

УДК 621.39

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ С АСИММЕТРИЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Стоянов Дмитрий Драганович

аспирант кафедры динамики электронных систем
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.
E-mail: dmdrstoyanov@gmail.com.

Приоров Андрей Леонидович

доктор технических наук, доцент кафедры динамики электронных систем
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.
E-mail: andcat@yandex.ru.

Дубов Михаил Андреевич

кандидат технических наук, ассистент кафедры динамики электронных систем
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.
E-mail: michaeldubov@gmail.com.
Адрес: 150000, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14.

Аннотация: Предлагается непараметрический алгоритм обнаружения для решения задачи поиска широкополосных радиосигналов неизвестной формы на фоне аддитивного белого гауссовского шума в частотной области. Он основан на статистике знаковых рангов Вилкоксона. Установлено, что предлагаемый обнаружитель слабо чувствителен к статистическим характеристикам шумов и обнаруживаемых сигналов. Приводится сравнительный анализ эффективности работы предложенного непараметрического алгоритма с известным параметрическим алгоритмом. Он подтверждает, что предлагаемый непараметрический алгоритм позволяет проводить обнаружение сигналов в частотной области в условиях непараметрической априорной неопределённости. Для примера в работе приведены результаты обнаружения сигнала с модуляцией GMSK, со стандартной шириной полосы в условиях действия аддитивного белого гауссовского шума. Установлено, что эффективность алгоритма выше по сравнению с известным алгоритмом, что позволяет использовать его при создании современных когнитивных сетей связи.

Ключевые слова: непараметрический алгоритм, широкополосные радиосигналы, обнаружение радиосигналов.

Особенности задачи обнаружения радиосигналов

В настоящее время наблюдается стремительное развитие телекоммуникационных радиосистем передачи данных. Постоянно растущие требования к скорости и объёму передаваемой информации склоняют разработчиков таких систем к использованию широкополосных радиосигналов. Одновременно с этим растёт потребность более эффективно использовать радиочастотный спектр для доступа к информационным ресурсам новых пользователей. В связи с этим всё большую актуальность приобретает задача мониторинга спектра частот с целью определения занятости радиоспектра не только для служб радиоконтроля, но и для са-

мообучающихся интеллектуальных радиосетей – «когнитивного радио».

Постоянно растущий уровень автоматизации процессов мониторинга спектра, часто исключая присутствие оператора, корректирующего параметры системы, требует применения алгоритмов, качественные характеристики которых были бы устойчивы по отношению к неизвестным параметрам и свойствам регистрируемых сигналов.

Существующие параметрические алгоритмы обнаружения радиосигналов синтезированы на основе моделей стандартных законов распределения, таких, как распределение Гаусса, Релея, Райса и ряда других подобных распределений, и в случае изменения вида функции распределе-

ния сигнала или помехи эффективность обнаружения такими алгоритмами, оптимальными, как правило, только для одной модели распределения, резко снижается. Обилие современных стандартов беспроводной передачи данных, использующих различные виды и типы модуляций, не позволяет создать единую модель для статистического описания всех типов используемых сигналов. Таким образом, разработка алгоритмов, нечувствительных или слабо чувствительных к статистическим характеристикам сигналов и шумов, является актуальной задачей. Данная задача может быть решена путём применения непараметрических методов обнаружения.

Цель работы – предложить непараметрический алгоритм для обнаружения широкополосных радиосигналов в частотной области в условиях априорной неопределённости о параметрах сигнала.

Большинство описанных в открытой литературе алгоритмов обнаружения, основанных на непараметрических критериях (знаковый, Ван-дер-Вадена, Гаека, Севиджа, Вилкоксона), позволяют обнаруживать сигналы на фоне помех, имеющих симметричный вид функции распределения.

Обнаружители, основанные на критерии Вилкоксона, наиболее мощные по сравнению с алгоритмами, основанными на знаковых статистиках. Они незначительно уступают в эффективности обнаружения оптимальным алгоритмам, алгоритмам, основанным на непараметрических критериях Ван-дер-Вадена, Левина-Кушнера, Гаека, обладая при этом значительно меньшей вычислительной сложностью, могут применяться для обнаружения постоянного сигнала на фоне шума с симметричным распределением [1].

Описание алгоритма обнаружения сигналов

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

$$H_0: M = M_0 \text{ (сигнал отсутствует);} \quad (1)$$

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

где M_0 – медиана распределения шума, M – медиана распределения смеси сигнала с шумом. Для проверки гипотезы $H_0: M = M_0$ необходимо модифицировать выборку $\mathbf{X} = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}: x_i = x_i^* - M_0, i = \overline{1, n}$. Далее, в соответствии с методикой [2], расположим абсолютные величины элементов модифицированной выборки $x_i, i = \overline{1, n}$ в порядке их возрастания, получив вариационный ряд $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 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 $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$.

Определим переменную $\varphi_i, i = \overline{1, n}$, определяющую знаки $x_i, i = \overline{1, n}$:

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

Далее вычисляем статистику T^+ :

$$T^+ = \sum_{i=1}^n R_i \varphi_i, \quad (2)$$

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 $T^+ \geq C_{\text{пор}}$, где $C_{\text{пор}}$ – некоторый заданный порог, который выбирается, исходя из вероятности ошибки первого рода – ложного обнаружения.

При небольших значениях n аналитический вывод выражений для вероятностей ложного обнаружения и пропуска сигнала затруднителен. Однако для $n \gg 1$ статистика T^+ стремится к нормальному закону распределения и можно определить приближённое выражение для определения вероятности ложного обнаружения [4]:

$$F_{\text{ло}} \approx \Phi \left(\frac{n^2 / 4 - C_{\text{ноп}}}{\sqrt{n^3 / 12}} \right), \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^x e^{t^2/2} dt$ – функция нормального распределения. Из выражения (3) однозначно определяется $C_{\text{ноп}}$ для заданной вероятности ложного обнаружения:

$$C_{\text{ноп}} = \frac{n}{2} (x_\alpha \sqrt{n/3} + n/2), \quad (4)$$

где x_α – процентная точка стандартного нормального распределения.

В отличие от большинства радиолокационных систем, где нашли широкое применение непараметрические алгоритмы, использование временных отсчетов телекоммуникационных радиосигналов в качестве последовательности элементов выборки для алгоритма Вилкоксона не представляется возможным в силу того, что каждый элемент выборки $x_i, i = \overline{1, n}$ будет сложным образом зависеть от всех действующих в полосе обзора радиосигналов. В частотной области зависимость характеристик спектральных отсчетов от параметров наблюдаемых сигналов носит локальный характер, и сами отсчеты можно приближённо считать независимыми [5], поэтому в качестве элементов выборки будем использовать отчёты энергетического спектра анализируемого радиосигнала $U_{\text{вх}}(t)$:

$$X_R(m) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \left| \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} U_{\text{вх}}(kT) e^{-j2\pi mkT/N} \right|^2 = \{x_m^*, m = \overline{1, N}\}, \quad (5)$$

рассчитываемые путём усреднения R спектральных выборок дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Здесь $r = \overline{1, R}$ – порядковый номер выборки, k и m – номера отсчетов во временной и спектральной областях, T – интервал дискретизации, N – число точек ДПФ.

В случае наличия на входе радиотракта только гауссова шума, спектральные отсчёты усреднённого энергетического спектра $X_R(m)$ представляют собой независимые случайные величины, подчиняющиеся центральному χ^2 (хи-квадрат) – распределению [6]:

$$W_{\chi^2}(x; a, \lambda, J) = \frac{1}{\lambda \Gamma(J/2)} \left(\frac{x-a}{\lambda} \right)^{J/2-1} e^{-(x-a)/\lambda} \quad (6)$$

с $J = 2R$ степенями свободы и параметрами $a = 0, \lambda = \frac{\sigma_\xi^2}{RN}$, где σ_ξ^2 – мощность шума. Гистограмма отсчетов спектра гауссова шума с числом усреднений $R=2$ и кривая распределения (6) представлены на рис.1.

При большом числе степеней свободы, что соответствует условию $R \ll 1$, распределение χ^2 стремится к нормальному закону распределения. Однако при малых значениях R , что чаще применимо на практике, функция плотности χ^2 – распределения ассиметрична, что затрудняет применение обнаружителя Вилкоксона, разработанного для симметричного вида распределения аддитивной помехи.

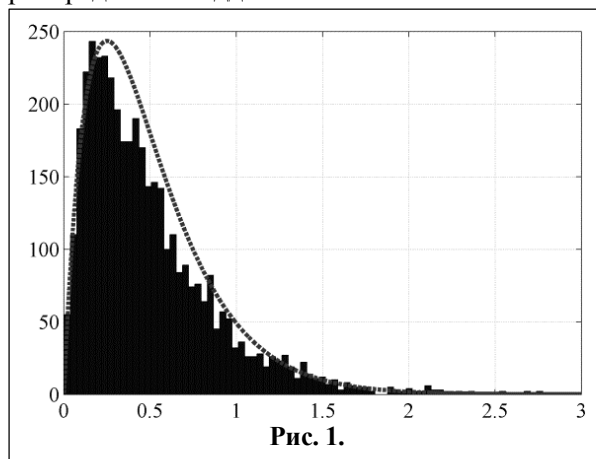


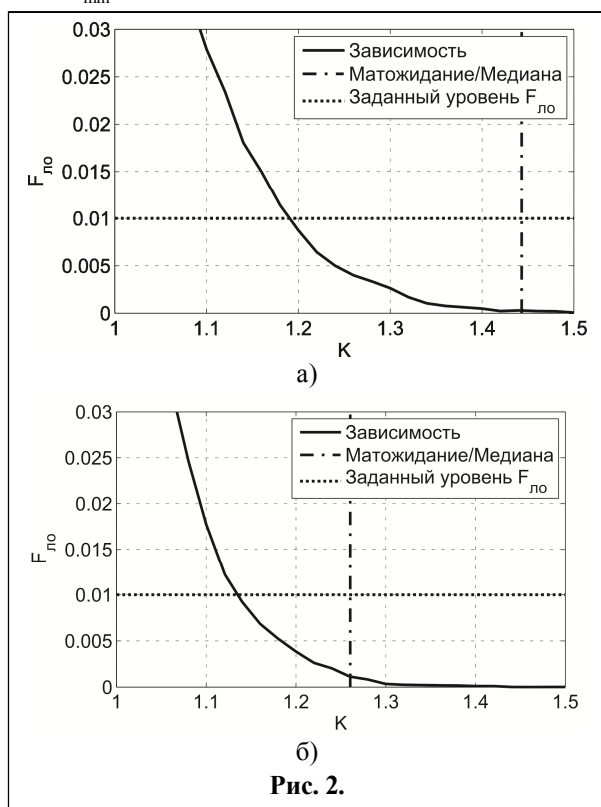
Рис. 1.

В случае применения алгоритма (2) для обнаружения сигнала на фоне помехи с ассиметричным распределением, вероятность ложного обнаружения будет превышать заданное значение (3) в несколько раз, однако вид распределения статистики T^+ не изменяется, и так же, как и для симметрично распределённой помехи, будет стремиться к нормальному закону. Поэтому предлагается алгоритм обнаружения Вилкоксона для обеспечения возможности обнаружения сигналов на фоне помех с ассиметричным видом распределения.

Поскольку большинство непараметрических алгоритмов обнаружения, в том числе, и рассматриваемый в данной работе, синтезированы на эвристической основе, определение их харак-

теристик, особенно для конечного числа n , возможно только статистическими методами.

При работе алгоритма (2) со спектральными отсчётами белого гауссова шума было определено, что при увеличении значения медианы M_0 не более чем в 1,5 раза, вероятность ложного обнаружения не превышает заданного значения. График зависимости вероятности ложного обнаружения алгоритма (2) от коэффициента K увеличения значения M_0 , для отсчётов шума энергетического спектра без усреднения $R=1$ показан на рис. 2,а, для $R=2$ - на рис. 2,б. Данная зависимость получена методом статистического моделирования по 1000 спектральных выборок при значении параметра $n=35$. Абсциссу точки пересечения графика вероятности ложного обнаружения с заданным значением $F_{ло}$ назовём минимальным значением коэффициента K и обозначим как K_{min} .



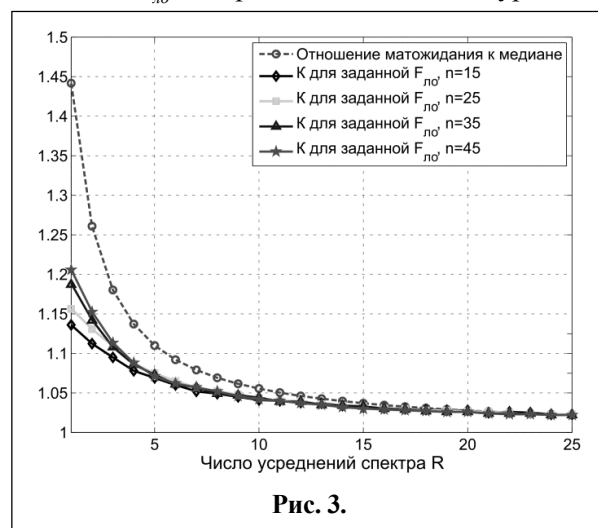
Видно, что с увеличением числа степеней свободы $J=2R$ распределения χ^2 , K_{min} приближается к 1. Это объясняется стремлением распределения χ^2 к нормальному закону и,

следовательно, увеличением симметрии распределения.

Графики, изображённые на рис.3, иллюстрируют зависимость K_{min} от числа усреднённых спектров R для разных значений параметра n алгоритма (2).

Полученный коэффициент пропорциональности K_{min} медианы распределения шумовых спектральных отсчётов позволяет внести поправки в алгоритм (2) для стабилизации вероятности ложного обнаружения на заданном уровне, но не удобен для практического применения, так как при малых значениях R зависит от другого параметра алгоритма - n .

Наиболее удобной для применения статистической характеристикой распределения отсчетов шума в частотной области является среднее значение этих отсчетов. Из графиков на рис. 2,а,б. видно, что для абсциссы кривой ложного обнаружения, соответствующей значению отношения математического ожидания $m_1[x]$ к медиане M_0 спектральных отсчётов, значение $F_{ло}$ не превышает заданного уровня.



На рис. 3 показана зависимость $m_1[x]/M_0$ от числа усреднённых спектров R . Из графика видно, что уже при $R=2$ значение $m_1[x]/M_0$ превышает K_{min} не более чем на 10% и стремится к 0 с ростом R .

Таким образом, применение алгоритма (2) возможно для асимметричного распределения отсчётов спектра шума при замене медиан рас-

пределений в выражении (1) и последующих расчётах соответствующими математическими ожиданиями.

На рис. 4 показаны графики зависимости вероятности ложной тревоги $F_{лм}$ от числа усреднённых спектров R для разных значений параметра n алгоритма (2) при использовании значения $m_1[x]$. При малых R значение $F_{лм}$ получается заметно меньше заданного уровня, что должно сказываться на увеличении вероятности пропуска сигнала. Однако существующие алгоритмы оценки среднего значения отсчётов энергетического спектра аддитивного шума [6, 7] дают погрешности оценки. При значении $R=1$ ошибка оценки значения $m_1[x]$ может достигать 20% и уменьшается с ростом R . Таким образом, в самом худшем случае при заниженной оценке $m_1[x]$ на 20% для случая $R=1$ вероятность ложного обнаружения не превысит заданного значения, что подтверждается графиками на рис.3.

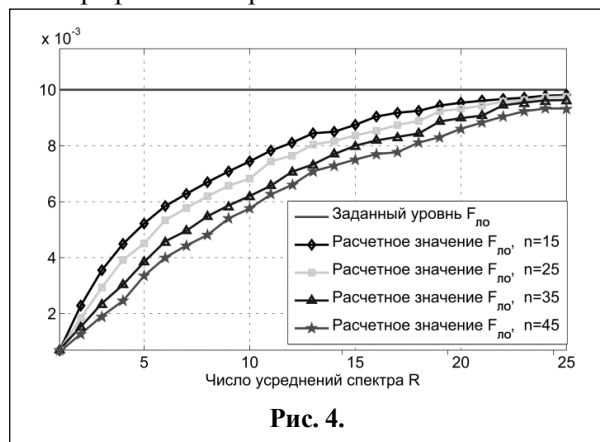


Рис. 4.

Описанный выше алгоритм обнаружения работает наиболее эффективно при длине выборки $n > 15$ [1], поэтому для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала необходимо более 15-ти спектральных отсчетов. Учитывая, что разрешающая способность энергетического спектра по частоте зависит от N и от частоты дискретизации $F_s = 1/T$, и определяется следующим выражением: $\Delta f = F_s/N$, прямое применение данного алгоритма обнаружения снижает разрешающую способность по частоте в 15 и более раз, что неприемлемо для практических приложений. В связи с этим

предлагается модификация рассмотренного выше алгоритма.

Модификация алгоритма обнаружения

Сформируем выборку $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ из первых n спектральных отсчётов, где $x_i = x_i^* - m_1[x_{ui}]$, $i = \overline{1, n}$, x_i^* – отсчёты спектра наблюдаемого процесса (5), $m_1[x_{ui}]$ – математическое ожидание «шумовых» отсчетов спектра, приходящихся на частоты между частотами сигналов. Вычислим статистику T_1^+ , и далее, методом скользящего окна сформируем вторую и последующие выборки вида $X = \{x_j, \dots, x_{j+n}\}$ и вычислим соответствующие им статистики T_j^+ , $j = \overline{1, N-n}$. При таком подходе частотное разрешение модифицированного алгоритма обнаружения по сравнению с исходным ДПФ снизится в $N/(N-n)$ раз. В практических приложениях обычно $N > 1000$, поэтому изменением частотного разрешения можно пренебречь.

Таким образом, с помощью некоторого правила можно поставить в соответствие j отсчётов статистики T_j^+ ($N-n$) отсчётам энергетического спектра x_m^* наблюдаемого процесса и с помощью порога $C_{пор}$, вычисленного по выражению (4), разделить на отсчёты, принадлежащие действующим сигналам $T_{j_{сигн}}^+ \geq C_{пор}$ – «сигнальные» отсчёты, и на отсчёты, принадлежащие шумам $T_{j_{шум}}^+ < C_{пор}$ – «шумовые». Поскольку последовательность T_j^+ на n отсчётов короче вектора энергетического спектра наблюдаемого процесса, необходимо определить правило установки соответствия между x_m^* и T_j^+ .

Выборки статистики T_j^+ , соответствующие действующему в полосе обзора сигналу с шириной полосы B спектральных отсчётов $\{x_{m+1}^*, x_{m+2}^*, \dots, x_{m+B}^*\}$, оказываются смещёнными влево относительно центра полосы сигнала на $n/2$ или на $n/2 + 1$ отсчётов для чётных и не-

чётных значений n соответственно. Поэтому правило установки соответствия между спектральными отсчётами и статистикой суммы положительных знаковых рангов может быть записано следующим образом:

$$T_j^+ \longrightarrow x_{m+n/2}^* \quad (7)$$

$$T_j^+ \longrightarrow x_{m+\frac{n-1}{2}+1}^* \quad (8)$$

Выражение (7) для чётных значений n и (8) для нечётных n , $j = \overline{m+1, N-n}$. Из выражений (7) и (8) видно, что часть отсчётов энергетического спектра невозможно разделить на шумовые и сигнальные. Это необходимо учитывать при практической реализации алгоритма обнаружения сигналов, чтобы исключить вероятность пропуска сигналов на этих частотных участках.

Оценка качества работы предложенного алгоритма может быть произведена по характеристике обнаружения. Однако вывод точного аналитического выражения характеристики обнаружения для конечного числа n весьма затруднителен. Поэтому определение характеристик обнаружения предложенного алгоритма проводилось путём статистического моделирования в пакете прикладных программ технических вычислений. Сравнение эффективности предложенного непараметрического алгоритма проводилось с известным параметрическим алгоритмом обнаружения радиосигналов, обладающим относительно низкой вычислительной сложностью, описанным в [6].

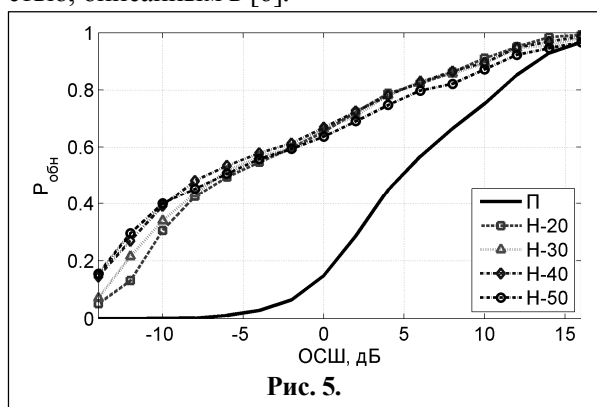


Рис. 5.

В качестве наблюдаемого процесса сформируем радиосигнал с модуляцией GMSK с шириной полосы 200 кГц и аддитивным белым гауссовским шумом. Характеристики обнару-

жения для параметрического (П) и непараметрического (Н) алгоритмов сигнала с модуляцией GMSK определялись для значений параметра n от 20 до 50 и представлены на рис.5. Под вероятностью обнаружения сигнала $P_{обн}$ в данной работе понимается вероятность обнаружения всех спектральных отсчётов, принадлежащих сигналу, в априорно заданной полосе частот.

Видно, что предложенный алгоритм выигрывает в пороговом ОСШ у параметрического около 6 дБ при $P_{обн} = 0,8$, и более - при меньших значениях $P_{обн}$.

Выводы

Предлагаемая модификация непараметрического алгоритма обнаружения позволяет проводить обнаружение сигналов в частотной области в условиях априорной неопределённости о параметрах сигнала и шумов. Эффективность предлагаемого алгоритма по сравнению с известным и применяемым на практике алгоритмом выше на 1–13 дБ по ОСШ для сигналов современных стандартов радиосвязи [8, 9], имеющих различные статистические характеристики, при значениях ОСШ от –16 дБ до 16 дБ [10–15].

Литература

1. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
2. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики: пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1983. 518 с.
3. Обнаружение радиосигналов / П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др.; под ред. А.А. Колосова. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
4. Обнаружение сигналов: учебное пособие / Б. И. Шахтарин. М.: Гелиос АРВ, 2006. 488 с.
5. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
6. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.
7. Токарев А.Б. Сравнительный анализ двух квазиоптимальных оценок интенсивности шума, используемых при панорамном обнаружении радиосигналов // Радиотехника. 2013. № 3. С. 120–124.
8. Дубов М.А., Приоров А.Л. Методика неэталонной оценки отношения сигнал/шум и вероятности

битовой ошибки для сигналов с квадратурной модуляцией // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 4. С. 37–43.

9. Дубов М.А., Приоров А.Л. Исследование эталонных и неэталонных методов оценки вероятности битовой ошибки // Проектирование и технология электронных средств. 2013. № 3. С. 2–6.

10. Стоянов Д.Д., Приоров А.Л., Дубов М.А. Применение одновыборочного критерия Вилкоксона для решения задачи обнаружения сигналов неизвестной формы в частотной области // Нелинейный мир. 2014. № 8. С. 3–9.

11. Стоянов Д.Д., Дубов М.А., Приоров А.Л. Модификация непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 2. С. 37–41.

12. Стоянов Д.Д. Анализ модифицированного непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов // Технические науки: теоретические и прикладные аспекты. Сборник ста-

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-07-31335.

Поступила 15 января 2015 г.

тей Международной научно-практической конференции. Научный Центр "Аэтерна". Уфа, 2014. С. 52–56.

13. Стоянов Д.Д., Хрящев В.В. Алгоритм обнаружения широкополосных радиосигналов в когнитивных радиосистемах // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 19. С. 65–70.

14. Бирюков М.Н., Липкин В.Н. О задаче непараметрического обнаружения-измерения с фиксированным объемом выборки в условиях совместного воздействия шума и размытого (интенсивного) потока помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 1. С. 34–37.

15. Бирюков М.Н., Липкин В.Н. О синтезе непараметрических обнаружителей-измерителей с фиксированными объемами выборок в условиях совместного воздействия шума и размытого (интенсивного) потока помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 1. С. 38–41.

English

Nonparametric approach to signal detection with asymmetric distribution noises background

Dmitry Draganovich Stoyanov – Post-graduate student Dynamics of Electronic Systems Department Yaroslavl State University named after P.G. Demidov.

E-mail: dmdrstoyanov@gmail.com.

Andrey Leonidovich Priorov – Doctor in Engineering, Associate Professor Dynamics of Electronic Systems Department Yaroslavl State University named after P.G. Demidov.

E-mail: andcat@yandex.ru.

Mikhail Andreevich Dubov – Candidate of Engineering, Assistant Dynamics of Electronic Systems Department Yaroslavl State University named after P.G. Demidov.

E-mail: michaeldubov@gmail.com.

Адрес: 150000, Yaroslavl, ulitsa Sovietskaya, 14.

Abstract: Monitoring task of electromagnetic frequency spectrum for the purpose of detection of availability of radiofrequency spectrum not only for government services of radio control, but also for modern cognitive radio systems is becoming more acute. However, the majority of searching wide-band signals algorithms available in open sources needs prior information on the band width or the cycle-stationary interval of the detected signal that is unrealizable in practice. The paper proposes nonparametric detection algorithm based on statistics of Wilcoxon series for radio signals detection of modern communication standards with additive white Gaussian noise background. It is discovered that a detector built on the suggested algorithm has low sensitivity to statistical characteristics of noises and detected radio signals. The performance analysis of the suggested algorithm was done by comparing detection characteristics gained by statistical modeling. Comparison of the modified nonparametric algorithm of signals detection to the common parametric algorithm was performed. The signal detection results with GMSK modulation with band width of 200 kHzs under the conditions of additive white Gaussian noise activity are presented as examples in the paper. The received data analysis certifies that the suggested nonparametric algorithm allows to detect signals in the frequency domain under the conditions of nonparametric prior uncertainty. Its performance is 1-13 dB higher in a threshold signal/noise ratio for signals having different statistic characteristics at 16 dBs to 16 dBs signal/noise ratio values in comparison with the common parametric detection algorithm.

Key words: nonparametric algorithm, broad-band radio signals, radio signals detection.

References

1. Theory of signals detection/ P S. Akimov, P.A. Bakut, V.A. Bogdanovich, etc.; Ed. by P.A. Bakuta. M.: Radio i svyaz 1984. 440 p.
2. Hollender M., Wolf D. Nonparametric methods of statistics: transl. from English M.: Finansy i statistika, 1983. 518 p.
3. Detection of radio signals. - P. S. Akimov, F.F. Evstratov, S.I. Zakharov, etc.; ed. by A.A. Kolosov. M.: Radio i svyaz, 1989. 288 p.
4. Detection of radio signals: textbook. - B.I. Shakhtarin. M.: Helios ARV, 2006. 488 p.
5. Marpl. Jr. S.L. Numerical spectrum analysis and its application. M.: Mir, 1990. 584 p.
6. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kazmin V.A. Radiomonitoring: tasks, methods, means. M.: Goryachaya liniya - Telecom, 2010. 624 p.
7. Tokarev A.B. Comparative analysis of two quasi optimal estimations of noise level used at panoramic detection of radio signals. - Radiotekhnika. 2013. № 3. P. 120-124.
8. Dubov M.A., Priorov A.L. Procedure of non reference estimation of signal-to-noise ratio and probability of a bit error for signals with the quadrature modulation. - Tsyfrofaya obrabotka signalov. 2012. № 4. P. 37-43.
9. Dubov M.A., Priorov A.L. Investigation of reference and non reference methods of probability estimation of a bit error. - Proyektirovanie i tekhnologia elektronnyh sredstv. 2013. № 3. P. 2-6.
10. Stoyanov D.D., Priorov A.L., Dubov M.A. Application of one-sample Wilkison criteria for detection task solution of unknown shape in the frequency domain. - Nelineyny mir, 2014. № 8. P. 3-9.
11. Stoyanov D.D., Dubov M.A., Priorov A.L. Modification of nonparametric algorithm of broad-band radio signals detection. - Proyektirovanie i tekhnologia elektronnyh sredstv. 2014. № 2. P. 37-41.
12. Stoyanov D.D. Analysis of modified nonparametric algorithm of broad-band radio signals detection. - Engineering science: theoretical and applied aspects. Collection of works International scientific - practical conference. Scient. Center "Aeterna". Ufa, 2014. P. 52-56.
13. Stoyanov D.D., Hryashchev V.V. Algorithm of broad-band radio signals detection in cognitive radio systems. - Perspektivy razvitiya informatsionnyh tekhnology 2014. № 19. P. 65-70.
14. Biryukov M.N., Lipkin V.N. About the task of nonparametric detection-measuring with the fixed sample size under the conditions of combined noise impact and dim (intensive) noises flow. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsyonnye sistemy. 2011. № 1. P. 34-37.
15. Biryukov M.N., Lipkin V.N. About synthesis of nonparametric detectors-measuring devices with the fixed sampling set under the conditions of combined noise impact and dim (intensive) noises flow. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsyonnye sistemy. 2011. № 1. P. 38-41.