала и порогового значения. Если средняя энергия канала превышает пороговое значение, канал считается занятым, иначе канал считается свободным.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены технические требования, которые предъявляются к детектору свободных участков радиочастотного спектра. Рассмотрены различные варианты аппаратных средств и способов анализа. Приведен алгоритм работы детектора. Подробно рассмотрен процесс формирования гистограммы энергии и алгоритм определения порогового значения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mahmood A.K. Abdulsattar, Zahir A. Hussein - Energy Detector with Baseband Sampling for Cognitive Radio: Real-Time Implementation // Wireless Engineering and Technology, 2012, 3, 229-239.
- [2] Галкин В.А. Анализатор состояния эфира в радиостанциях адаптивного радио // Радиотехника. – 2016. - №9. – С.146-155.
- [3] Отчет МСЭ-R SM.2256 (09/2012) Измерения и оценка занятости спектра.
- [4] M.A.Mchenry NSF spectrum occupancy measurement project summary. Shared Spectrum Company Report, Aug.2005.

# Detector of Free Parts of Radio Frequency Spectrum

V.A. Zhmylev

MIET, Moscow, vz-75@yandex.ru

**Abstract** — This article presents hardware and software, with the help of which it is possible to establish communication sessions on temporarily free parts of the radio frequency spectrum. The efficiency of radio frequency spectrum can be improved by using temporarily free parts of the spectrum. Using temporarily free parts of the spectrum also allows to increase noise immunity, for example, working in FHSS (frequency-hopping spread spectrum) mode, etc. Secondary users' activity should not disrupt the primary users. For the organization of secondary communication networks it is necessary to implement the detector of free parts of radio frequency spectrum. The decision on a condition of the channel is made by comparison of a threshold and average energy of the channel. Basis for statistically reliable determination of threshold value is the histogram of energy. The histogram represents experimentally measured density of distribution of average energy in the channel for all channels in all range of frequencies. In this article requirements for the detector are presented. There are many variants of the hardware. Methods of analysis are considered. The algorithm of forming a histogram of average energy and the algorithm for determining the threshold value are described in detail.

**Keywords** — software defined radio, cognitive radio, secondary communication networks, concept of secondary users, energy detector, radio band analyzer.

**Keywords** — software defined radio, cognitive radio, secondary communication networks, concept of secondary users, energy detector, analyzer of ether.

## REFERENCES

- [1] Mahmood A.K. Abdulsattar, Zahir A. Hussein - Energy Detector with Baseband Sampling for Cognitive Radio: Real-Time Implementation // Wireless Engineering and Technology, 2012, 3, 229-239.
- [2] Galkin V.A. Analizator sostojanija jefira v radiostancijah adaptivnogo radio (Ether of analyzer in radio stations of cognitive radio) // Radiotehnika. – 2016. - №9. – C.146-155.
- [3] Otchet MSE -R SM.2256 (09/2012) Izmerenija i ocenka zanjatosti spektra (Measurements and assessment of employment of a range).
- [4] M.A.Mchenry NSF spectrum occupancy measurement project summary. Shared Spectrum Company Report, Aug.2005.