

УДК 621.391.822:519.863

В. М. БЕЗРУК, С. А. ИВАНЕНКО

Харьковский национальный университет радиоэлектроники «ХНУРЕ», Украина.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ СИГНАЛОВ С УЧЁТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Предметом данной статьи является задача обнаружения неизвестных сигналов в условиях повышенной априорной неопределённости, что может иметь место во время определения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. **Целью** статьи является исследование неклассических алгоритмов обнаружения сигналов на фоне шума в условиях повышенной априорной неопределённости, когда имеется информация лишь о шуме, а сигналы являются неизвестными. **Задачи:** провести сравнительный анализ алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учётом совокупности показателей качества и определить множество Парето-оптимальных алгоритмов обнаружения, а также выявить лучший алгоритм по совокупности показателей качества. Для получения качественных характеристик обнаружения был использован **метод** статистического моделирования алгоритмов обнаружения, реализованных на основе решающих правил, рассмотренных в работе. Для этого была использована их программная реализация в среде MATLAB. В **результате** проведено статистическое моделирование алгоритмов обнаружения на выборках реализаций реальных сигналов и шума с использованием программно-определяемого радиоприёмника, а также специализированного программного обеспечения; получены оценки показателей быстродействия и качества обнаружения сигналов для некоторого множества разных вариантов алгоритмов обнаружения, которое было сформировано с учётом размерности блока преобразования Фурье, а также количества реализаций, которое поступает на обработку для принятия решений. Проведён сравнительный анализ разных типов алгоритмов обнаружения с учётом совокупности показателей быстродействия и качества обнаружения сигналов, а также выполнен многокритериальный выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов. **Выводы.** С использованием условного критерия предпочтения из подмножества Парето выделен единственный предпочтительный вариант алгоритма обнаружения неизвестных сигналов. Результаты исследований могут быть использованы при проведении автоматизированного радиомониторинга в сетях когнитивного радио.

Ключевые слова: радиомониторинг, обнаружение неизвестных сигналов, статистическое моделирование, показатели быстродействия и качества обнаружения, многокритериальная оптимизация.

Введение

В технологии когнитивного радио с целью повышения эффективности использования частотного ресурса осуществляется поиск участков частотного диапазона, которые временно не используются лицензионными пользователями и могут быть предоставлены вторичным пользователям. Для выявления незанятых частотных каналов проводится автоматизированный радиомониторинг заданного частотного диапазона [1-3]. В результате анализа сигнально-помеховой обстановки принимается решение о действии в каждом частотном канале либо смеси сигнала с шумом, либо только шума.

Действующие сигналы в частотных каналах имеют, как правило, случайный характер. При этом возникает необходимость решения задач обнаруже-

ния случайного сигнала на фоне шума в условиях априорной неопределённости относительно их вероятностных характеристик. В известных методах обнаружения и распознавания сигналов априорная неопределённость обычно преодолевается с использованием обучающих выборок сигналов и помех [4-7]. Однако специфика радиомониторинга такова, что получить обучающие выборки сигналов, действующих в анализируемых частотных каналах, не представляется возможным. В работе [8] предлагаются к рассмотрению неклассические методы обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума, которые основаны на использовании лишь оценок вероятностных характеристик шума, действующего в частотных каналах. Эти методы обнаружения сигналов могут быть использованы при проведении автоматизированного радиомониторинга с целью выявления незанятых частотных каналов.

Целью данной работы являются сравнительные исследования алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учётом совокупности показателей качества. Проведено статистическое моделирование разных алгоритмов обнаружения на выборках реальных сигналов и шума, действующих в частотных каналах. Найдены оценки совокупности показателей быстродействия и качества обнаружения для некоторого множества допустимых вариантов алгоритмов обнаружения сигналов. Для выбора единственного предпочтительного варианта алгоритма обнаружения неизвестных сигналов с учётом совокупности показателей качества использованы методы многокритериальной оптимизации [9, 10].

Постановка задачи

Полагается, что наблюдения в частотном канале представляются L -мерным вектором дискретных отсчётов \bar{X} с гауссовским распределением. Наблюдения представляют собой либо шум, либо аддитивную смесь неизвестного сигнала с шумом. Вероятностные характеристики сигналов и шума априори являются неизвестными. Полагается, что задаётся обучающая выборка реализаций для шума $\bar{X}_r, r = \overline{1, n}$.

Для указанных условий решающее правило обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума сводится к сравнению с порогом махаланобисового расстояния вектора \bar{X} до эталона и определяется следующими соотношениями:

$$H^1 : (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) > \Delta \quad (1a)$$

- принимается гипотеза о действии неизвестного сигнала на фоне шума;

$$H^0 : (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) \leq \Delta \quad (1b)$$

- принимается гипотеза о действии только шума.

Здесь $\bar{\mu}^0, R^0$ – средний вектор и корреляционная матрица шума, Δ – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги. Оценки неизвестных параметров шума $\bar{\mu}^0, R^0$ определяются по его обучающей выборке $\bar{X}_r, r = \overline{1, n}$.

Для случая, когда отсчёты наблюдений \bar{X} являются некоррелированными, корреляционная матрица R^0 становится диагональной и решающее правило (1) упрощается и сводится к сравнению с порогом евклидовых расстояний наблюдений до эталона.

В случае представления наблюдений \bar{X} в некотором ортонормированном базисе и в предположении некоррелированности координат вектора спектральных отсчётов $\bar{C} = X^T B$, решающее правило обнаружения неизвестных сигналов имеет вид:

$$\begin{aligned} H^1 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &> \Delta_c^0; \\ H^0 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &\leq \Delta_c^0, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_j – спектральные отсчёты наблюдений; $\mu_j^0, (\sigma_j^0)^2$ – оценки математических ожиданий и дисперсий спектральных отсчётов; N – размерность спектрального представления наблюдений; Δ_c^0 – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Если для принятия решений предъявляется выборка наблюдений \bar{X}_v объёмом v реализаций, решающее правило (2) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} H^1 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &> \Delta_v^0; \\ H^0 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &\leq \Delta_v^0. \end{aligned} \quad (3)$$

При обеспечении соответствующих нормировок, приводящих к равенству дисперсий в спектральном представлении сигналов, может быть использовано более простое решающее правило:

$$\begin{aligned} H^1 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_j^0)^2 &> \Delta_v^0; \\ H^0 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_j^0)^2 &\leq \Delta_v^0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для случая принятия решений по выборке наблюдений \bar{X}_v , представленных в некотором ортонормированном базисе, решающее правило обнаружения неизвестных сигналов базируется на сравнении близости оценок энергетического спектра наблюдений до эталона:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{j=1}^N (G_j - G_j^0)^2 > \Delta_G; \\ H^0: \sum_{j=1}^N (G_j - G_j^0)^2 \leq \Delta_G. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь эталон $G_j^0 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n c_{jr}^2$, $j = \overline{1, N}$ – это оценки координат энергетического спектра помехи, найденные по обучающей выборке помехи объемом n реализаций; $G_j = \frac{1}{v} \sum_{r=1}^v c_{jr}^2$, $j = \overline{1, N}$ – текущие оценки координат энергетического спектра наблюдений, полученные по выборке наблюдений \bar{X}_v меньшего объема $v \ll n$.

Для решения сформулированной задачи обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума может быть также использован наиболее простой энергетический метод обнаружения сигналов, который определяется следующим решающим правилом:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{j=1}^N c_j^2 > \Delta^0; \\ H^0: \sum_{j=1}^N c_j^2 \leq \Delta^0, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δ^0 – некоторое пороговое значение, определяемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Приведённые решающие правила (1) - (5) определяют нетрадиционные алгоритмы обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума, которые могут быть использованы для выявления незанятых частотных каналов при автоматизированном радиомониторинге.

Исследования и многокритериальный выбор алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов

Проведены сравнительные исследования алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума, которые основаны на рассмотренных выше решающих правилах (1) - (6), реализованных в ортонормированном базисе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ).

При исследованиях оценивались показатели быстродействия работы алгоритмов обнаружения и показатели качества обнаружения сигналов. В качестве показателей качества обнаружения неизвест-

ных сигналов использовались вероятность пропуска сигналов и вероятность ложной тревоги. В качестве показателя быстродействия работы алгоритмов выбрано время наблюдения, требуемое для принятия решений конкретным алгоритмом обнаружения.

Исследования показателей качества обнаружения неизвестных сигналов были проведены методом статистических испытаний на выборках реальных сигналов и шума, которые были получены с помощью SDR приёмника, подключённого к компьютеру [12]. Получены записи в оцифрованном виде выборок реализаций сигналов и шума, действующих в выбранных частотных каналах с полосой 125 кГц в ультракоротковолновом диапазоне. Накоплены обучающие и контрольные выборки сигналов и шума объемом по 1000 реализаций. Каждая реализация включала 256 дискретных отсчётов наблюдений, взятых с частотой дискретизации $f_d = 250$ кГц.

Вначале по обучающей выборке реализаций шума были получены оценки его статистических характеристик в выбранном частотном канале. В частности, построена гистограмма распределений отсчётов шума во временной области, а также найдены оценки его корреляционной функции (рис. 1 и рис. 2).

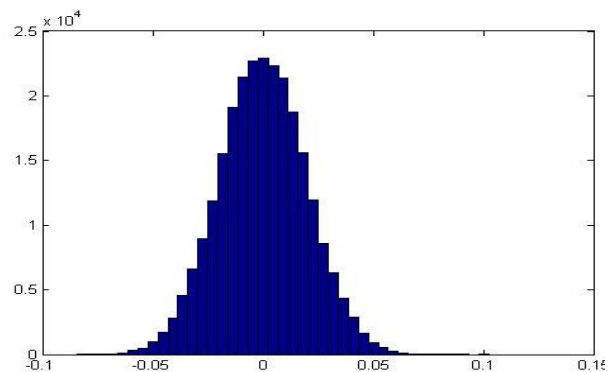


Рис. 1. Гистограмма распределений отсчётов шума во временной области

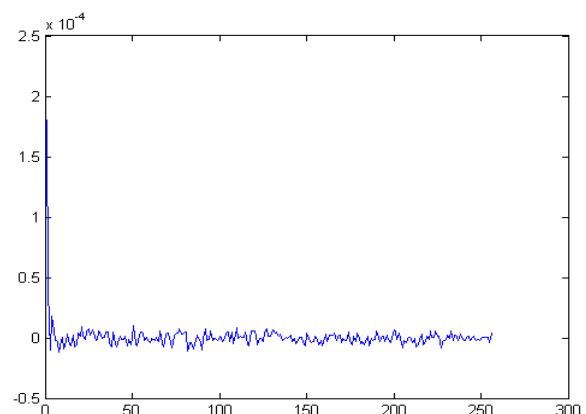


Рис. 2. Корреляционная функция отсчётов шума

Из анализа оценок этих статистических характеристик можно сделать предположение об описании шума в частотном канале случайным процессом с гауссовским распределением и некоррелированными значениями. Рассмотрено также спектральное представление шума в виде отсчётов амплитудного спектра в базисе ДЭФ. Получено, что такое спектральное представление шума подчиняется распределению Райса, которое при определённых условиях переходит в гауссовское распределение. Полученная оценка корреляционной функции амплитудного спектра шума свидетельствует о практически некоррелированности такого спектрального представления. Проведённые исследования дают основание использовать рассмотренные решающие правила обнаружения неизвестных сигналов (1) - (6), которые были получены для таких предположений.

При исследованиях показателей качества обнаружения неизвестных сигналов соответствующие алгоритмы обнаружения реализованы программно на электронно-вычислительной машине с помощью программного комплекса MATLAB. Накопленные обучающие выборки реализаций шума использованы для оценивания параметров алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов. Пороговые значения Δ_v^0 выбраны из условия обеспечения заданного значения вероятности ложной тревоги $P_{(1/0)} = 0,04$, которые задавались одинаковыми для разных структур и параметров алгоритма обнаружения. Исследования проведены для разных видов неизвестных сигналов, действующих на фоне шума в частотном канале. Для примера на рис. 3 приведён амплитудный спектр одного из сигналов с широкополосной частотной модуляцией (ШЧМ), который рассматривался при исследованиях как неизвестный сигнал, действующий на фоне шума в частотном канале.

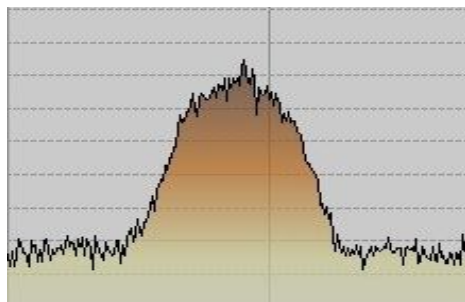


Рис. 3. Спектр сигнала с ШЧМ

Контрольные выборки реализаций сигнала и шума были использованы для нахождения оценок показателей качества для разных типов алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов. Оценки вероятностей пропуска сигналов $P_{(0/1)}$ были получены

путём статистических испытаний как отношение числа опытов n_0 , в которых алгоритмом были приняты неправильные решения об отсутствии сигнала, при условии предъявления реализаций смеси сигнала с шумом, к общему числу опытов n : $P_{(0/1)} = n_0 / n$.

Здесь n было равно объёму контрольной выборки из 1000 реализаций аддитивной смеси сигнала и шума.

Информация о структуре исследованных алгоритмов обнаружения неизвестных приведена в табл. 1.

Таблица 1
Структуры исследованных алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов

Тип алгоритма обнаружения	Базис, в котором представлены наблюдения	Решающее правило
1	Базис ДЭФ	(1)
2	Базис ДЭФ	(3)
3	Базис ДЭФ	(4)
4	Базис ДЭФ	(5)
5	Базис ДЭФ	(6)

Показатель быстродействия работы алгоритмов обнаружения определялся временем, необходимым для принятия решения алгоритмом обнаружения, а также требуемой длительностью наблюдения, по которому принимается решение. В случае практической реализации алгоритмов обнаружения с помощью высокопроизводительных вычислительных средств, показатель быстродействия в основном определяется необходимой длительностью наблюдений, которая зависит от длительности одной реализации наблюдения T , а также от объёма выборки реализаций v , которая используется для принятия решений $T_n = vT$. При этом длительность одной реализации наблюдения T определяется выбранной частотой дискретизации наблюдения и количеством дискретных отсчётов L в одной реализации наблюдения $T = \frac{1}{f_d} L$. За время T формируется спек-

тральное представление наблюдения в виде амплитудного спектра в базисе ДЭФ, получаемое с использованием дискретного преобразования Фурье. В алгоритмах обнаружения сигналов использовалась половина неповторяющихся спектральных отсчётов амплитудного спектра $N = L / 2$.

Полученные в результате исследований оценки показателя быстродействия для каждого варианта алгоритма обнаружения приведены в нормированном виде $k_1 = T_n / T_{n \max}$ в табл. 2. Здесь же приве-

дены значения показателя качества обнаружения неизвестных сигналов в виде оценки вероятности пропуска сигналов $k_2 = P_{(0/1)}$ для 33-х вариантов алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов.

Таблица 2
Результаты выбора подмножества
Парето-оптимальных алгоритмов обнаружения
неизвестных сигналов

Тип	№	Размерность ДПФ L	v	k ₁	k ₂	P
1	1	64	1	0,083	0,260	-
	2	128	1	0,167	0,098	-
	3	256	1	0,333	0,023	+
2	4	64	1	0,083	0,266	-
	5		2	0,167	0,073	-
	6		3	0,250	0,035	-
	7	128	1	0,167	0,106	-
	8		2	0,333	0,036	-
	9		3	0,500	0,010	+
	10	256	1	0,333	0,046	-
	11		2	0,667	0,009	-
	12		3	1,000	0,002	-
3	13	64	1	0,083	0,294	-
	14		2	0,167	0,108	-
	15		3	0,250	0,046	-
	16	128	1	0,167	0,121	-
	17		2	0,333	0,042	-
	18		3	0,500	0,013	-
	19	256	1	0,333	0,055	-
	20		2	0,667	0,009	-
	21		3	1,000	0,002	-
4	22	64	1	0,083	0,216	+
	23		2	0,167	0,065	+
	24		3	0,250	0,030	+
	25	128	1	0,167	0,093	-
	26		2	0,333	0,033	-
	27		3	0,500	0,011	-
4	28	256	1	0,333	0,047	-
	29		2	0,667	0,005	+
	30		3	1,000	0,001	+
5	31	64	1	0,083	0,738	-
	32	128	1	0,167	0,670	-
	33	256	1	0,333	0,519	-

Нетрудно видеть, что значения показателей качества обнаружения неизвестных сигналов и показателей быстродействия алгоритмов связаны между собой и являются противоречивыми (антагонистическими). Это означает, что при переходе от одного варианта алгоритма обнаружения к другому один показатель качества улучшается, а другой показатель качества ухудшается. Поэтому для сравнительного анализа и выбора предпочтительного варианта алгоритма обнаружения неизвестных сигналов следует использовать основные положения теории многокритериальной оптимизации [9].

Был использован ординалистический подход к сравнению вариантов алгоритмов и безусловный критерий предпочтения при многокритериальном выборе предпочтительного алгоритма обнаружения из некоторого множества допустимых вариантов $x \in X$, представленных в критериальном пространстве Y векторных оценок показателей качества $\vec{k}(x) = (k_1, k_2)$. Решение задачи многокритериальной оптимизации сводится к выделению подмножества Парето-оптимальных вариантов на множестве допустимых вариантов X . Для случая, когда множество допустимых вариантов X является дискретным и имеет конечную мощность, включение вариантов $x^{(0)}$ в подмножество Парето $x^{(0)} \in P(X)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует других доминирующих вариантов $x \in X$, для которых выполняется векторное неравенство $\vec{k}(x) \geq \vec{k}(x^{(0)})$ в критериальном пространстве Y .

Согласно приведённому определению формализованная процедура нахождения подмножества Парето-оптимальных оценок в критериальном пространстве Y , которые соответствуют недоминируемым вариантам алгоритмов обнаружения сигналов, определяется следующим соотношением [9, 10]

$$P(Y) = \left\{ \vec{k}(x^{(0)}) \in Y : \exists \vec{k}(x) \in Y : \vec{k}(x) \geq \vec{k}(x^{(0)}) \right\}.$$

При нахождении подмножества Парето согласно этой процедуре исключаются безусловно худшие оценки, а следовательно, и соответствующие им безусловно худшие варианты алгоритмов из множества допустимых вариантов X .

Найденные Парето-оптимальные варианты алгоритмов обнаружения сигналов $x^{(0)} \in P_f(X)$ являются несравнимыми между собой по совокупности показателей быстродействия и качества обнаружения. Поэтому в принципе любой вариант алгоритма обнаружения $x^{(0)}$ из подмножества Парето может быть использован для решения задачи обна-

ружения неизвестных сигналов, оптимального с учётом совокупности показателей качества. Для сужения подмножества Парето до единственного предпочтительного варианта алгоритма обнаружения можно использовать некоторый условный критерий предпочтения, основанный на использовании некоторой дополнительной информации о предпочтениях между собой Парето-оптимальных вариантов алгоритмов обнаружения с учётом совокупности показателей качества. С этой целью могут применяться разные методы, которые базируются на основных положениях теории полезности, теории нечётких множеств, теории лексографических отношений [9, 10].

С использованием приведённой методологии многокритериального выбора из 33 допустимых вариантов было выделено подмножество Парето, включающее семь вариантов алгоритмов обнаружения (в табл. 2 они отмечены знаком "+"). Все остальные варианты алгоритмов обнаружения являются безусловно худшими.

При выборе единственного предпочтительного варианта алгоритма обнаружения среди Парето-оптимальных вариантов использован результирующий показатель качества в виде

$$k_p = d_1 k_1 + d_2 k_2, \quad (7)$$

где k_1 , k_2 – показатели быстродействия и качества обнаружения сигналов; d_j – весовые коэффициенты, определяющие относительную важность частных показателей качества.

Для случая $d_1 = d_2 = 0,5$ из подмножества Парето-оптимальных вариантов алгоритмов выбран единственный предпочтительный вариант алгоритма обнаружения № 23, соответствующий $\min k_p$. Это алгоритм обнаружения неизвестных сигналов по оценкам энергетического спектра наблюдений в базисе ДЭФ, который определяется решающим правилом (5), при размерности наблюдений $L = 64$, объёме выборки реализаций, по которым находятся текущие оценки энергетического спектра наблюдений $v=2$. При этом обеспечивается обнаружение неизвестных сигналов на фоне заданного шума с вероятностью правильного обнаружения $P_{(1/1)} = 0,935$ при вероятности ложной тревоги $P_{(1/0)} = 0,04$. Для принятия решения требуется общая длительность наблюдений, равная $T_H = 512$ мкс.

Заключение

1. Исследованы показатели качества предложенных алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов на фоне заданного шума путём статистического моделирования с использованием выборок реальных сигналов и шумов.

2. Проведён сравнительный анализ и многокритериальный выбор оптимальных алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учётом совокупности показателей быстродействия и качества обнаружения.

3. Получены приемлемые для практики значения показателей качества, что даёт основания рекомендовать рассмотренные алгоритмы обнаружения для выявления незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях.

Литература

1. Weber, C. Automatic modulation classification technique for radio monitoring [Text] / C. Weber, M. Peter, T. Felhauer // *Electronics Letters*. – 2015. – Vol. 51, № 10. – P. 794-796.
2. Рембовский, А. М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства [Текст] / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 641 с.
3. Коханович, Г. Ф. Специальный радиомониторинг [Текст] / Г. Ф. Коханович., В. П. Бабак, В. М. Фисенко. – Киев : МК-Прес, 2007. – 384 с.
4. Duda, R. Review of 'Methodologies of Pattern Recognition' [Text] / R. Duda // *Proc. of Journal IEEE Transactions on Information Theory archive*. – September 1971. – Vol. 17, № 5. – P. 633-634
5. Мерков, А. Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения [Текст] / А. Б. Мерков. – М. : Едиториал УРСС, 2011. – 260 с.
6. Helstrom, C. W. Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation [Text] / C. W. Helstrom // Elsevier. – 2013. – Vol. 9. – 476 p.
7. Poor, H. V. An introduction to signal detection and estimation. [Text] / H. V. Poor. – Springer Science & Business Media, 2013. – 410 p.
8. Безрук, В. М. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля [Текст] / В. М. Безрук, Г. В. Певцов. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 430 с.
9. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.

10. Безрук, В. М. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций [Текст] / В. М. Безрук, Д. В. Чеботарёва, Ю. В. Скорик. – Харьков : СМІТ, 2017. – 267 с.

11. Frenzel, Lou. SDR and CR Boost Wireless Communications [Electronic resource] / Lou Frenzel // Electronic Design. – Access mode: <http://www.electronicdesign.com/dsps/sdr-and-cr-boost-wireless-communications>. – 12.02.2018.

References

1. Weber, C., Peter, M., Felhauer, T. Automatic modulation classification technique for radio monitoring. *Electronics Letters*, 2015, vol. 51, no. 10, pp. 794-796.

2. Rembovskij, A. M., Ashihmin, A. V., Koz'min, V. A. Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva [Radiomonitoring: tasks, methods, means]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom Publ., 2012. 641 p.

3. Kohanovich, G. F., Babak, V. P., Fisenko, V. M. Special'nyj radiomonitoring [Special radiomonitoring]. Kiev, MK-Pres Publ., 2007. 384 p.

4. Duda, R. Review of 'Methodologies of Pattern Recognition'. *Proc. of Journal IEEE Transactions on Information Theory archive*, September 1971, vol. 17, no. 5, pp. 633-634.

5. Merkov, A. B. Raspoznavanie obrazov. Vvedenie v metody statisticheskogo obuchenija [Pattern

recognition. Introduction to statistical learning methods]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2011. 260 p.

6. Helstrom, C. W. Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation. Elsevier, 2013, vol. 9. 476 p.

7. Poor, H. V. An introduction to signal detection and estimation. Springer Science & Business Media, 2013. 410 p.

8. Bezruk, V. M., Pevcov, G. V. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya sistem raspoznavaniya signalov dlja avtomatizirovannogo radiokontrolja. [Theoretical basis of signal recognition systems design for automated radio monitoring]. Kharkov, Kollegium Publ., 2007. 430 p.

9. Nogin, V. D. Prinjatie reshenij v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod. [Decision-making in a multicriteria environment: a quantitative approach]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002. 176 p.

10. Bezruk, V. M., Chebotaryova, D. V., Skorik, J. V. Mnogokriterial'nyj analiz i vybor sredstv telekommunikacij [Multi-criteria analysis and choice of means of telecommunication]. Kharkiv, SMIT Publ., 2017. 267 p.

11. Frenzel, Lou. SDR and CR Boost Wireless Communications. *Electronic Design*. Available at: <http://www.electronicdesign.com/dsps/sdr-and-cr-boost-wireless-communications> (accessed 12.02.2018).

Поступила в редакцію 16.04.2018, рассмотрена на редколлегии 16.05.2018

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ СУКУПНОСТІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ

В. М. Безрук, С. А. Іваненко

Предметом даної статті є завдання виявлення невідомих сигналів в умовах підвищеної апіорної невизначеності, що може мати місце під час визначення незайнятих частотних каналів в когнітивних радіомережах. Варто відзначити, що велика кількість джерел радіовипромінювання, які присутні в ефірі, ускладнює вирішення задачі виявлення, так як завчасно неможливо сказати, який саме сигнал буде прийнятий. Велика кількість існуючих алгоритмів виявлення потребує інформації, щодо сигналів, які потрібно виявити. При цьому, на практиці, неможливо мати дані щодо всіх видів сигналів через їх велику кількість. Тому **метою** статті є дослідження неklasичних алгоритмів виявлення сигналів на фоні шуму в умовах підвищеної апіорної невизначеності, коли є інформація лише про шум, а сигнали є невідомими. **Завдання:** провести порівняльний аналіз алгоритмів виявлення невідомих сигналів з урахуванням сукупності показників якості і визначити множину Парето-оптимальних алгоритмів виявлення, а також виявити кращий алгоритм по сукупності показників якості. Для отримання якісних характеристик виявлення було використано **метод** статистичного моделювання алгоритмів виявлення, реалізованих на основі вирішальних правил, розглянутих у роботі. Для цього була використана їх програмна реалізація в середовищі MATLAB. В **результаті** проведено статистичне моделювання алгоритмів виявлення на вибірках реальних реалізацій сигналів і завд з використанням програмно-обумовленого радіоприймача, а також спеціалізованого програмного забезпечення; отримано оцінки показників швидкодії і якості виявлення сигналів для деякої кількості різних варіантів алгоритмів виявлення, яке було сформоване з урахуванням розмірності блоку перетворення Фур'є, а також кількості реалізацій, яка поступає на обробку для прийняття рішень. Проведено порівняльний аналіз різних типів ал-

горитмів виявлення з урахуванням сукупності показників швидкодії і якості виявлення сигналів, а також виконаний багатокритеріальний вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів. **Висновки.** З застосуванням умовного критерію переваги з підмножини Парето виділено єдиний прийнятний варіант алгоритму виявлення невідомих сигналів. Результати досліджень можуть бути використані при проведенні автоматизованого радіомоніторингу в мережах когнітивного радіо.

Ключові слова: радіомоніторинг, виявлення невідомих сигналів, статистичне моделювання, показники швидкодії і якості виявлення, багатокритеріальна оптимізація.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR DETECTING OF UNKNOWN SIGNALS WITH A GIVEN SET OF QUALITY INDICATORS

V. M. Bezruk, S. A. Ivanenko

The **subject** of this article is the problem of detecting unknown signals in conditions of high a priori uncertainty, which can occur during the determination of unoccupied frequency channels in cognitive networks. It should be noted that various sources of radio emissions work on the air, which in turn complicates the solution of the problem of detection, since it is impossible to say what kind of signal will be received. Most existing algorithms require information about the signals for their operation. In practice, it is not possible to have such data on all sources of radio emission due to their diversity. The **goal** of the article is to study non-classical signal detection algorithms in conditions of high a priori uncertainty, when there is information only about noise, and signals are unknown. The **task**: to conduct a comparative analysis of unknown signal detection algorithms based on a set of quality indicators and to determine the set of Pareto-optimal detection algorithms, as well as to identify the best algorithm for a set of quality indicators. The **method** of statistical modeling of detection algorithms on samples of real signals and noise is performed. As a **result**, we obtained estimates of speed of work and quality of signal detection for a number of different variants of unknown signal detection algorithms. Possible variants of implementation of the detectors were summarized in the table. These variants were formed taking into account the dimension of the DPF sample and the number of implementations on which the decision is made. A comparative analysis of different types of detection algorithms is carried out taking into account the set of performance indicators and the quality of signal detection. It should be noted that the values of quality indicators of detection of unknown signals and performance indicators of the algorithms are related and contradictory. **Conclusions.** A multicriteria selection of a subset of Pareto-optimal variants is performed. Using the conditional preference criterion, the only preferred variant of the algorithm for detecting unknown signals is selected from the Pareto subset. The results of the research can be used in automated radio monitoring in cognitive radio networks.

Keywords: radio monitoring, detection of unknown signals, statistical modeling, performance and quality of detection, multicriteria optimization.

Безрук Валерій Михайлович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційно-мережної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, e-mail: valeriy_bezruk@ukr.net.

Іваненко Станіслав Андрійович – асистент каф. інформаційно-мережної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, e-mail: stanislav.ivanenko@nure.ua.

Bezruk Valeriy Mihajlovich – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department «Information and Network Engineering», Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: valeriy_bezruk@ukr.net.

Ivanenko Stanislav Andreevich – Assistant of Department «Information and Network Engineering», Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: stanislav.ivanenko@nure.ua.