

Методы управления радиочастотным спектром в когнитивных радиосетях

Евгений Викторович Глухов

Доцент Университета общественной безопасности Республики Узбекистан

ABSTRACT

В данной статье рассматриваются способы обнаружения сигнала при сканировании спектра. Раскрываются достоинства и недостатки методов обнаружения сигнала с помощью согласованного фильтра, обнаружения энергии, обнаружение с помощью вейвлет-преобразования, обнаружения особенностей сигнала и выявление циклической стационарности. Приводится сравнительный анализ методов сканирования радиочастотного спектра.

ARTICLE INFO

Received: 6th October 2022

Revised: 6th November 2022

Accepted: 11th December 2022

KEY WORDS:

когнитивная радиосеть, пользователь, пилот-сигнал, спектр, сигнал/шум, преобразование Фурье, LTE, OFDM.

Methods of radio frequency spectrum management in cognitive radio networks

Abstract: This article discusses ways to detect a signal when scanning the spectrum. The advantages and disadvantages of signal detection methods using a matched filter, energy detection, wavelet transform detection, signal feature detection and cyclic stationarity detection are disclosed. A comparative analysis of methods for scanning the radio frequency spectrum is given.

Key words: cognitive radio network, user, pilot signal, spectrum, signal/noise, fourier transform, LTE, OFDM.

Когнитивные радиосети (КРС) - это радиосистема, использующая технологию, позволяющую этой системе получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об установившихся правилах и о своем внутреннем состоянии; динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы согласно полученным знаниям для достижения predetermined целей; и учиться на основе полученных результатов. Данные условия не возможны без осуществления сканирования спектра и делают его важным требованием для реализации работы этих систем. Сканирование спектра КРС позволяет пользователям адаптироваться к окружающей среде путем выявления «мертвых зон» спектра, не создавая помех в

первичной сети. Это может быть достигнуто умением выявить слабые сигналы первичных пользователей в широком диапазоне спектра, с помощью широкополосной чувствительности в реальном времени [3].

В когнитивных радиосетях первичными считаются те пользователи, которые имеют высший приоритет или лицензию на право использования определенных частей спектра. Сканирование спектра является ключевым элементом КРС, так как оно позволяет адаптироваться к окружающей среде путем выявления «мертвых зон» спектра. Наиболее эффективным способом выявления доступности определенных частей спектра является обнаружение первичных пользователей, которые могут передавать данные в этих частях. Тем не менее, для КРС довольно сложно получить прямой мониторинг канала между первичным передатчиком и приемником. Таким образом, большинство существующих алгоритмов сканирования спектра направлены на выявление передачи первичного сигнала $x(t)$ на основе местных наблюдений КРС.

Для повышения точности обнаружения сигнала при сканировании спектра может быть использовано много методов обнаружения. Основными являются: обнаружение сигнала с помощью согласованного фильтра, обнаружение энергии сигнала и выявление особенностей сигнала [4].

Обнаружение сигнала с помощью согласованного фильтра. Если вторичный пользователь может получить предварительную информацию о сигнале первичного пользователя, оптимальным методом обнаружения сигнала является согласованный фильтр, так как он максимизирует отношение сигнал-шум (С/Ш) принятого сигнала. Согласованный фильтр работает путем сопоставления известного сигнала, или шаблона, с неизвестным сигналом для выявления присутствия шаблона в неизвестном сигнале. Это эквивалентно свертке неизвестного сигнала с обратной во времени версией шаблона.

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[n-k]x[k]$$

- где x -входной сигнал, h -импульсная характеристика согласованного фильтра, которая соответствует эталонному сигналу для максимизации отношения сигнал-шум.

Основным преимуществом согласованного фильтра является то, что он требует меньше времени для достижения высокого коэффициента усиления обработки за счет когерентного детектирования [3]. Существенный недостаток согласованного фильтра-потребность в дополнительном чувствительном приемнике для каждого типа сигнала основного пользователя. А также, использование согласованного фильтра может быть строго ограничено, так как информация о сигнале первичного пользователя не всегда доступна системе КР. Использование такого подхода все же возможно, даже если мы имеем частичную информацию о сигнале первичного пользователя, например символы пилот-сигнала или преамбул, которые могут быть использованы для когерентного детектирования [4].

Обнаружение энергии. Если КР приемник не может собрать достаточно информации о сигнале первичного пользователя, оптимальным детектором для такого случая является метод обнаружения энергии [5]. В этом подходе, измеряется спектральная энергия в канале или показатель мощности принимаемого сигнала, для определения, есть ли канал в режиме ожидания или нет. Сначала, входной сигнал фильтруют с помощью полосового фильтра для выбора диапазона частот, представляющей интерес. Далее происходит поднесение к квадрату и интегрирование выходного сигнала в интервале наблюдения. Результат интегрирования сравнивают с заданным пороговым значением, на основе чего можно сделать вывод о наличии или отсутствии сигнала первичного пользователя. При спектральном анализе в цифровой области, используют методы основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ). В частности, принятый сигнал $x(t)$, выбранная часть из временного окна, сначала пропускают через устройство БПФ, чтобы получить спектр мощности $|X(f)|^2$. Тогда локализуется пик в спектре мощности. После обрезки окна спектра с пиком, получим $|Y(f)|^2$.

Обнаружение энергии сигнала от первичного пользователя осуществляется посредством удовлетворения условий одной из двух следующих гипотез:

$$\begin{aligned}H_0 : Y[n] &= W[n] \\ H_1 : Y[n] &= X[n] + W[n] \\ n &= 1, \dots, N\end{aligned}$$

- где N – интервал наблюдения, H_0 – гипотеза об отсутствии сигнала от первичного пользователя, H_1 – гипотеза о присутствии сигнала от первичного пользователя, $W[n]$ представляет собой шум окружающей среды, $X[n]$ – представляет собой сигнал от первичного пользователя.

Производительность детектора энергии сигнала характеризуется двумя параметрами: вероятностью не обнаружения сигнала (Q_m) и вероятностью ложного обнаружения сигнала (Q_f), которые определяются как:

$$\begin{aligned}Q_f &= \Pr ob\{Decide(H_1|H_0)\} \\ Q_m &= \Pr ob\{Decide(H_0|H_1)\}\end{aligned}$$

Хотя метод обнаружения энергии может быть реализован без каких-либо предварительных знаний о сигнале первичного пользователя, он все еще имеет некоторые недостатки. Первая проблема в том, что он плохо работает в условиях низкого отношения сигнал-шум. Потому, что дисперсия шума точно не известна при низком отношении сигнал-шум, и именно неопределенность шума может привести к тому, что метод обнаружения энергии станет неэффективным [1]. Другой актуальной проблемой является неспособность различать помехи от других вторичных пользователей, которые вместе используют тот же канал с первичным пользователем [1]. Кроме того, порог, который используется в определении наличия энергии зависит от дисперсии шума, а также небольшие ошибки оценки мощности шума могут привести к начительной потере производительности.

Выявление циклической стационарности. Относится к методам обнаружения особенностей сигнала. Является более устойчивым к неопределенности шумов, чем метод обнаружения энергии. Если сигнал первичного пользователя имеет свойство циклической стационарности, он может быть обнаружен при очень низких значениях отношения сигнал/шум, используя информацию владельца в принятом сигнале (особенность циклической стационарности). Сигнал называется циклически стационарным (в широком смысле), если его автокорреляционная характеристика является периодической функцией во времени с некоторым периодом [2]. Обнаружение циклической стационарности может быть выполнено следующим образом.

1) Первоначально циклическую автокорреляционную характеристику (АКХ) наблюдаемого сигнала $x(t)$ рассчитывают как:

$$R_x^a(\tau) = E[x(n + \tau) \cdot x^*(n - \tau) \cdot e^{-j\pi f n}]$$

- где $E[x]$ означает операцию статистического ожидания и a - это циклическая частотная.

2) Далее получаем спектральную корреляционную функцию (СКФ) $S(f, a)$ из дискретного преобразования Фурье АКХ. СКФ также называют спектральной циклическостью, которая представляет собой двумерную функцию в зависимость от частоты f и циклической частоты a .

$$S(f, a) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_x^a(\tau) \cdot e^{-j2\pi f \tau}$$

3) обнаружение завершается путем поиска уникальной циклической частоты, соответствующего возрасту в плоскости СКФ.

Этот подход к обнаружению устойчив к случайному шуму и помехам от других модулированных сигналов, потому что шум имеет пик в плоскости СКФ только при нулевой циклической частоте и различные модулированные сигналы имеют различные уникальные циклические частоты. Экспериментальные результаты показывают превосходную производительность обнаружения даже в области с очень низким отношением сигнал/шум [2].

Такой подход может отличить сигнал первичного пользователя среди сигналов других пользователей КР на той же полосе частот при условии, что циклические особенности первичного пользователя и сигналов КР отличаются друг от друга, что обычно имеет место, потому что различные беспроводные системы обычно используют различные структуры и параметры сигнала. Воспользовавшись разными характеристиками циклической стационарности сигналов первичного и вторичного пользователей, стратегия поиска информации о распределении каналов предложена в системе спектрального объединения [1], где первичная сеть представляет собой систему LTE, а КР сеть является системой беспроводной сети на основе OFDM. Тем не менее, выявление циклической стационарности является более сложным для реализации, чем обнаружение энергии, и требует предварительного знания формата модуляции сигнала первичного пользователя.

Обнаружение, с помощью вейвлет-преобразования. Это механизм многомасштабного анализа, где входной сигнал разлагается на различные частотные компоненты, а затем каждый компонент изучается с определением совпадения в его масштабе. В отличие от преобразования Фурье, используя синус и косинус в качестве основных функций, вейвлет-преобразование использует вейвлеты нестандартной формы как основные функции, что может предложить более совершенные инструменты для выявления резких изменений и определенных местных особенностей [4]. Для описания сигнала в широкополосных каналах, вейвлет-подход имеет преимущества с точки зрения стоимости реализации и гибкости в адаптации к динамическим изменениям спектра, в отличие от обычного использования нескольких узкополосных фильтров. Для того, чтобы идентифицировать местоположение свободных полос частот, весь широкополосный диапазон моделируется как последовательность частотных поддиапазонов, где спектральная характеристика является гладкой в пределах каждого поддиапазона, но резко меняется на границе двух соседних поддиапазонов. При использовании вейвлет-преобразования особенности спектральной плотности мощности $S(f)$ наблюдаемого сигнала $x(t)$, могут быть расположены таким образом, что свободную полосу частот легко можно будет найти. Одна из важнейших задач вейвлет-подхода является реализация на практике высокочастотной дискретизации для характеристики широкой полосы частот.

Обнаружение ковариации. Учитывая, что статистические ковариационные матрицы (или автокорреляция) сигнала и шума, как правило, отличаются, поэтому были предложены методы обнаружения сигнала основанных на выявлении ковариации [1]. Наблюдая за тем, равны ли элементы вне главной диагонали ковариационной матрицы принятого сигнала нулю, можно признать, что первичный сигнал пользователя отсутствует и наоборот, когда он присутствует. Разработаны следующие два метода обнаружения: выявление ковариации абсолютного значения и выявление ковариационной нормы Фробениуса.

Таблица1.

Сравнительный анализ методов сканирования радиочастотного спектра.

	Преимущества	Недостатки
Обнаружение энергии	- простота реализации - нет потребности в дополнительной информации о сигнале	- эффективность сканирования зависит от величины мощности шума - долгое время сканирования - нельзя использовать для детектирования широкополосных сигналов
Согласованный фильтр	- короткое время сканирования	- требует информацию о сигнале - требует отдельный приемник для

	- оптимальный детектор сигнала в Гауссовском белом шуме	каждого типа сигнала
Выявление особенностей сигнала	- устойчивый к неопределенности шума - высокая эффективность при низком значении сигнал/шум	- высокая сложность расчета - длительное время сканирования

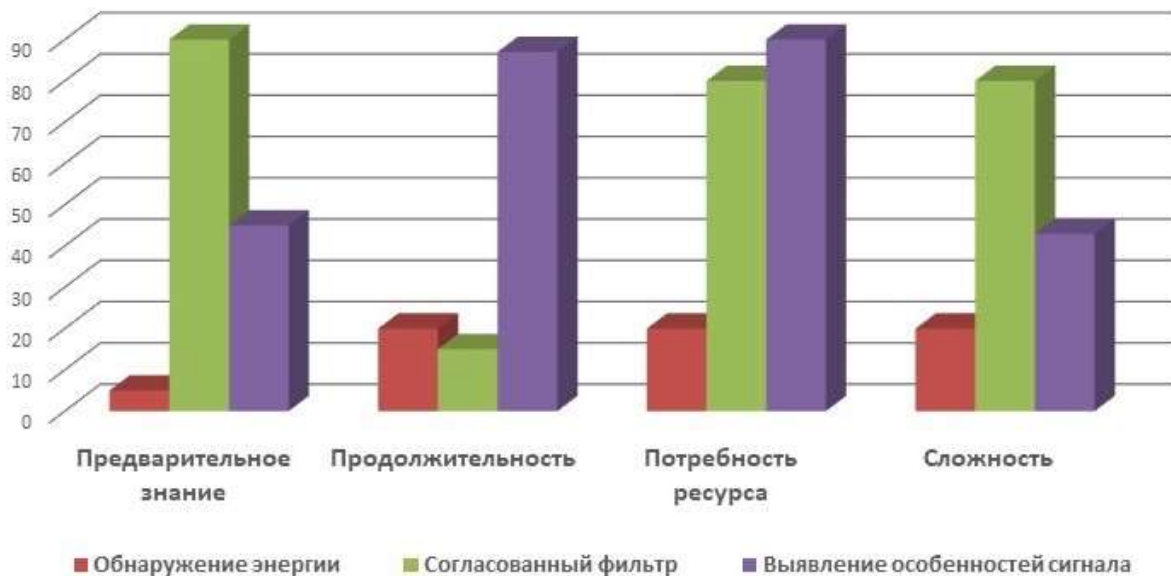


Рис. 2. Относительное сравнение методов сканирования радиочастотного спектра

Подводя итог можно отметить, что эти методы могут быть использованы для выявления различных сигналов без предварительного знания самого сигнала, частотного канала и мощности шума. Применяя спектральное расписание ковариационной матрицы, далее существует два метода обнаружения, называемых обнаружение максимума минимального собственного значения матрицы и выявление максимального собственного значения матрицы. Суть методов собственного обнаружения заключается в значительной разнице собственного значения полученной ковариационной матрицы сигнала, когда присутствует сигнал основного пользователя и когда нет.

Литература

1. Янишин В.Б. Модели и алгоритмы управления радиочастотным спектром в когнитивных радиосетях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Национальный университет «Львовская Политехника», Львов 2018. – 132с.
2. Ролич М. Л. Методы обнаружения первичных пользователей в когнитивных радиосетях // Молодой ученый. – 2015. – №20. – С. 70-73.
3. Song Y. Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks / Y.Song, J. Xie // DOI C Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
4. Бузов А. Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебное пособие / А.Л. Бузов // Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. — М.: Эко-Трендз, 2006. — С.376.
5. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, Терентьев С.В., А.Б. Юрчук // М.: Эко-Трендз, 2010. – С.284.