

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ КОГНИТИВНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ РЕСУРСОВ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В.В. Поповский, А.В. Коляденко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина

Проведен анализ эффективности параметрического алгоритма оптимального приема сигналов, построенном на критерии Вальда; непараметрического алгоритма, построенном на математическом аппарате нейронных сетей; непараметрического алгоритма, построенном на математическом аппарате нечеткой логики; непараметрического алгоритма, построенном на знако-ранговом критерии Вилкоксона.

Анализ эффективности предложенных алгоритмов проведен в среде MATLAB с помощью имитационного моделирования. В качестве критерия эффективности выбрана вероятность ошибки. Получены графики зависимости вероятности ошибки от отношения мощности сигнала к мощности шума (ОСШ).

Анализ показал, что при низких значениях ОСШ от -10 до -7 дБ лучшими показателями обладает алгоритм, построенный на математическом аппарате нейронной сети Кохонена. С увеличением ОСШ (выше -7 дБ) наименьшая вероятность ошибки отмечается при использовании алгоритма Вальда. Но, хотя алгоритм Вальда обладает лучшей эффективностью, он требует априорной информации о параметрах сигналов. При ОСШ выше 0 дБ наименьшей вероятностью ошибки среди непараметрических алгоритмов обладает алгоритм, построенный на математическом аппарате нечеткой логики. При этом немного выше вероятность ошибки наблюдается у алгоритма, построенного на сети Кохонена. Наибольшей вероятностью ошибки обладает алгоритм обнаружения, основанный на знако-ранговом критерии Вилкоксона.

Ключевые слова: сеть мобильной связи, алгоритмы обнаружения сигналов, когнитивное распределение ресурсов.

Введение

Стремительное развитие сетей мобильной связи обнаружило серьезную проблему. Практически весь частотный диапазон к настоящему времени распределен и лицензирован, однако спектр используется недостаточно эффективно. Повысить эффективность использования спектра позволяет механизм когнитивного распределения пространственных, временных, частотных и поляризонных ресурсов (радиоресурсов).

В этой связи заслуживают внимания работы, связанные с развитием технологий когнитивного радио (КР), основанные на использовании временно свободных участков спектра. Главная задача КР состоит в том, что вторичный пользователь должен обнаружить первичного пользователя и быстро освободить полосу частот [1–3].

При когнитивном распределении ресурсов каждая абонентская станция (АС) сети должна непрерывно выполнять мониторинг спектра на наличие свободных каналов. Результаты анализа передаются базовой станции (БС), и она принимает окончательное решение относительно пригодности канала. При принятии решения БС опирается на результаты анализа спектра, информацию о местоположении, а также на вспомогательную информацию [4]. Необходимо отметить, что данные задачи должны быть решены в режиме реального времени.

Работоспособность таких радиосетей в значительной мере зависит от эффективности работы алгоритмов обнаружения незанятых частотных каналов при радиомониторинге [5].

Целью данной работы является проведение анализа эффективности алгоритмов обнаружения сигналов первичных пользователей для использования свободных полос частот в мобильных сетях связи (МСС) при когнитивном распределении радиоресурсов на вторичной основе.

1. Алгоритмы обнаружения сигналов

Алгоритмы обнаружения можно классифицировать [6]:

- 1) на параметрические: алгоритмы оптимального приема сигналов;
- 2) непараметрические: алгоритмы нейронных сетей; алгоритмы нечеткой логики; алгоритмы

обнаружения, основанные на непараметрических критериях (знаковый, Ван-дер-Вадена, Гаека, Севиджа, Вилкоксона).

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 МСС, $s(t)$ – 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.

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).

2. Алгоритм оптимального приема сигналов, построенный на критерии Вальда

Алгоритмы оптимального приема сигналов строятся на условных плотностях вероятности входных сигналов.

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.

Критерии идеального наблюдателя, минимального среднего риска, Неймана–Пирсона (одно-пороговые критерии) основываются на фиксированном объеме наблюдаемой выборки и точном знании о параметрах сигнала. Недостатком критерия Вальда (двухпороговый критерий) является неопределённость с числом наблюдений.

Поэтому для принятия решения в МСС проведен анализ эффективности модифицированного метода Вальда, позволяющего получить автоматически усекаемую процедуру обнаружения [7]. С этой целью предлагается рассчитывать пороги обнаружения на каждом шаге процедуры, исходя из обеспечения постоянства ошибок обнаружения: вероятности ложной тревоги $\alpha = \text{const}$ и вероятности пропуска цели $\beta = \text{const}$. 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 отношения правдоподобия (ОП) [7, 8]:

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

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 ($Z_* = \ln \frac{\beta}{1-\alpha}$, $Z^* = \ln \frac{1-\beta}{\alpha}$). Пороги Z_* и Z^* должны выбираться так, чтобы вероятность того, что $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > Z^*$, когда справедлива гипотеза H_0 , была равна α , а $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} < Z_*$, вероятность того, что при гипотезе H_1 величина была равна β (рис. 1).

При этом если выполняется условие $Z_1 \geq Z_1^*$, то принимается гипотеза H_1 . Если выполняется условие $Z_1 \leq Z_*^1$, то принимается гипотеза H_0 . Если $Z_*^1 < Z_1 < Z_1^*$, то наблюдение продолжается и осуществляется переход к шагу 2.

Шаг 2. На вход приемника поступает выборка $x(t_1) x(t_2)$. Формируемое значение логарифма ОП принимает вид

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

Результатом суммирования нормальных независимых случайных величин $x(t_1)$ и $x(t_2)$ является случайная величина $x(t_1 t_2) = x(t_1) + x(t_2)$, распределенная по гауссовскому закону с математическим ожиданием $2m_s$ или $2m$ и дисперсией $2\sigma^2$. Очевидно, что происходит изменение формы закона распределения наблюдаемых отсчетов (рис. 2).

Значения порогов обнаружения Z_*^2 и Z_2^* на 2-м шаге процедуры определяются, исходя из условия обеспечения 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 принимается гипотеза H_0 . Если $Z_*^2 < Z_2 < Z_2^*$, то наблюдение продолжается и осуществляется переход к следующим итерациям 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

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

Случайная величина $x(t_1 t_2 \dots t_k)$ будет распределена по гауссовскому закону с математическим ожиданием km или km_s и дисперсией $k\sigma^2$.

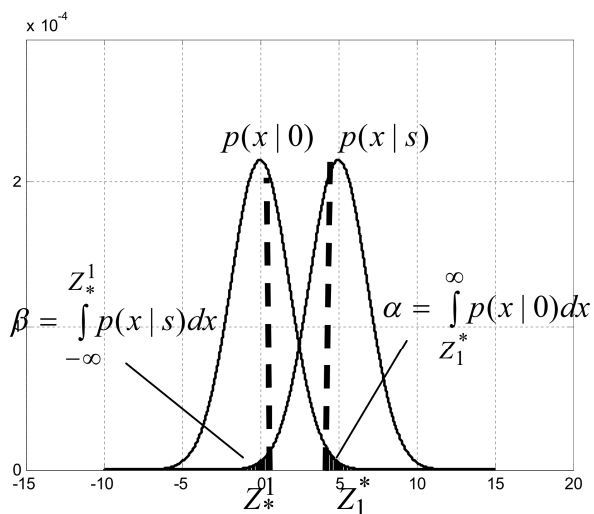


Рис. 1. Распределения плотностей вероятностей статистики на первом шаге процедуры наблюдения

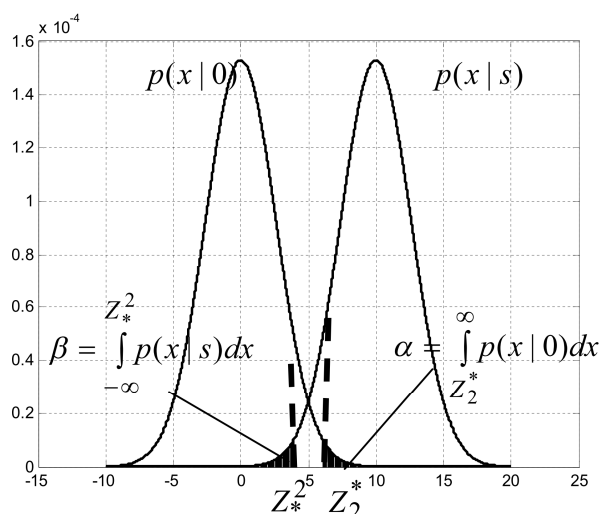


Рис. 2. Распределения плотностей вероятностей статистики на втором шаге процедуры наблюдения

Исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β , определяются значения порогов обнаружения Z_*^k и Z_k^* на k -м шаге процедуры (рис. 3).

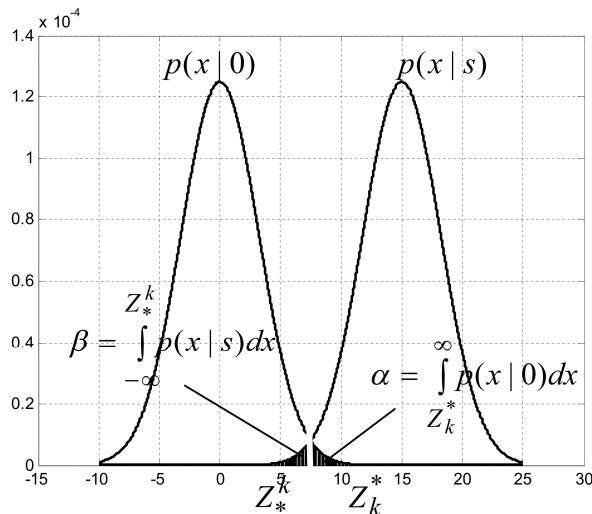


Рис. 3. Распределения плотностей вероятностей статистики на k -м шаге процедуры наблюдения

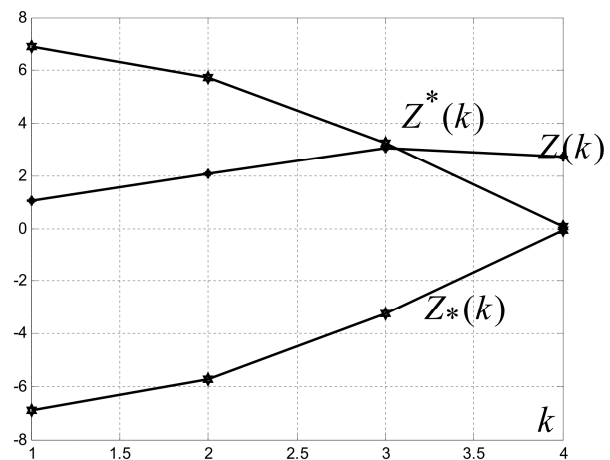


Рис. 4. Пошаговая работа процедуры обнаружения с усечением

Трансформация закона распределения наблюдаемой статистики в совокупности с фиксированными значениями вероятностей α и β приводит к равенству (пересечению) верхнего и нижнего порогов обнаружения (см. рис. 3), что обеспечивает неизбежное принятие гипотезы H_0 или альтернативы H_1 .

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

Ограничениями данного метода является тот факт, что необходимо располагать знаниями об условных плотностях распределения вероятностей. Если условные плотности распределения вероятностей неизвестны, можно прибегнуть к непараметрическим методам обнаружения.

3. Алгоритм, построенный на математическом аппарате нейронных сетей

Задачу обнаружения сигнала будем решать как задачу кластеризации с помощью нейронной сети Кохонена [9–12].

Сеть Кохонена – это однослойная сеть, построенная из нейронов типа WTA (Winner Takes All – победитель получает все). Для задачи обнаружения сигнала сеть Кохонена будет состоять из входных векторов уровней отсчетов принимаемого сигнала на соответствующей частоте f_k :

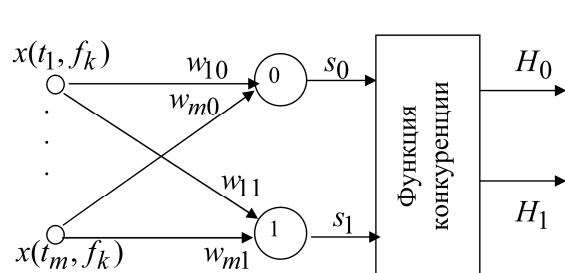


Рис. 5. Структура сети Кохонена для решения задачи обнаружения сигнала

$x(t_1, f_1)$ – уровень отсчета в 1-й момент времени на частоте f_1 , $x(t_2, f_1)$ – уровень отсчета во 2-й момент времени на частоте f_1 , $x(t_m, f_1)$ – уровень отсчета в m -й момент времени на частоте f_1 , $x(t_1, f_2)$ – уровень отсчета в 1-й момент времени на частоте f_2 , $x(t_2, f_2)$ – уровень отсчета во 2-й момент времени на частоте f_2 , $x(t_m, f_2)$ – уровень отсчета в m -й момент времени на частоте f_2 и т. д. (рис. 5).

Задача состоит в том, что сеть Кохонена должна определить, на каких частотах присутствует сигнал от первичного пользователя, а на каких он отсутствует. Таким образом, этот алгоритм в отличие последовательного алгоритма Вальда является последовательно-параллельным.

Работа данного алгоритма состоит в следующем. Каждый нейрон сети соединен со всеми компонентами m -мерного входного вектора. Количество нейронов совпадает с количеством кластеров, которое должна выделить сеть. Кластер H_0 соответствует гипотезе H_0 – первичный пользователь

отсутствует. Кластер H_1 соответствует гипотезе H_1 – первичный пользователь работает со спектром. В качестве нейронов сети Кохонена применяются линейные взвешенные сумматоры

$$s_j = b_j + \sum_{i=1}^m w_{ij} \cdot x_i,$$

где j – номер нейрона, i – номер входа, s_j – выход адаптивного сумматора, w_{ij} – вес i -го входа j -го нейрона, b_j – порог. Каждый j -й нейрон описывается вектором весов $w_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm})$. С выходов адаптивных сумматоров сигнал поступает на функцию конкуренции, работающую по правилу «победитель получает всё». Функция конкуренции находит выход адаптивного сумматора с максимальным значением выхода. Пусть 1 – номер такого сумматора. Тогда на выходе сети формируется выходной сигнал $H_1=1$, при этом выходной сигнал H_0 равен нулю. Это означает, что первичный пользователь работает со спектром.

4. Алгоритм, построенный на математическом аппарате нечеткой логики

В данном алгоритме для обнаружения сигнала кроме принимаемых отсчетов предлагается использовать корреляционные свойства сигналов.

При построении алгоритма с применением математического аппарата нечеткой логики результат обнаружения возможно представить в качестве степени (истинности) присутствия сигнала [13]. Числовое значение степени присутствия сигнала следует интерпретировать как оценку принадлежности входного сигнала к одному из трех заданных состояний: шум, неопределенность и присутствие сигнала от первичного пользователя.

Применение степени истинности позволяет использовать преимущества многозначной логики без существенного усложнения алгоритма работы обнаружителя.

Нечеткий обнаружитель выдает результат за каждый такт времени на основе оценки двух признаков: уровень мощности принимаемого сигнала (входная переменная P) и интервал корреляции (входная переменная TAY). Естественно, что для определения мощности и интервала корреляции необходима выборка из результатов наблюдения, что в свою очередь замедляет процесс принятия решения. Ниже представлен набор нечетких правил обнаружителя:

- 1) если P низкое и TAY около 0, то OUT есть шум;
- 2) если P низкое и TAY не около 0, то OUT есть неопределенность;
- 3) если P среднее и TAY около 0, то OUT есть неопределенность;
- 4) если P среднее и TAY не около 0, то OUT есть присутствие сигнала;
- 5) если P высокое и TAY около 0, то OUT есть присутствие сигнала;
- 6) если P высокое и TAY не около 0, то OUT присутствие сигнала;

Если на выходе нечеткого обнаружителя фиксируется неопределенность, то необходимо повторить наблюдения или вынести решение о присутствии сигнала.

5. Алгоритм обнаружения, основанный на знако-ранговом критерии Вилкоксона

Рассмотрим выборку $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ отсчетов сигнала. Задача обнаружения может быть сформулирована в виде задачи проверки статистических гипотез относительно наблюдаемой выборки [14]:

$$H_0 : M = M_0 \text{ (сигнал отсутствует);}$$

$$H_1 : M > M_0 \text{ (сигнал присутствует),}$$

где M_0 – медиана распределения шума, M – медиана распределения смеси сигнала с шумом.

Для проверки гипотезы H_0 необходимо центрировать выборку $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$:

$$x_i = x_i^* - M_0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Далее расположим абсолютные величины элементов модифицированной выборки $x_i, i = \overline{1, n}$ в порядке их возрастания, получив вариационный ряд $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, где $u_1 = \min(|x_i|)$,

$u_n = \max(|x_i|)$, $u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_n$. Таким образом, рангом R_i^+ абсолютной величины элемента x_i будет положение его в вариационном ряду $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$.

Определим переменную ϕ_i , $i = \overline{1, n}$, определяющую знаки x_i , $i = \overline{1, n}$ как функцию единичного скачка

$$\phi_i = \begin{cases} 1, & x_i \geq 0, \\ 0, & x_i < 0. \end{cases}$$

Далее вычисляем статистику T^+ :

$$T^+ = \sum_{i=1}^n R_i^+ \phi_i,$$

которая равна сумме положительных знаковых рангов. Решение о принятии альтернативной гипотезы H_1 и, следовательно, наличии сигнала в наблюдаемой выборке выносится в том случае, когда

$$H_1: T^+ = \sum_{i=1}^n R_i^+ \phi_i \geq C_{\text{пор}},$$

где $C_{\text{пор}}$ – заданный порог, который выбирается, исходя из вероятности ложной тревоги.

При небольших значениях n аналитический вывод выражения для определения $C_{\text{пор}}$ затруднителен. Однако при $n \rightarrow \infty$ статистика T^+ стремится к нормальному закону распределения и, как показано в [14], $C_{\text{пор}}$ можно определить из выражения

$$C_{\text{пор}} = \frac{n}{2} \left(x_a \sqrt{\frac{n}{3}} + \frac{n}{2} \right),$$

x_a – процентная точка стандартного нормального распределения.

Таким образом, если наблюдаемая выборка $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ является выборкой шума с медианой M_0 , переменная ϕ_i , $i = \overline{1, n}$, определяющая знаки x_i , $i = \overline{1, n}$, равновероятно принимает значения «0» и «1». При наличии в наблюдаемой выборке отсчетов положительно смещенного сигнала количество единиц («1») преобладает над числом нулей («0»), что и является информацией о наличии сигнальных отсчетов. Ранги R_i^+ абсолютных величин элементов x_i учитывают степень отклонения элементов от значения медианы M_0 , что является дополнительной информацией.

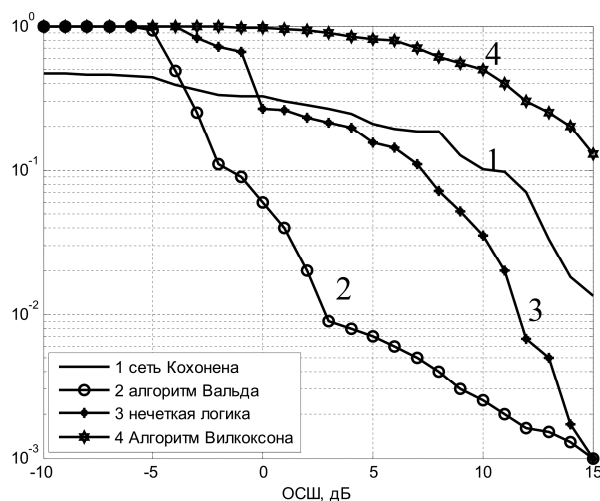


Рис. 6. Графики зависимости вероятности ошибки от ОСШ

6. Анализ эффективности алгоритмов обнаружения сигналов

Анализ эффективности предложенных алгоритмов проведен в среде MATLAB с помощью имитационного моделирования. В качестве наблюдаемого процесса сформирован радиосигнал с модуляцией 16-QAM и аддитивного белого гауссовского шума. Для всех случаев задана вероятность ложной тревоги и вероятность пропуска цели $\alpha = \beta = 10^{-3}$. В качестве критерия эффективности выбрана вероятность общей ошибки $p_{\text{ош}}$, которая с помощью имитационного моделирования рассчитывалась как сумма ошибочно принятых решений, деленная на количество опытов. На рис. 6 представлены

графики зависимости вероятности ошибки $p_{\text{ош}}$ от отношения мощности сигнала к мощности шума (ОСШ).

Из данных графиков видно, что при низких значениях ОСШ от -10 до -7 дБ лучшими показателями обладает непараметрический алгоритм, построенный на нейронной сети Кохонена. С увеличением ОСШ (выше -7 дБ) наименьшая вероятность ошибки отмечается при использовании параметрического алгоритма Вальда по сравнению со всеми непараметрическими алгоритмами. При ОСШ выше 0 дБ наименьшей вероятностью ошибки среди непараметрических алгоритмов обладает алгоритм, построенный на нечеткой логике. При этом немного выше вероятность ошибки наблюдается у алгоритма, построенного на сети Кохонена. Наибольшей вероятностью ошибки обладает алгоритм обнаружения, основанный на знако-ранговом критерии Вилкоксона.

Выводы

1. Работоспособность мобильных сетей связи при когнитивном распределении ресурсов в значительной мере зависит от эффективности работы алгоритмов обнаружения незанятых частотных каналов.

2. Проведен анализ эффективности параметрического алгоритма оптимального приема сигналов, построенного на критерии Вальда; непараметрического алгоритма, построенного на математическом аппарате нейронных сетей; непараметрического алгоритма, построенного на математическом аппарате нечеткой логики; непараметрического алгоритма, построенного на знако-ранговом критерии Вилкоксона.

3. Анализ эффективности предложенных алгоритмов проведен в среде MATLAB с помощью имитационного моделирования. В качестве критерия эффективности выбрана вероятность ошибки. Получены графики зависимости вероятности ошибки от отношения мощности сигнала к мощности шума (ОСШ).

4. Анализ показал, что при низких значениях ОСШ от -10 до -7 дБ лучшими показателями обладает алгоритм, построенный на математическом аппарате нейронной сети Кохонена. С увеличением ОСШ (выше -7 дБ) наименьшая вероятность ошибки отмечается при использовании алгоритма Вальда. Но, хотя алгоритм Вальда обладает лучшей эффективностью, он требует априорной информации о параметрах сигналов. При ОСШ выше 0 дБ наименьшей вероятностью ошибки среди непараметрических алгоритмов обладает алгоритм, построенный на математическом аппарате нечеткой логики. При этом немного выше вероятность ошибки наблюдается у алгоритма, построенного на сети Кохонена. Наибольшей вероятностью ошибки обладает алгоритм обнаружения, основанный на знако-ранговом критерии Вилкоксона.

Литература

1. *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.2008.4481339

2. *Ghasemi, A. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges, and design trade-off* / A.Ghasemi, S.E. Sousa // *IEEE Communications Magazine*. – 2008. – vol. 46, – P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4481338

3. *Охрименко, А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. В 2 ч. Ч. 1: Основы радиолокации* / А.Е. Охрименко. – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.

4. *Гурьянов, И.О. Когнитивное радио: новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий* / И.О. Гурьянов // *Электросвязь*. – 2012. – № 8. – С. 5–8.

5. *Безрук, В.М. Выбор незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях* / В.М. Безрук, С.А. Иваненко // *Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС – 2016): сб. науч. тр. второй междунар. науч.-техн. конф., Харьков 24–25 мая 2015 г.* – Харьков: ХНУРЭ, 2016. – С. 23–24.

6. *Куприянов, А.И. Теоретические основы радиоэлектронной разведки: учеб. пособие* / А.И. Куприянов, П.Б. Петренко, М.П. Сычев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 381 с.

7. *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.

8. Ролич, М.Л. Методы обнаружения первичных пользователей в когнитивных радиосетях / М.Л. Ролич // Молодой ученый. – 2015. – № 20. – С. 70–73.
9. Розенблатт, Ф. Принципы нейродинамики. Перцептрон и теория механизмов мозга / Ф. Розенблатт. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
10. Минский, М. Перцептроны / М. Минский, С. Пайперт. – М.: Мир, 1971. – 262 с.
11. Ивахненко, А.Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике / А.Г. Ивахненко. – Киев: Техніка, 1971. – 372 с.
12. Кохонен, Т. Ассоциативные запоминающие устройства / Т. Кохонен. – М.: Мир, 1982. – 384 с.
13. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
14. Стоянов, Д.Д. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения сигналов в когнитивных радиосетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Стоянов Дмитрий Драганович. – Ярославль, 2014. – 121 с.

Поповский Владимир Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; d_ts@nure.ua.

Коляденко Алексей Вадимович, аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии, национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; kolyadenko.home@rambler.ru.

Поступила в редакцию 10 февраля 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr170203

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ALGORITHMS FOR DETECTION OF SIGNALS IN COGNITIVE RESOURCE ALLOCATION IN MOBILE NETWORK

V.V. Popovski, d_ts@nure.ua,

A.V. Kolyadenko, kolyadenko.home@rambler.ru

Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

The analysis of the efficiency of parametric algorithm optimal signal reception, which was built on the Wald criteria; nonparametric algorithm, built on the mathematical formalism of neural networks; nonparametric algorithm, built on the mathematical apparatus of fuzzy logic; nonparametric algorithm, built on the signs, the Wilcoxon rank test.

Analysis of the effectiveness of the proposed algorithms performed in Matlab environment using simulation. As a criterion of the effectiveness of selected probability of error. Obtain plots of the probability of error of the ratio of signal power to noise power ratio (SNR).

The analysis showed that at low SNR values from -10 dB to -7 dB best indicators has an algorithm built on the mathematical apparatus of the Kohonen neural network. With the increase in SNR (above -7 dB) the smallest probability of error is noted when using the algorithm Wald. But, although the Wald algorithm has better efficiency, it requires a priori information about signal parameters. When the SNR is above 0 dB lower probability of error among nonparametric algorithms has an algorithm built on the mathematical apparatus of fuzzy logic. This is slightly higher probability of errors observed in the algorithm, built on the Kohonen network. The most likely error has detection algorithm based on the characters, the Wilcoxon rank test.

Keywords: mobile communication network, algorithms of detection signal, cognitive resource allocation.

References

1. Akyildiz I.F., Lee. 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.2008.4481339
2. Ghasemi A., Sousa S.E. Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-Off. *IEEE Communications Magazine*, 2008, vol. 46, pp. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4481338
3. Ohrimenko A.E. *Osnovy radiolokatsii i radioelektronnaya bor'ba* [Bases of a Radar-Location and Radio-Electronic Fight]. Moscow, Voenizdat Publ., Part 1, 1983. 456 p.
4. Gur'janov I.O. [Cognitive Radio: New Approaches to Providing Perspective Radio Technologies with a Radio-Frequency Resource]. *Telecommunication*, 2012, no. 8, pp. 5–8. (in Russ.)
5. Bezruk V.M., Ivanenko S.A. *Vybor nezanyatykh chastotnykh kanalov v kognitivnykh radio-setyakh* [The Choice of Unoccupied Frequency Channels in Cognitive Radio Networks]. *Problemy elektromagnitnoy sovmestimosti perspektivnykh besprovodnykh setey svyazi (EMS – 2016): sb. nauch. tr. vtoroy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Khar'kov 24–25 maya 2015 g.* [Problems of Electromagnetic Compatibility of Perspective Wireless Networks of Communication (EMS – 2016): II International Scientific and Technical Conference, Kharkiv]. Kharkiv, Kharkiv National University of Radio Electronics, 2016, pp. 23–24.
6. Kupriyanov A.I., Petrenko P.B., Sychev M.P. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnay razvedki: ucheb. posobie* [Theoretical Bases of Radio-Electronic Intelligence: Manual]. Moscow, MSTU named by. N.E. Bauman Publ., 2010. 381 p.
7. Yarmolik S.N., Dyatko A.A., Shumskiy P.N., Khramenkov A.S. [Detection of a Single Signal of the Known Form on the Basis of the Modified Consecutive Algorithm of Wald]. *Works of the Belarusian State Technical University*, 2013, no. 6, pp. 119–122. (in Russ.)
8. Rolich M.L. [Methods of Detection of Primary Users in Cognitive Radio Networks]. *Young Scientist*, 2015, no. 20, pp. 70–73. (in Russ.)
9. Rozenblatt F. *Printsipy neyrodinamiki. Perceptron i teoriya mekhanizmov mozga* [Principles of Neurodynamics. Perceptron and Theory of Mechanisms of a Brain]. Moscow, Mir Publ., 1965. 480 p.
10. Minskiy M., Paypert S. *Perseptrony* [Perseptrona]. Moscow, Mir Publ., 1971, 262 p.
11. Ivakhnenko A.G. *Sistemy evristicheskoy samoorganizatsii v tehnicheckoy kibernetike* [Systems of Heuristic Self-Organization in Technical Cybernetics]. Kiev, Tehnika Publ., 1971. 372 p.
12. Kokhonen T. *Assotsiativnye zapominayushhie ustroystva* [Associative Memory Devices]. Moscow, Mir Publ., 1982. 384 p.
13. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of Indistinct Systems by Means of MATLAB]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007. 288 p.
14. Stoyanov D.D. *Razrabotka i issledovanie algoritmov obnaruzheniya signalov v kognitivnykh radiosetyakh: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.12.04.* [Development and Research of Signal Detection Algorithms in Cognitive Radio Networks. Cand. Sci. Diss.]. Yaroslavl', 2014. 121 p.

Received 10 February 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Поповский, В.В. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов обнаружения сигналов при когнитивном распределении ресурсов в сетях мобильной связи / В.В. Поповский, А.В. Коляденко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 33–41. DOI: 10.14529/ctcr170203

FOR CITATION

Popovski V.V., Kolyadenko A.V. Comparative Analysis of Efficiency of Algorithms for Detection of Signals in Cognitive Resource Allocation in Mobile Network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 33–41. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170203