

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 654.16:621.391.82

Поповский В. В.¹, Коляденко А. В.²

¹Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

²Аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Актуальность. С появлением сетей мобильной связи сигнально-помеховая обстановка стала резко усложняться. Все возрастающее количество радиоэлектронных средств различного назначения приводят к образованию множественного характера электромагнитных взаимодействий между ними. Одновременно с этим еще важнее становится дефицит частотного ресурса, обостряется проблема электромагнитной совместимости. Найти пути решения данной проблемы можно, используя когнитивное распределение частотного ресурса с повторным использованием частот. Таким образом, оптимизация распределения частотного ресурса в когнитивных радиосетях и разработка алгоритма распределения частотного ресурса с повторным использованием частот является актуальной научной задачей.

Цель. Целью исследования является обеспечение электромагнитной совместимости при когнитивном распределении ресурсов в сети мобильной связи.

Методы исследований базируются на основных положениях радиофизики, теории электросвязи, системного анализа, математической статистики, теории вероятностей, теории оптимизации, математического и имитационного моделирования.

Результаты. Ситуацию и самую электромагнитную обстановку в сетях мобильной связи сильно осложняет тот факт, что в эту обстановку вносятся различные часто случайные факторы, носящие трудно прогнозируемый характер. В этих условиях рассчитать заранее электромагнитную обстановку и решить задачу электромагнитной совместимости с достаточной точностью не всегда удается, а часто просто невозможно из-за априорной неопределенности. Задачу электромагнитной совместимости для сетей мобильной связи необходимо решать на стадии ее функционирования в реальном масштабе времени. Предложен алгоритм решения задачи оптимизации распределения частотного ресурса для сетей мобильной связи. В основе алгоритма лежит метод локальной оптимизации – один из приближенных методов дискретного программирования. В данном случае условием локальной оптимальности является то, что рабочая частота, которая присваивается очередной абонентской станции должна быть близкой к присвоенной на предыдущем шаге частоте, но при этом должны быть выполнены требования электромагнитной совместимости.

Выводы. Впервые разработан метод обеспечения электромагнитной совместимости при распределении частотного ресурса в сети мобильной связи, который состоит из алгоритма с повторным использованием частот. Использование данного метода позволяет сократить полосу частот в 2–3 раза.

Ключевые слова: Когнитивная сеть, первичный пользователь, вторичный пользователь, процедура обнаружения сигнала, критерий Вальда.

НОМЕНКЛАТУРА

КР – когнитивное радио;
ЛТ – ложная тревога;
ОП – отношение правдоподобия;
ОСШ – отношение сигнал/шум;
ПЦ – пропуск цели;
 h – пороговый уровень, определяемый заданной вероятностью ложной тревоги;
 H_0 – гипотеза: первичный пользователь отсутствует;

H_1 – гипотеза: первичный пользователь работает со спектром;
 k – шаг измерения;
 m – математическое ожидание шума;
 m_s – математическое ожидание аддитивной смеси сигнала и шума;
 $p(0)$ – априорная вероятность отсутствия сигнала
 $s(t)$;

$p(s)$ – априорная вероятность передачи сигнала $s(t)$;

$p(x)$ – априорная плотность вероятности сигнала $x(t)$;

$p(x|0)$ – априорная условная плотность вероятности входного сигнала при отсутствии сигнала от первичного пользователя;

$p(x|s)$ – априорная условная плотность вероятности входного сигнала при наличии сигнала от первичного пользователя;

$p(0|x)$ – апостериорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$;

$p(s|x)$ – апостериорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$;

$P_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки;

$s(t)$ – сигнал первичного пользователя;

$x(t)$ – сигнал, принимаемый пользователем КР;

Z_* – нижний порог;

Z^* – верхний порог;

z_i – текущее значение решающей статистики на i -м шаге;

Z_i – накопленные значения ОП на i -м шаге;

α – вероятность ложной тревоги;

β – вероятность пропуска цели;

$v(t)$ – аддитивный белый гауссов шум;

σ^2 – дисперсия шума.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень востребованности и дефицитность радиочастотного ресурса определяют актуальность проработки различных подходов и технологических решений, направленных на повышение эффективности его использования [1, 2]. В этой связи заслуживают внимания работы, связанные с развитием технологий когнитивного радио (КР), основанные на использовании временно свободных участков спектра.

Главная задача когнитивного радио состоит в том, что вторичный пользователь должен обнаружить первичного пользователя и быстро освободить полосу частот [2–4]. Спектр классифицирован на три типа: черные пространства, серые пространства и пробелы. Черные пространства заняты сигналами от первичных пользователей высокой мощности и вторичные пользователи должны избегать этих полос частот. Серые пространства частично занимают помехи с невысокой мощностью, но они могут использоваться вторично. Свободные пробелы содержат помехи, которые состоят из естественных и искусственных форм шума: теплового шума, перекрестных помех и импульсного шума. Пробелы могут использоваться вторичными пользователями [5].

Реализуемость КР на практике основывается на принципах самообучения, на получении информации об электромагнитной и географической обстановке на основе оперативного априорного и апостериорного ана-

лиза (мониторинга) загруженности радиочастотного спектра, определения свободных участков спектра с целью их использования когнитивными системами на вторичной основе [6].

Целью данной работы являлась разработка метода обнаружения сигналов первичных пользователей для использования свободных полос частот в когнитивных радиосетях на вторичной основе.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сканирование спектра используется для обнаружения присутствия или отсутствия сигналов первичных (лицензируемых) пользователей в радиосреде, что определяет возможность доступа к среде вторичных (не лицензируемых) пользователей [7].

Уравнение наблюдения за спектром представляет собой значение измеренного обнаруживаемого сигнала $s(t)$ на фоне шума $v(t)$:

$$x(t) = s(t) + v(t).$$

Сигнал $x(t)$ является сигналом, принимаемым пользователем КР, $s(t)$ – передаваемый сигнал от первичного пользователя, $v(t)$ – аддитивный белый гауссов шум.

Стратегия функционирования системы вторичного пользователя состоит в том, что при появлении сигнала $s(t)$ возникает необходимость осуществить управление на смену полосы частот. Данная задача обнаружения сигнала сводится к проверке статистических гипотез:

H_0 : $x(t) = v(t)$ – первичный пользователь отсутствует,

H_1 : $x(t) = s(t) + v(t)$ – первичный пользователь работает со спектром.

Условная плотность вероятности входного сигнала при отсутствии сигнала от первичного пользователя (гипотеза H_0) определяется выражением:

$$p(x|0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где m – математическое ожидание шума, σ^2 – дисперсия.

Условная плотность вероятности входного сигнала при наличии сигнала от первичного пользователя (гипотеза H_1) определяется выражением:

$$p(x|s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m_s)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где m_s – математическое ожидание аддитивной смеси сигнала и шума.

Иными словами: по наблюдению за случайным сигналом $x(t)$ необходимо принять детерминированное решение на разрешение или запрещение использования полосы частот вторичным пользователем.

Из-за случайного характера сигнала $s(t)$ и шума $v(t)$ возможны ошибки. Такие ошибки бывают двух родов. Ошибка первого рода – это принятие гипотезы H_1 , в то

время как следовало бы принять H_0 (ложная тревога – ЛТ). Ошибка второго рода – принятие гипотезы H_0 , в то время как следовало бы принять H_1 (пропуск цели – ПЦ).

В теории оптимального обнаружения сигналов применяются следующие критерии: критерий идеального наблюдателя; критерий минимального среднего риска; критерий Неймана-Пирсона; критерий Вальда. Выбор критерия зависит от использования его в конкретной системе. Так в системах электросвязи чаще используется критерий идеального наблюдателя, в радиолокации – критерий Неймана-Пирсона. Кроме того, первые три критерия основываются на фиксированном объеме наблюдаемой выборки. Недостатком критерия Вальда является неопределенность с числом наблюдений.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Критерий идеального наблюдателя обеспечивается решающей схемой, построенной по правилу максимума апостериорной вероятности – решение, что сигнал $s(t)$ присутствует, принимается в том случае, если выполняется неравенство [1, 4, 7]:

$$p(s|x) > p(0|x), \quad (1)$$

где $p(s|x)$ – апостериорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$, $p(0|x)$ – апостериорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$.

Апостериорная вероятность сигнала $s(t)$ определяется согласно формуле Байеса [8]:

$$p(s|x) = \frac{p(s)p(x|s)}{p(x)}, \quad (2)$$

где $p(x|s)$ – априорная условная плотность вероятности – функция правдоподобия гипотезы, что сигнал присутствует, $p(x)$ – априорная плотность вероятности сигнала $x(t)$, $p(s)$ – априорная вероятность передачи сигнала $s(t)$.

Можно записать правило решения по критерию идеального наблюдателя в следующей форме:

$$p(s)p(x|s) > p(0)p(x|0), \quad (3)$$

где $p(0)$ – априорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$, $p(x|0)$ – априорная условная плотность вероятности – функция правдоподобия гипотезы, что сигнал отсутствует.

Правило (3) можно записать иначе [9]. Решение о том, что сигнал $s(t)$ присутствует должно приниматься, если выполняется неравенство:

$$\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > \frac{p(0)}{p(s)}. \quad (4)$$

Отношение в левой части этого неравенства называется отношением правдоподобия (ОП) двух гипотез: о том, что передается сигнал $s(t)$, и о том, что он отсутствует.

В случае, когда вероятности наличия сигнала $s(t)$ и его отсутствия равны, т. е.

$$p(s) = p(0), \quad (5)$$

правило (4) упрощается:

$$\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > 1. \quad (6)$$

Различные ошибки приводят к различным последствиям. Для системы КР опаснее не обнаружить сигнал, нежели объявить «ложную тревогу», когда в действительности первичный пользователь пассивен. Учет последствий ошибок различного рода приводит к обобщению критерия идеального наблюдателя, известного под названием критерия минимального среднего риска. В общем же случае в байесовском приемнике чаще будут возникать ошибки, связанные с малыми потерями, и реже – с большими потерями.

Ситуация, в которой практически невозможно определить априорную вероятность наличия или отсутствия сигнала первичного пользователя, а последствия ошибок разного рода неодинаковы, типична для КР [5, 6]. Как правило, априорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ заранее не известна. Последствия двух родов ошибок – ложной тревоги и пропуска цели – неравноценны [7]. В этой ситуации чаще всего пользуются критерием Неймана-Пирсона. Суть его заключается в том, что решающая схема считается оптимальной, если при заданной вероятности ложной тревоги $\alpha = P(H_1 | H_0)$ обеспечивается минимальная вероятность пропуска цели $\beta = P(H_0 | H_1)$ [7], что достигается при выполнении неравенства:

$$\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > h,$$

где h – пороговый уровень, определяемый заданной вероятностью ложной тревоги.

Приведенные выше подходы основаны на предположении, что объем наблюдаемой выборки фиксирован. Однако, если стоимость или время, затрачиваемое на получение одной оценки значительны, то может оказаться выгодным оставить вопрос о числе измерений открытым и считать число измерений достаточным, лишь тогда, когда наблюдатель убедится в правильности одной из гипотез. Соответствующая процедура, позволяющая определить необходимое число наблюдений, была разработана Вальдом и называется последовательным наблюдателем [8, 9]. Поэтому в данной работе в качестве критерия выбран критерий Вальда.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При последовательном наблюдателе принимается одно из трех решений:

- 1) принять решение, что первичный пользователь пассивен;
- 2) принять решение, что первичный пользователь активен;
- 3) произвести следующее измерение.

На любой стадии испытания, принимаемые решения будут зависеть от результатов уже выполненных измерений. Методика проведения последовательного наблюдения состоит в следующем. На основании каких-либо соображений выбираются приемлемые значения ошибок 1-го α и второго рода β . По результатам первых k наблюдений формируется ОП $\frac{p(x|s)}{p(x|0)}$. Полученное значение

сравнивается с двумя порогами Z_* и Z^* . Если $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} \geq Z^*$ принимается гипотеза, что первичный

пользователь активен (гипотеза H_1), если $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} \leq Z_*$

принимается гипотеза, что первичный пользователь пас-

сивен (гипотеза H_0), если $Z_* < \frac{p(x|s)}{p(x|0)} < Z^*$, то произво-

дится следующее $k+1$ -е измерение, определяется новое ОП и повторяется процедура сравнения с порогами. Процесс продолжается, пока не будет принята одна из гипотез [10].

Пороги Z_* и Z^* должны выбираться так, чтобы веро-

ятность того, что $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > Z^*$, когда справедлива гипоте-

за H_0 была равна α , а вероятность того, что при гипоте-

зе H_1 величина $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} < Z_*$ была равна β . Классичес-

кий последовательный подход решения данной задачи

предполагает вычисление логарифма ОП $\ln \frac{p(x|s)}{p(x|0)}$ на

каждом шаге, с последующим сравнением его с двумя порогами [8]:

$$Z_* = \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \text{ и } Z^* = \ln \frac{1-\beta}{\alpha}.$$

Основное преимущество двухпорогового последовательного решения по сравнению с однопороговым заключается в том, что среднее число измерений (время наблюдения) существенно уменьшается [8, 9].

Недостатком последовательного наблюдателя является неопределенность с числом наблюдений. В случаях, когда среднее число наблюдений становится недопустимо большим необходимо искусственно прерывать процедуру испытаний и принимать результирующее решение, осуществляя выбор между двумя альтернативами. Данную процедуру называют усечением [8].

В работе [11] рассмотрен способ решения задачи радиолокационного обнаружения случайного одиночного сигнала известной формы на основе модифицированного последовательного алгоритма Вальда, позволя-

ющего получить автоматически усекаемую процедуру обнаружения. Для КР форма сигнала первичного пользователя априори неизвестна. Проанализировав данный алгоритм, авторы статьи пришли к выводу, что для обнаружения параметры сигнала как таковые не требуются (не требуется знания о виде модуляции). Для принятия решения в когнитивной радиосети предложен данный модифицированный последовательный подход к обнаружению. С этой целью рассчитываются пороги обнаружения на каждом шаге процедуры, исходя из обеспечения постоянства ошибок обнаружения: $\alpha = \text{const}$, $\beta = \text{const}$. При использовании модифицированного последовательного критерия рассматриваемая задача обнаружения предполагает следующие действия.

Шаг 1. На вход приемника поступает случайный отсчет принятого сигнала $x(t_1)$, с использованием которого формируется значение логарифма ОП [9, 11]:

$$Z_1 = z_1 = \frac{1}{\sigma^2} \left(x(t_1)(m_s - m) - \frac{1}{2}(m_s^2 - m^2) \right),$$

где z_1 – значение решающей статистики для выборки на 1-м шаге; Z_1 – накопленное значение статистики на 1-м шаге.

Исходя из заданных значений вероятностей ошибок α и β , рассчитываются пороги обнаружения: Z_1^* и Z_1^* .

При этом если выполняется условие $Z_1 \geq Z_1^*$, то прини-

мается гипотеза H_1 . Если выполняется условие $Z_1 \leq Z_1^*$,

то принимается гипотеза H_0 . Если $Z_1^* < Z_1 < Z_1^*$, то на-

блюдение продолжается и осуществляется переход к

шагу 2. В работе [11] предлагается вместо сравнения ре-

шающей статистики Z_1 с порогами осуществлять срав-

нение величины $x(t_1)$ с модифицированными порога-

ми обнаружения. Такой подход требует дополнительных

вычислений (взятие логарифма от порогов Z_1^* и Z_1^*),

что в свою очередь увеличит время на обнаружение

сигнала и принятие решения.

Шаг 2. На вход приемника поступает выборка

$x(t_1) x(t_2)$. Формируемое значение логарифма ОП при-

нимает вид:

$$Z_2 = z_1 + z_2 = \frac{(m_s - m)}{\sigma^2} (x(t_1) + x(t_2)) - (m_s + m).$$

Значения порогов обнаружения Z_2^* и Z_2^* на 2-м шаге

процедуры, определяются исходя из условия обеспече-

ния фиксированных значений α и β . При этом если

выполняется условие $Z_2 \geq Z_2^*$, то принимается гипотеза

H_1 . Если выполняется условие $Z_2 \leq Z_2^*$, то принима-

ется гипотеза H_0 . Если $Z_2^* < Z_2 < Z_2^*$, то наблюдение про-

должается и осуществляется переход к следующим ите-

рациям процедуры.

Шаг k . На вход приемника поступает выборка $x(t_1 t_2 \dots t_k) = x(t_1) + x(t_2) + \dots + x(t_k)$. Формируемое значение логарифма ОП принимает вид:

$$Z_k = Z_{k-1} + z_k = \frac{(m_s - m)}{\sigma^2} \left(\sum_{i=1}^k x(t_i) - \frac{k}{2} (m_s + m) \right).$$

Исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β , определяются значения порогов обнаружения Z_k^* и Z_k^* на k -м шаге процедуры.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Реализация модифицированного двухпорогового последовательного наблюдателя в рамках обнаружения сигналов в когнитивной сети представлена в виде обобщенной схемы (рис. 1).

Рассматривая задачу обнаружения случайных гауссовских отсчетов, наблюдаемых на фоне некоррелированного шума, будем полагать, что на вход приемника последовательно поступают случайные отсчеты принятого сигнала $x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots$. В общем случае их количество определяется ходом процедуры обнаружения сигнала и является случайным.

После 1-го шага обработки процедуры обнаружения на выходе устройства оптимальной обработки формируется случайная величина $z_1 = \ln \frac{p(x(t_1)|s)}{p(x(t_1)|0)}$ – текущее

значение решающей статистики пропорциональное логарифму ОП. На выходе запоминающего устройства формируется накопленное значение статистики $Z_1 = z_1$. Далее рассчитываются модифицированные порогами на 1-м шаге наблюдения Z_1^* и Z_1^* .

Пороговое устройство принимает решение: принять окончательное решение с остановкой процесса наблюдения или произвести следующее наблюдение. В случае продолжения наблюдений с модифицированными порогами сравниваются накопленные значения ОП, рас-

считываемые на последующих шагах наблюдения Z_2, Z_3, Z_k . При этом пороги определяются на каждом шаге Z_2^* и Z_2^* ... Z_k^* и Z_k^* . Проверка продолжается до пересечения решающей статистикой одного из останавливающих порогов обнаружения. В этом случае импульсом «сброс» обнуляется запоминающее устройство.

Для анализа эффективности предложенного метода были программно реализованы в среде Matlab классический метод Вальда и автоматическая процедура обнаружения с усечением.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ эффективности классической процедуры Вальда. На рис. 2 показана пошаговая работа классической процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-3}$. При этом решающие границы представляют собой две параллельные прямые, расстояние между которыми всегда постоянно. В данном случае сигнал обнаружен при условии наличия сигнала.

Расстояние между этими границами (ширина области неопределенности) определяется заданным уровнем ошибок. С повышением точности (уменьшением α и β) область неопределенности увеличивается, а, следовательно, и среднее число наблюдений также увеличивается. Например, при $\alpha = \beta = 10^{-4}$ имеем $Z^* = 9,21$, $Z_* = -9,21$, а при $\alpha = \beta = 10^{-5}$ получаем $Z^* = 11,513$, $Z_* = -11,513$. Поскольку величины ошибок α и β , которые при обнаружении сигнала выбираются весьма малыми, очевидно, что отдельные испытания могут длиться достаточно долго, а значит, и среднее число наблюдений становится недопустимо большим [5] (рис. 3).

На рис. 3 показана пошаговая работа процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-5}$. В данном случае сигнал обнаружен при условии наличия сигнала (правильное обнаружение). На рис. 4 показана пошаговая работа

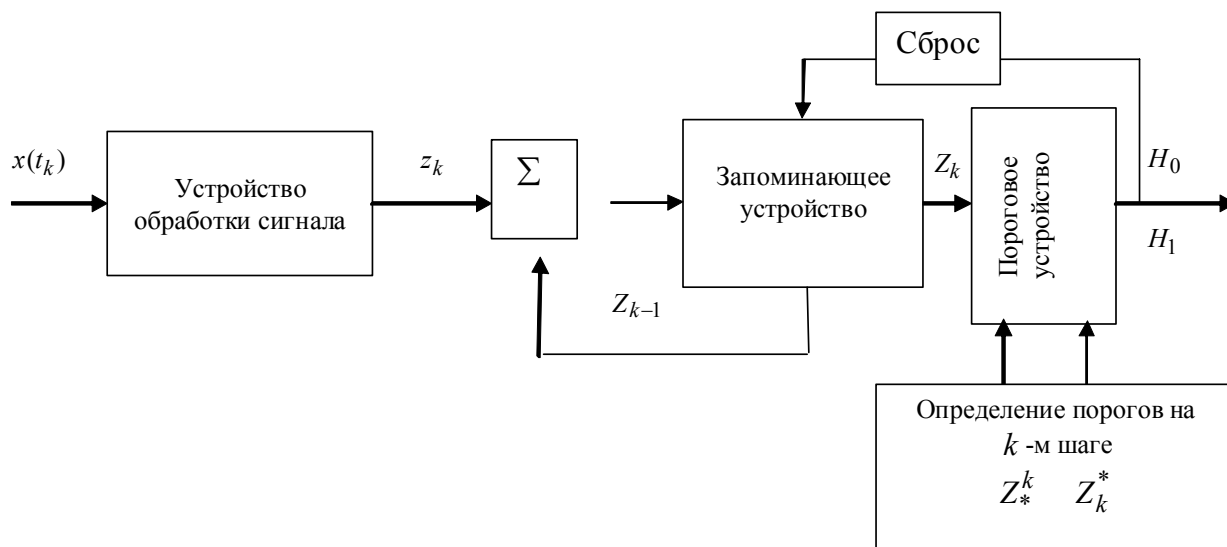


Рисунок 1 – Схема модифицированного двухпорогового последовательного наблюдателя

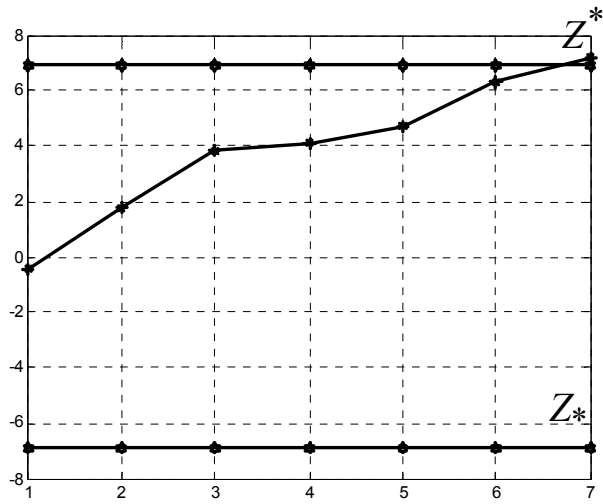


Рисунок 2 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-3}$

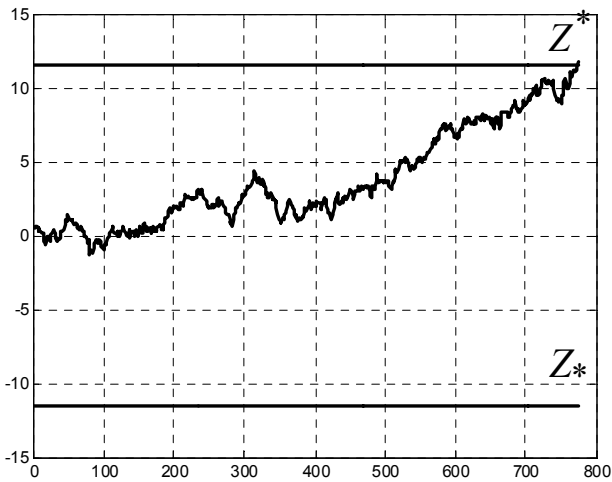


Рисунок 3 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-5}$

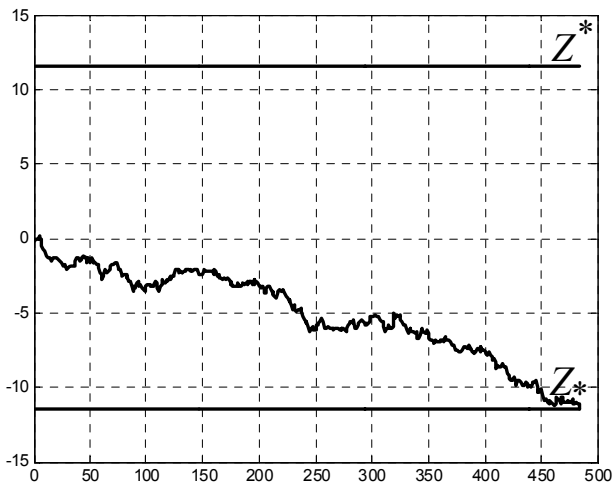


Рисунок 4 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-5}$

процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-5}$. В данном случае сигнал не обнаружен при условии наличия сигнала (пропуск цели).

С помощью имитационного моделирования получены вероятности пропуска цели от отношения сигнал/шум (ОСШ) (рис. 5). На рис. 5 представлен график зависимости вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/шум при $\alpha = \beta = 10^{-3}$. Из данного графика видно, что заданная вероятность пропуска цели достигается при ОСШ больше $-7,5$ дБ.

Проведен анализ эффективности автоматической процедуры обнаружения с усечением. Получены пороги обнаружения на 1-м, 2-м и k -м шаге процедуры. На 1-м шаге рассчитываются пороги обнаружения: Z_1^* и Z_*^1 (рис. 6), исходя из заданных значений вероятностей ошибок α и β .

На 2-м шаге результатом суммирования нормальных независимых случайных величин $x(t_1)$ и $x(t_2)$ является

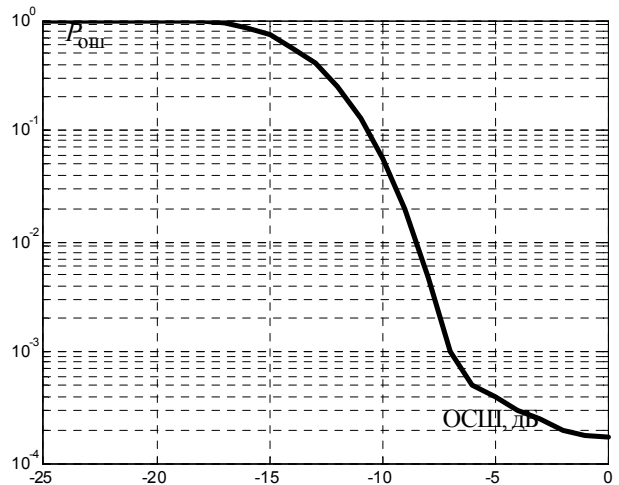


Рисунок 5 – Зависимость вероятности пропуска цели $P_{\text{ПЦ}}$ от отношения сигнал/шум

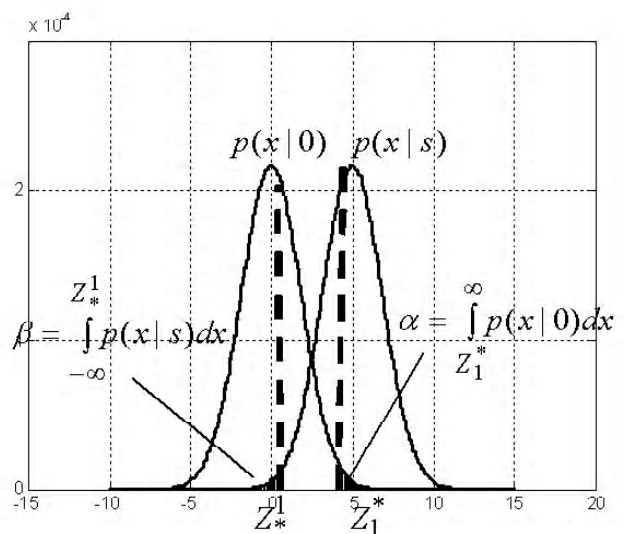


Рисунок 6 – Распределения плотностей вероятностей статистики на первом шаге процедуры наблюдения

случайная величина $x(t_1t_2) = x(t_1) + x(t_2)$, распределенная по гауссовскому закону с математическим ожиданием $2m_s$ или $2m$ и дисперсией $2\sigma^2$. Произошло изменение формы закона распределения наблюдаемых отсчетов (рис. 7). Значения порогов обнаружения Z_*^2 и Z_2^* на 2-м шаге процедуры определяются, исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β (рис. 7).

На k -м шаге случайная величина $x(t_1t_2...t_k)$ будет распределена по гауссовскому закону с математическим ожиданием km_1 или km_0 и дисперсией $k\sigma^2$.

Очевидно, что трансформация закона распределения наблюдаемой статистики в совокупности с фиксированными значениями вероятностей α и β , приводит к равенству (пересечению) верхнего и нижнего порогов обнаружения (рис. 8), что обеспечивает неизбежное принятие гипотезы H_0 или альтернативы H_1 .

На рис. 9 показана пошаговая работа процедуры обнаружения с усечением. Как видно из рис. 9, уже на 4-м шаге сигнал обнаружен.

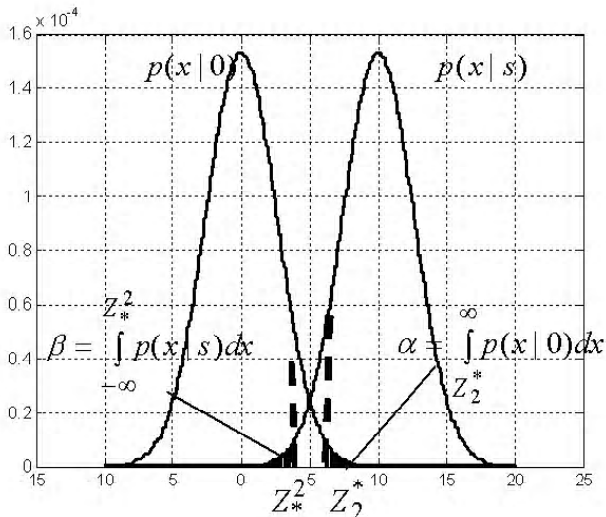


Рисунок 7 – Распределения плотностей вероятностей статистики на втором шаге процедуры наблюдения

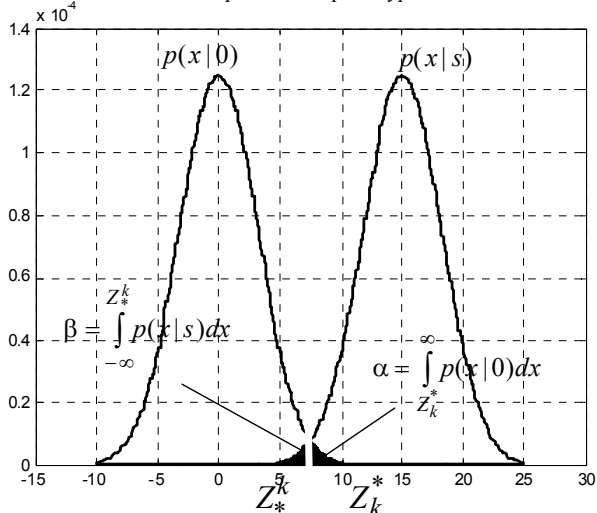


Рисунок 8 – Распределения плотностей вероятностей статистики на k -м шаге процедуры наблюдения

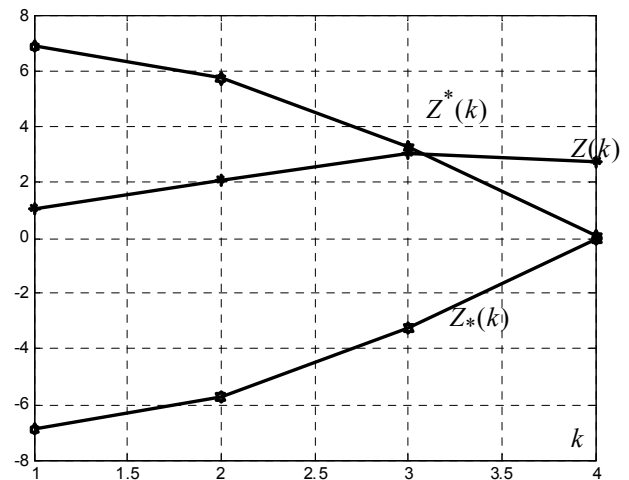


Рисунок 9 – Пошаговая работа процедуры обнаружения с усечением

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ эффективности классической процедуры Вальда для обнаружения сигнала первичного пользователя в когнитивной радиосети. Проанализирована пошаговая работа процедуры (рис. 2–рис. 4). Анализ показал, с повышением точности среднее число наблюдений увеличивается, что нежелательно для ее использования в когнитивной радиосети. Получена зависимость вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/шум (рис. 5). Показано, что заданная вероятность пропуска цели достигается при ОСШ больше $-7,5$ дБ, что может служить хорошим показателем.

Проведен анализ эффективности автоматической процедуры обнаружения с усечением. Получены пороги обнаружения на 1-м, 2-м и k -м шаге процедуры (рис. 6 – рис. 8). Показано, что в отличие от классической последовательной процедуры Вальда, где пороги обнаружения не изменяются, расстояние между модифицированными порогами уменьшается с каждым шагом наблюдения. Следовательно, предложенный подход позволил получить автоматическую процедуру обнаружения с усечением, что является определенным достоинством рассматриваемого решающего правила.

ВЫВОДЫ

В работе предложен алгоритм решения задачи обнаружения на основе модифицированной последовательной процедуры обнаружения.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые для обнаружения сигналов первичных пользователей в когнитивной радиосети предложена процедура обнаружения с усечением.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что обеспечение постоянства значения ошибок обнаружения α и β на каждом шаге процедуры обнаружения позволило получить решающие границы в виде пересекающихся линий, что исключает затягивание процедуры обзора. Отмеченный факт является достоинством алгоритма, что обуславливает целесообразность его использования в когнитивных сетях для обнаружения первичных пользователей.

БЛАГОДАРНОСТІ

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета радиозлектроники «Підвищення масштабованості технологічних рішень по забезпеченню якості обслуговування в конвергентних мережах» (номер гос. регистрации 0115U002432).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник з грифом МОН України / [В. В. Поповський, В. А. Лошаков, С. О. Сабурова та ін.] ; під редакцією В. В. Поповського. – Харків : СМІТ, 2010. – 469 с.
2. Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks / [I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, M. A. Shantidev] // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 46. – P. 40–48. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4473090
3. Ghasemi A. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, hallenges, and design trade-off / A. Ghasemi, S. E. Sousa // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 46. – P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4473090
4. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиозлектронная борьба. / А. Е. Охрименко. – М. : Воениздат. – Ч. 1. Основы радиолокации, 1983. – 456 с.
5. Гурьянов И. О. Когнитивное радио: новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий / И. О. Гурьянов // Электросвязь. – 2012. – № 8. – С. 5–8.
6. Кизима С. В. Когнитивные радиотехнологии. Аспекты практической реализации / С. В. Кизима, С. Г. Митченков, Б. Б. Емельяников // Электросвязь. – 2014. – № 9. – С. 44–48.
7. Ролич М. Л. Методы обнаружения первичных пользователей в когнитивных радиосетях / М. Л. Ролич // Молодой ученый. – 2015. – № 20. – С. 70–73.
8. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М. : Физматгиз, 1960. – 328 с.
9. Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М. : Наука, 1971. – 256 с.
10. Теория электрической связи: учебник для вузов / [А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В. И. Коржик, М. В. Назаров] ; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1999. – 432 с.
11. Обнаружение одиночного сигнала известной формы на основе модифицированного последовательного алгоритма Вальда / [С. Н. Ярмолик, А. А. Дятко, П. Н. Шумский, А. С. Храменков] // Труды БГТУ. – 2013. – № 6. – С. 119–122.

Статья поступила в редакцию 26.12.2016.
После доработки 10.01.2017.

Поповський В. В.¹, Коляденко А. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

²Аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ПЕРВИННИХ КОРИСТУВАЧІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

Актуальність. З появою мереж мобільного зв'язку сигнально-завадова обстановка стала різко ускладнюватися. Все зростаюча кількість радіоелектронних засобів різного призначення призводять до утворення множинного характеру електромагнітних взаємодій між ними. Одночасно з цим ще важливішим стає дефіцит частотного ресурсу, загострюється проблема електромагнітної сумісності. Знайти шляхи вирішення даної проблеми можна, використовуючи когнітивний розподіл частотного ресурсу з повторним використанням частот. Таким чином, оптимізація розподілу частотного ресурсу в когнітивних радіомережах і розробка алгоритму розподілу частотного ресурсу з повторним використанням частот є актуальною науковою задачею.

Мета. Метою дослідження є забезпечення електромагнітної сумісності при когнітивному розподілі ресурсів в мережі мобільного зв'язку.

Методи досліджень базуються на основних положеннях радіофізики, теорії електрозв'язку, системного аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії оптимізації, математичного та імітаційного моделювання.

Результати. Ситуацію і саму електромагнітну обстановку в мережах мобільного зв'язку сильно ускладнює той факт, що в цю обстановку вносяться різні часто випадкові чинники, що носять важко прогнозований характер. У цих умовах розрахувати заздалегідь електромагнітну обстановку і вирішити задачу електромагнітної сумісності з достатньою точністю не завжди вдається, а часто просто неможливо через апріорну невизначеність. Задачу електромагнітної сумісності для мереж мобільного зв'язку необхідно вирішувати на стадії її функціонування в реальному масштабі часу. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі оптимізації розподілу частотного ресурсу для мереж мобільного зв'язку. В основі алгоритму лежить метод локальної оптимізації – один з наближених методів дискретного програмування. В даному випадку умовою локальної оптимальності є те, що робоча частота, яка присвоюється черговій абонентській станції повинна бути близькою до присвоєної на попередньому кроці частоті, але при цьому повинні бути виконані вимоги електромагнітної сумісності.

Висновки. Вперше розроблено метод забезпечення електромагнітної сумісності при розподілі частотного ресурсу в мережі мобільного зв'язку, який складається з алгоритму з повторним використанням частот. Використання даного методу дозволяє скоротити смугу частот в 2–3 рази.

Ключові слова: Когнітивна мережа, первинний користувач, вторинний користувач, процедура виявлення сигналу, критерій Вальда.

Popovski V. V.¹, Kolyadenko A. V.²

¹Dr. Sc., Professor, Head of Department of info-communication engineering, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

²Post-graduate student of the Department of info-communication engineering, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

METHOD FOR DETECTION OF SIGNALS PRIMARY USERS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Context. With the advent of mobile communication networks, the signal-interference situation became sharply complicated. An increasing number of radio electronic devices for various purposes lead to the formation of the multiple nature of electromagnetic interactions between them. At the same time, the deficit of frequency resources becomes even more important, the problem of electromagnetic compatibility becomes aggravated. The ways of solving this problem can be found using the cognitive distribution of the frequency resource with repeated use of frequencies. Thus, the optimization of the distribution of the frequency resource in cognitive radio networks and the development of an algorithm for the allocation of a frequency resource with the repeated use of frequencies is an actual scientific task.

Objective. The aim of the study is to provide electromagnetic compatibility in the cognitive distribution of resources in a mobile communication network.

Methods of research are based on the basic principles of radiophysics, telecommunications theory, system analysis, mathematical statistics, probability theory, optimization theory, mathematical and simulation modeling.

Results. The situation and the most electromagnetic situation in mobile communication networks are greatly complicated by the fact that various random factors, which are difficult to forecast, are introduced into this environment. Under these conditions, it is not always possible to calculate the electromagnetic situation in advance and solve the problem of electromagnetic compatibility with sufficient accuracy, and often it is simply impossible due to a priori uncertainty. The problem of electromagnetic compatibility for mobile communication networks must be solved at the stage of its operation in real time. An algorithm for solving the problem of optimization of frequency resource allocation for mobile communication networks is proposed. The algorithm is based on the method of local optimization – one of the approximate methods of discrete programming. In this case, the local optimality condition is that the operating frequency that is assigned to the next subscriber station should be close to the frequency assigned at the previous step, but electromagnetic compatibility requirements must be met.

Conclusions. For the first time, a method has been developed for ensuring electromagnetic compatibility in the allocation of a frequency resource in a mobile communication network, which consists of an algorithm with repeated use of frequencies. The use of this method makes it possible to reduce the frequency band by 2 to 3 times.

Keywords: Cognitive Network, the primary user, the secondary user, the signal detection procedure, the Wald test.

REFERENCES

1. Popovs'kiy V. V., Loshakov V. A., Saburova S. O. et al píd redaktsiÿyu V. V Popovs'kogo Bagatokanal'niy yelektrozv'yazok ta telekomunikatsiyni tekhnologii: pídruchnik z grifom MON Ukraïni. Kharkiv, SMÍT, 2010, 469 p.
2. Akyildiz I. F., Lee W. Y., Vuran M. C., Shantidev M. A. Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks, *IEEE Communications Magazine*, 2008, Vol. 46, pp. 40–48. DOI: 10.1109/MCOM. .2008.4473090
3. Ghasemi A., Sousa S. E. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, hallenges, and design trade-off, *IEEE Communications Magazine*, 2008, Vol. 46, pp. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM. .2008.4473090
4. Okhrimenko A. Ye. Osnovy radiolokatsii i radioelektronnaya bor'ba. Moscow, Voenizdat. CH. 1. Osnovy radiolokatsii, 1983, 456 p.
5. Gur'yanov I. O. Kognitivnoye radio: novyye podkhody k obespecheniyu radiochastotnym resursom perspektivnykh radiotekhnologiy, *Elektrosvyaz'*, 2012, No. 8, pp. 5–8.
6. Kizima S. V., Mitchenkov S. G., Yemel'yannikov B. B. Kognitivnyye radiotekhnologii. Aspekty prakticheskoy realizatsii, *Elektrosvyaz'*, 2014, No. 9, pp. 44–48.
7. Rolich M. L. Metody obnaruzheniya pervichnykh pol'zovateley v kognitivnykh radiosetyakh, *Molodoy uchenyy*, 2015, No. 20, pp. 70–73.
8. Val'd A. Posledovatel'nyy analiz. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 328 p.
9. Fu K. Posledovatel'nyye metody v raspoznavanii obrazov i obuchenii mashin. Moscow, Nauka, 1971, 256 p.
10. Zyuko A. G. Klovskiy D. D., Korzhik V. I., Nazarov M. V. ; pod red. D. D. Klovskego Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnik dlya vuzov. Moscow, Radio i svyaz', 1999, 432 p.
11. Yarmolik S. N., Dyatko A. A., Shumskiy P. N., Khramenkov A. S. Obnaruzheniye odinochnogo signala izvestnoy formy na osnove modifitsirovannogo posledovatel'nogo algoritma Val'da, *Trudy BGTU*, 2013, No. 6, pp. 119–122.