

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ 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 учетом совокупности показателей качества и определить множество Парето-оптимальных алгоритмов обнаружения, а также выявить лучший алгоритм по совокупности показателей качества. Для получения качественных характеристик обнаружения были 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. Проведен сравнительный анализ разных типов алгоритмов обнаружения с учетом 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 обнаружения 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 учетом сово-

купности показателей качества использованы методы многокритериальной оптимизации [9,10].

Постановка задачи

Полагается, что наблюдения в частотном канале представляются L -мерным вектором дискретных отсчетов \vec{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 задается обучающая выборка реализаций для шума $\vec{X}_r, r = \overline{1, n}$.

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

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

- принимается гипотеза о действии неизвестного сигнала на фоне шума;

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

- принимается гипотеза о действии только шума.

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

Для случая, когда отсчеты наблюдений \vec{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 \vec{X} в некотором ортонормированном базисе и в предположении некоррелированности координат вектора спектральных отсчетов $\vec{C} = X^T V$, 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 отсчеты наблюдений; $\mu_j^0, (\sigma_j^0)^2$ – оценки математических ожиданий и дисперсий спектральных отсчетов; N – размерность спектрального представления наблюдений; Δ_c^0 – некоторое пороговое значения, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Если для принятия решений предъявляется выборка наблюдений \vec{X}_v объемом 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 \vec{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 \vec{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.

Приведенные 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 неизвестных 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, подключенного 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 отсчетов 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 отсчетов шума во временной области, а также найдены оценки его корреляционной функции (рис. 1 и рис. 2).

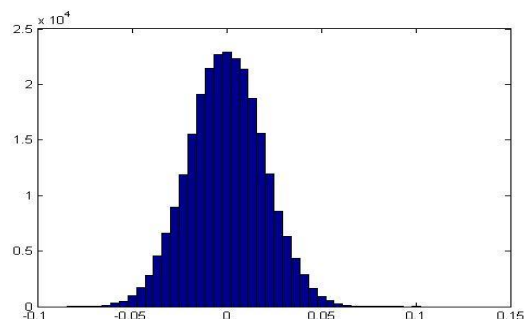


Рис. 1. Гистограмма распределений отсчетов шума во временной области

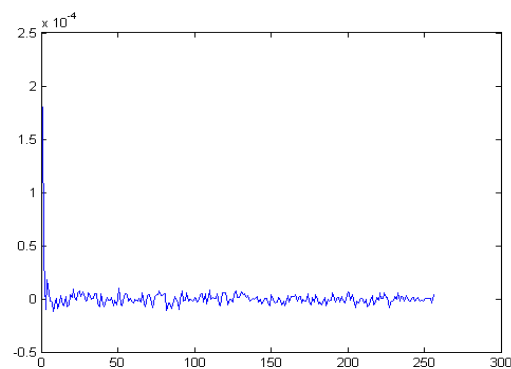


Рис. 2. Корреляционная функция отсчетов шума

Из анализа оценок этих статистических характеристик можно сделать предположение о описании шума в частотном канале случайным процессом с гауссовским распределением и некоррелированными значениями. Рассмотрено также спектральное представление шума в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе ДЭФ. Получено, что такое спектральное представление шума подчиняется распределению Райса, которое при определенных условиях переходит в гауссовское распределение. Полученная оценка корреляционной функции амплитудного спектра шума свидетельствует о практически некоррелированности такого спектрального представления. Проведенные 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_{ν}^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 приведен амплитудный спектр одного из сигналов с широкополосной частотной модуляцией (ШЧМ), который рассматривался при исследованиях как неизвестный сигнал, действующий на фоне шума в частотном канале.

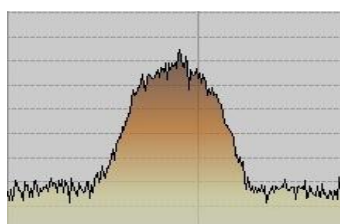


Рис. 3. Спектр сигнала с ШЧМ

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 путем 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 объему 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 объема выборки реализаций ν , которая используется для принятия решений $T_n = \nu T$. При этом длительность одной реализации наблюдения T определяется выбранной частотой дискретизации наблюдения и количеством дискретных отсчетов 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 отсчетов амплитудного спектра $N = L/2$.

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

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 многокритериаль-

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	-
	28		1	0,333	0,047	-
4	29	256	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	-

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

ной 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 приведенному 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 обнаружения неизвестных сигналов, оптимального с учетом 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 учетом совокупности показателей качества. С этой целью могут быть применяться разные методы, которые базируются на основных положениях теории полезности, теории нечетких множеств, теории лексографических отношений [9,10].

С использованием приведенной 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.

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

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 базе ДЭФ, который определяется решающим правилом (5), при размерности наблюдений $L = 64$, объеме 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 путем статистического моделирования с использованием выборок реальных сигналов и шумов.

2. Проведен сравнительный анализ и многокритериальный выбор оптимальных алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учетом 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]*/ Duda, R. // *Proc. of Journal IEEE Transactions on Information Theory archive Vol. 17, № 5, September 1971.* – P. 633-634

5. Мерков, А. Б. *Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения [Текст]* - М. : Едиториал УРСС, 2011. – 260 с.

6. Helstrom, C. W. *Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation [Text]* – Elsevier, 2013. – Vol. 9. – 476 p.

7. Poor, H. V. *An introduction to signal detection and estimation. [Text]* – 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]* – 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 : СМИТ, 2017. – 267 с.

11. *SDR and CR Boost Wireless Communications [Электронный ресурс]* // Режим доступа: <http://www.electronicdesign.com/dsps/sdr-and-cr-boost-wireless-communications>

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, 2012. 641 p.

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

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

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

tion. Introduction to statistical learning methods]. Moscow, Editorial URSS, 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]. Har'kov, Kollegium, 2007. 430 p.

9. Nogin, V. D. *Prinjatje reshenij v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod*. [Decision-

making in a multicriteria environment: a quantitative approach]. Moscow, FIZMATLIT, 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, 2017. 267 p.

11. SDR and CR Boost Wireless Communications [Electronic resource] : <http://www.electronicdesign.com/dsps/sdr-and-cr-boost-wireless-communications>

Рецензент: д-р техн. наук, проф., профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии В.А. Лошаков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

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 апріорної 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 апріорної 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 були використаний **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 завдань з використанням програмно-обумовленого радіоприймача, а також спеціалізованого програмного забезпечення; отримані оцінки показників швидкодії і якості виявлення сигналів для деякого безлічі 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 алгоритмів 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 виділений єдиний прийнятний варіант алгоритму виявлення невідомих сигналів. Результати досліджень можуть бути використані при проведенні автоматизованого радіомоніторинга в мережах когнітивного радіо.

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS OF 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.

Автори:

Безрук Валерій Михайлович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-мережної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, e-mail: valeriy_bezruk@ukr.net

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

Authors:

Bezruk Valeriy Mihajlovich - Professor, Head of Department «Information and Network Engineering», Kharkiv National University of Radio Electronics, doctor of engineering, 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