

Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО, д-р техн. наук, Б.П. МУЛЯР

АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА В СЕТИ КОГНИТИВНОГО РАДИО

Постановка задачи

С появлением сетей мобильной связи сигнально-помеховая обстановка в диапазонах метровых и дециметровых волн стала резко усложняться. Возрастающее количество радиоэлектронных средств различного назначения приводит к образованию множественного характера электромагнитных взаимодействий между ними. Одновременно с этим еще более принципиальным становится дефицит частотного ресурса, обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС). Практически весь частотный диапазон к настоящему времени распределен и лицензирован, однако при этом, как показали исследования Федеральной комиссии связи США, спектр используется недостаточно эффективно. Повысить эффективность использования спектра позволяет механизм когнитивного распределения ресурсов. Согласно этому механизму вторичным пользователям (не закрепленным за данным частотным диапазоном) предоставляется возможность использовать диапазоны первичных пользователей (закрепленных за данным диапазоном) на время, пока этот диапазон не используется первичным пользователем [1 – 6].

Концепция когнитивного радио может быть охарактеризована как радио с изучением возможностей. Свойство когнитивности подразумевает способность радиосистемы решать следующие задачи: переход от одного стандарта к другому; использование нескольких стандартов; перестройку частоты; возможность участия в динамическом распределении спектра; возможность вторичного использования спектра; динамическую оптимизацию емкости; регулировку антенн; реконфигурацию транспортной сети.

Одной из проблем, возникающих при распределении частотного ресурса, может быть отсутствие четких правил принятия решения. В таких случаях, как правило, используют непараметрические алгоритмы и методы, такие, например, как алгоритмы, основанные на математическом аппарате нейронных сетей, или алгоритмы, построенные на математическом аппарате нечеткой логики.

Таким образом, разработка алгоритма распределения частотно-временного ресурса в сети когнитивного радио, основанной на математической модели нечеткой логики, является актуальной научной задачей.

Модель когнитивной сети

Первичные базовые станции (БС) предоставляют блоку управления информацию о частотных ресурсах, которые в данный момент не заняты. Блок управления собирает информацию о свободных частотных диапазонах для последующего распределения между вторичными БС. Вторичные БС, конкурирующие между собой (например, в случае принадлежности различным операторам мобильной связи), выступают в качестве получателей частотного ресурса. База данных хранит информацию о доступных частотных диапазонах, первичных и вторичных БС. Динамическое распределение спектра в рассматриваемой модели осуществляется блоком управления на основе знания о свободных частотных диапазонах. Длительность использования частотного диапазона указывается первичной БС в момент передачи информации блоку управления. В течение данного промежутка времени первичная БС не имеет права использовать данный частотный диапазон, что гарантирует отсутствие интерференции между первичным и вторичным пользователями. Права на использование спектра передаются вторичной БС на заранее определенный интервал времени, по окончании которого частотный диапазон должен быть освобожден.

Измерения в когнитивной сети

Во время процедур подключения к сети абонентской станции (АС), выбора соты, а также процедуры хэндовера необходимо знать, сигнал какой мощности принимает АС от каждой доступной в данной точке БС, чтобы выбрать соту с максимально возможным сигналом. Для этого АС проводит специальные измерения, в рамках которых вычисляется значение RSRP [7].

RSRP (Reference Signal Received Power) – это среднее значение мощности принятых пилотных сигналов (Reference Signal). При сообщении БС RSRP передается не его значение, а индекс из табл. 1.

Таблица 1
Индексы и соответствующие значения RSRP

Индекс	Значение RSRP, дБм
0	$RSRP < -140$
1	$-140 \leq RSRP < -139$
2	$-139 \leq RSRP < -138$
.....
n	$n-139 \leq RSRP < n-140$
.....
96	$-45 \leq RSRP < -44$
97	$-44 \leq RSRP$

Распределение физических ресурсов системы связи между АС

Назначение частотно-временных блоков для передачи сигналов АС происходит в результате процедуры планирования (распределения) физических ресурсов ММО-OFDMA системы связи. Цель этой процедуры заключается в выделении БС поднесущих каждого доступного частотно-временного блока АС, для которых достигается наибольшее значение некоторой метрики (целевой функции) на данной группе поднесущих. В качестве такой метрики может выступать, например, отношение мощности сигнала к мощности помех и шума (ОСПШ). Однако в этом случае доступ к физическим ресурсам системы связи будут получать только АС с высокими значениями ОСПШ.

Поэтому для назначения частотно-временных блоков всем АС в многопользовательских системах связи широкое распространение получил алгоритм пропорционального справедливого распределения физических ресурсов (Proportional Fair, PF) [8, 9]. В соответствии с этим алгоритмом доступ к частотно-временному блоку получает АС i с максимальным значением метрики PF_i , определяемой выражением

$$PF_i = \frac{I_i'}{C_i}, \quad (1)$$

I_i' – мгновенная скорость передачи данных i -й АС, C_i – средняя пропускная способность i -й АС, рассчитанная для некоторого временного интервала.

Для повышения спектральной эффективности ММО-OFDMA сети один и тот же частотно-временной блок может использоваться для обслуживания нескольких АС. В этом случае между сигналами АС появляются взаимные помехи. Для обеспечения ЭМС в передатчике БС необходимо дополнительно проводить пространственную обработку сигналов. В результате такой обработки формируются новые пространственные подканалы, в которых обслуживаются АС.

В данном случае диспетчер контролирует, для каждого момента времени, каким АС нужно распределить части совместно используемого ресурса. Диспетчер также определяет скорость передачи данных, которая должна применяться для каждой АС. Диспетчер определяет производительность всей системы, особенно в очень загруженной сети. Как нисходя-

щая, так и восходящая линии связи в когнитивной сети подвергаются плотному (компактно-му) планированию [7]. Диспетчер для каждого временного момента и частотной области выбирает АС с наилучшим состоянием канала, как показано на рис. 1.

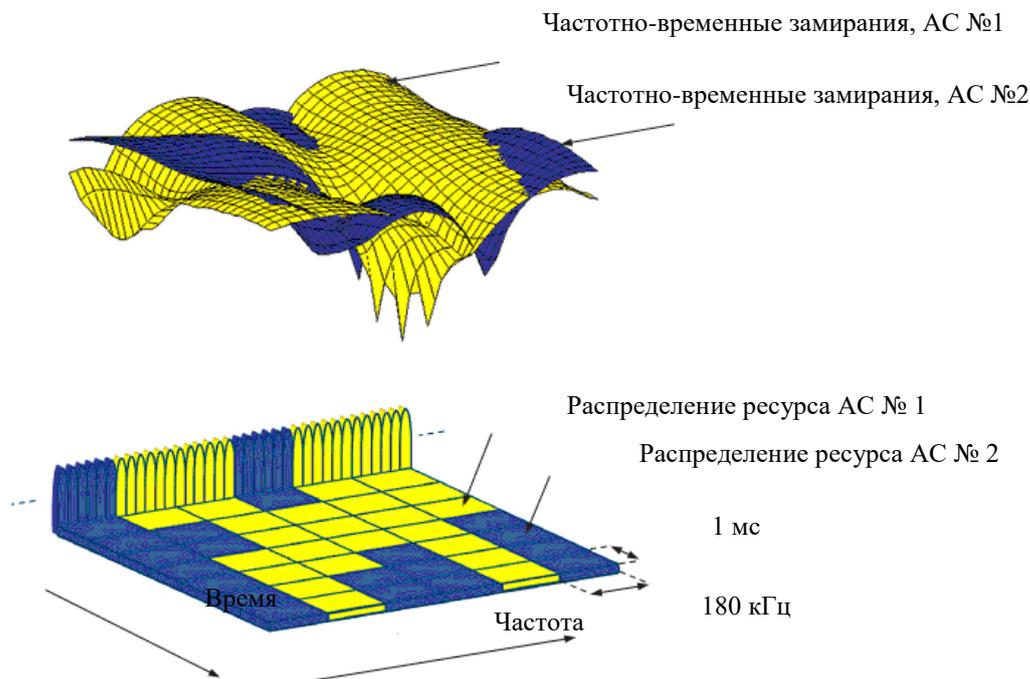


Рис. 1. Распределение ресурсов между АС

Алгоритм распределения частотно-временного ресурса, основанный на математическом аппарате нечеткой логики

Применение нечеткой логики характерно для ситуаций, когда отсутствует не только детерминистская интерпретация решаемой задачи, но и стохастические вероятные методы не удастся применить в силу отсутствия данных о каких-либо распределениях.

Формальный аппарат нечеткой логики включает в себя определения: а) функции принадлежности (ФП), б) лингвистической переменной (ЛП), в) логических операторов MINIMUM, MAXIMUM, г) нечеткого правила «Если...То...» [10]. Нечеткое множество A задается упорядоченной парой: $A = \{(x, \mu_A(x) | x \in X\}$, где x есть порождающий элемент, а $\mu_A(x)$ есть мера принадлежности к множеству A [10]. Функция принадлежности $\mu_A(x)$ принимает значения на отрезке $[0,1]$, $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$, она является выпуклой, непрерывной и нормированной на единицу функцией. В общем случае ФП может иметь и симметричную, и асимметричную форму, поскольку условие выпуклости предопределяет наличие только одного «максимума».

«Компактное» нечетко-логическое описание физических параметров, имитирующее способность человека обозначать словами составные понятия, основывается на понятии лингвистической переменной (ЛП) [10]. Лингвистическую переменную T (также называемую терм-множеством) задают на области определения X как пары множеств $T = \{T^1, T^2, \dots, T^K\}$ и $\mu(x) = \{\mu^1(x), \mu^2(x), \dots, \mu^K(x)\}$, где $k = 1, \dots, K$ и $T^k \rightarrow \mu^k(x)$, т.е. каждый терм T^k для ЛП T имеет нечеткое имя и характеризуется своей ФП $\mu^k(x)$. Принципиально число термов ЛП не ограничено, но на практике оно редко превышает 5-6 [10], иначе возможное число нечетких правил «Если...То...» будет слишком большим. Таким образом, один и тот же физический параметр может быть охарактеризован сразу целым семейством ФП. Конкретный профиль

ФП выбирается на основе экспертных знаний и последующей корректировки в процессе отладки системы [10].

Базовые логические операции в нечеткой логике могут быть определены различными способами (в рамках концепций Т-норм и Т-конорм) [10], но наиболее часто из них используются операторы MIN и MAX. Для двух произвольных множеств «1» и «2», заданных на x , где $x \in X$, и описываемых двумя функциями принадлежности (ФП) $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$, эти операторы могут быть заданы так:

$$\begin{aligned} \text{MIN}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\} &= \mu_1(x) \wedge \mu_2(x) = \text{MINIMUM}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \\ \text{MAX}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\} &= \mu_1(x) \vee \mu_2(x) = \text{MAXIMUM}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где \vee – дизъюнкция, \wedge – конъюнкция.

Для практической реализации такого ограничителя следует перебрать все возможные значения x и для каждой пары значений $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$ выбрать, соответственно, наименьшее или наибольшее значения сигналов из числа подаваемых на входы. В общем случае для выполнения операций MIN и MAX следует проводить аналоговые операции с непрерывными ФП, но на практике обычно применяют дискретные операции, выполняя их для достаточно большого числа градаций по x и μ [10]. С помощью символов логических операций \wedge и \vee , а также символов $\mu(x)$ различных ФП могут быть записаны логические термы и проведены логические вычисления подобно тому, как это делается для традиционных двоичных вычислений с булевыми операторами и символами двоичных переменных.

Среди наиболее известных нечетко-логических формализмов, требующих вычислений логических термов, является правило нечеткого логического вывода [10], называемое также нечетким правилом «Если... То...». В рассматриваемых далее вопросах для наглядности удобнее использовать упрощенную форму записи множества нечетких правил «Если... То...», записываемого в виде набора P выражений (индекс p указывает номер правила, $p = 1, \dots, P$):

$$\begin{aligned} \text{Если } x_1 \text{ есть } \mu_{ap1}, x_2 \text{ есть } \mu_{ap2}, \dots, x_l \text{ есть } \mu_{apl}, \\ \text{То } y_1 \text{ есть } \mu_{bp1}, \dots, y_j \text{ есть } \mu_{bpj}, \text{ иначе...} \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) записано для I входных лингвистических переменных x_1, \dots, x_l и J выходных лингвистических переменных y_1, \dots, y_j . Часть «Если...» называется предпосылкой, часть «То...» – следствием, μ_{api} и μ_{bpj} – метки (компактное обозначение) образцовых ФП предпосылки и следствия $\mu_{ap1}(x_1), \dots, \mu_{apl}(x_l)$ и $\mu_{bp1}(y_1), \dots, \mu_{bpj}(y_j)$. Формализм (3) задает причинно-следственные связи предпосылки и следствия и, в случае наблюдения приближенного значения предпосылки, позволяет сделать приближенный вывод о значениях следствия.

В работе [10] показано, что для проектирования протокола управления ресурсами перспективно использование так называемых “мягких” вычислительных методик, например, основанных на нечеткой логике или генетических алгоритмах. Это позволяет удовлетворить требованиям QoS для пользователей и в то же время максимально использовать ресурсы системы.

Общая структура системы управления частотно-временным ресурсом в сетях когнитивного радио на основе математического аппарата нечеткой логики представлена на рис. 2. Процесс функционирования нечеткой системы управления частотно-временным ресурсом выглядит следующим образом [11]. При установлении нового соединения соответствующая АС сообщает на БС мгновенную скорость передачи данных I_i' и среднюю пропускную способность C_i , рассчитанную для некоторого временного интервала. Затем БС измеряет среднее ОСПШ нового соединения и рассчитывает значение PF_i с последующим переводом их в

значения лингвистических переменных. Эти точные значения входных переменных преобразуются в значения лингвистических переменных при помощи определенных ФП. Запрашиваемые частотно-временные ресурсы используют эту информацию, чтобы получить число подканалов, которые будут назначены. Число подканалов ограничено величинами C_{\min} и C_{\max} , чтобы гарантировать то, что у соединения будет не слишком большое и не слишком малое количество ресурсов передачи.

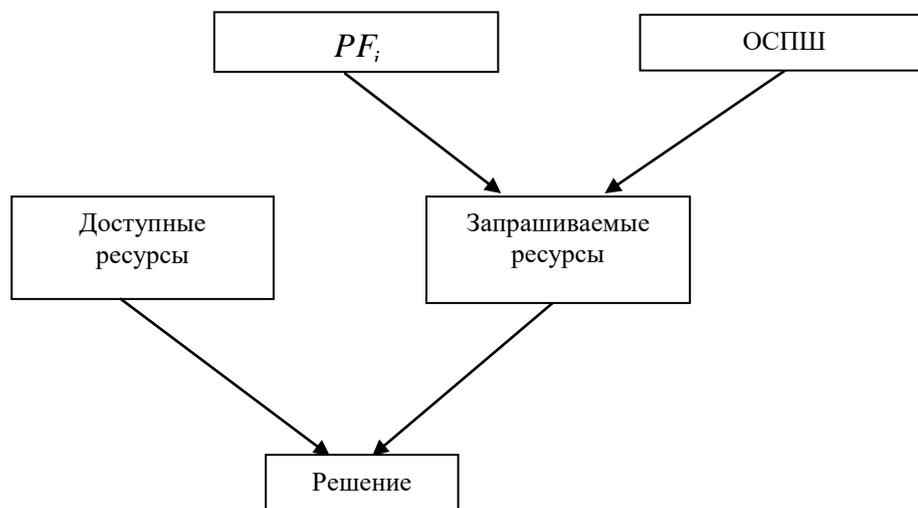


Рис. 2. Схема нечеткого управления частотно-временным ресурсом

На этом этапе осуществляется переход от нечетких значений величин (то есть запрашиваемых ресурсов, и доступных ресурсов) к вероятности предоставления запрашиваемого частотно-временного ресурса. На основе этой вероятности БС принимает или отвергает новое соединение.

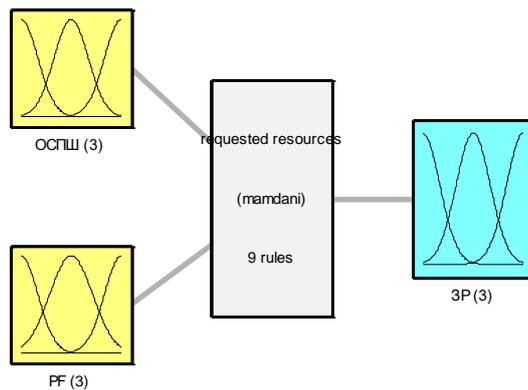
Имитационная модель управления частотно-временным ресурсом, основанная на нечеткой логике

Модуль Fuzzy Logic в среде Matlab позволяет строить нечеткие системы двух типов – Мамдани и Сугэно. Основное отличие между этими системами заключается в разных способах задания значений выходной переменной в правилах, образующих базу знаний. В этой задаче используем алгоритм вывода Мамдани. На рис. 3 представлена система нечеткого вывода для формирования запрашиваемых ресурсов (ЗР).

Для входа ОСПШ заданы три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход, соответственно, как «низкое», «среднее» и «высокое» (рис. 3) в диапазоне от -10 до 40 дБ. С применением пространственно-временного доступа ОСПШ принимает значения от 10 до 40 дБ. Без применения ПВД – от -10 до 20 дБ.

Для входа PF заданы также три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход соответственно как «низкое», «среднее» и «высокое» (рис. 3) в диапазоне от 0 до 1. При этом $PF = 0$ при $I_i' = 0$ и $PF = 1$ при $I_i' = C_i$.

Выходной переменной являются запрашиваемые ресурсы. Для выхода задаются три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует выход соответственно как «низкие», «средние» и «высокие», нормированные в диапазоне от 0 до 1.



System requested resources: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules

Рис. 3. Система нечеткого вывода для формирования запрашиваемых ресурсов

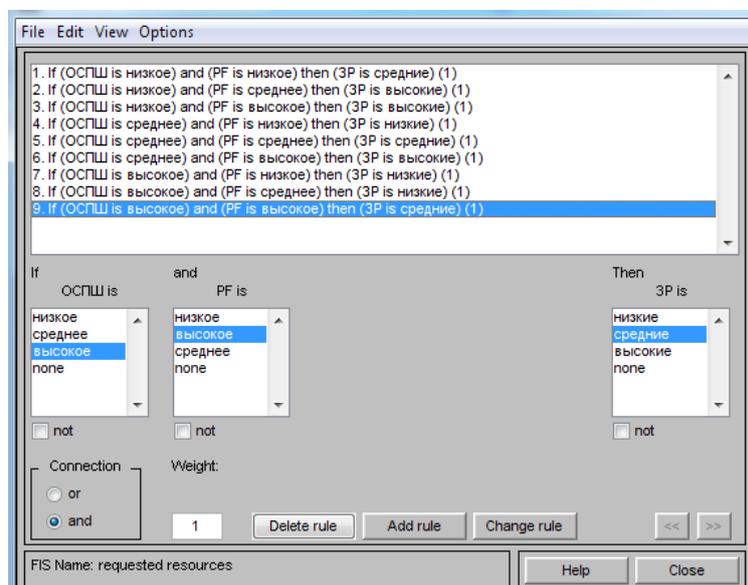


Рис. 4. Правила нечеткого вывода для запрашиваемых ресурсов

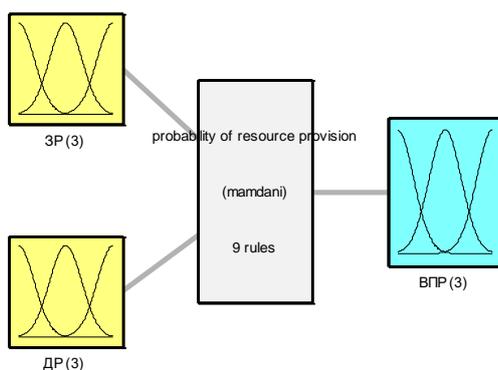
Следующим шагом в формировании задачи является составление правил типа «Если... То...». Например, если ОСПШ – высокое и PF – низкое, то запрашиваемые ресурсы – низкие. Всего создано 9 правил нечеткого вывода (рис. 4).

Создана система нечеткого логического вывода для принятия решения на выделение частотно-временного ресурса (рис. 5). Входными переменными в данном случае являются «запрашиваемые ресурсы» (ЗР) и «доступные ресурсы» (ДР). Выходной переменной является «вероятность предоставления ресурса» (ВПР).

Для входа ЗР заданы три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход, соответственно, как «низкие», «средние» и «высокие» (рис. 5), нормированные в диапазоне от 0 до 1.

Для входа ДР заданы также три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход, соответственно, как «низкие», «средние» и «высокие», нормированные в диапазоне от 0 до 1.

Выходной переменной является ВПР. Для выхода задаются три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует выход, соответственно, как «низкая», «средняя» и «высокая», в диапазоне от 0 до 1.



System probability of resource provision: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules

Рис. 5. Система нечеткого логического вывода для принятия решения на выделение частотно-временного ресурса

Создано 9 правил нечеткого вывода (рис. 6) для ВПР.

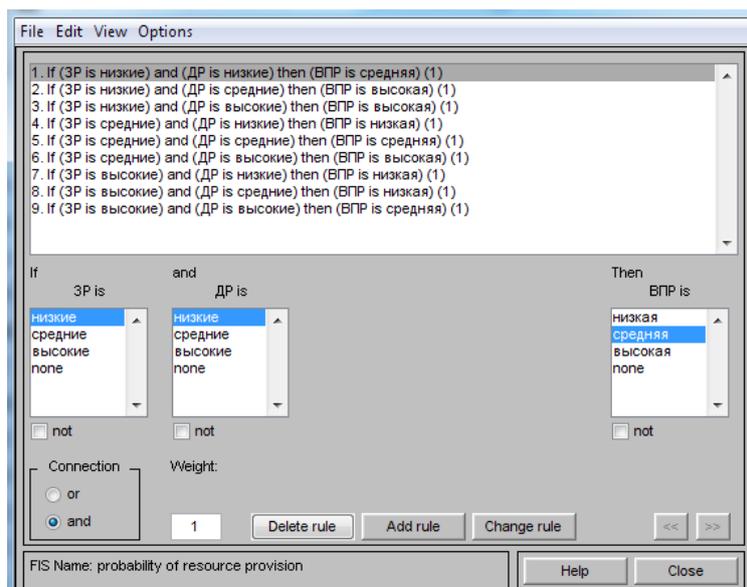


Рис. 6. Правила нечеткого вывода для вероятности предоставления ресурса

Разработанная имитационная модель предназначена для проведения анализа эффективности распределения ресурса в сети когнитивного радио.

Выводы

Предложен алгоритм распределения частотно-временного ресурса в сети когнитивного радио. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является использование как параметра пропорционального справедливого распределения физических ресурсов RF, так и ОСПШ. Кроме того, принятие решение в данном алгоритме, основано на математическом аппарате нечеткой логики. Данный алгоритм применим на этапе функционирования сети при наличии большого количества АС и централизованном управлении частотами со стороны БС.

Список литературы:

1. Tafazolli R. (ed) (2006): Technologies for the Wireless Future, vol. 2. Wireless World Research Forum, (WWRF), John Wiley & Sons, Chichester, England.
2. Burns P. SDR For 3G. Boston, Artech House, 2003. 279 p.
3. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowers wireless communications // IEEE Journal Selected Areas in Communication. Vol. 23, no. 2, February 2005.
4. Стандарты ETSI TR 102 682 V1.1.1 (2009-07), ETSI TR 102 683 V1.1.1 (2009-09), ETSI TR 102 745 V1.1.1 (2009-10), ETSI TR 102 838 V1.1.1 (2009-10).
5. Mitola J. III and Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. 1999. Vol. 6. No. 4. P. 13–18.
6. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications // Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99) // IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, 1999. Nov. P. 3–10.
7. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных : учеб. пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
8. Tse D. Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. New York: Cambridge University Press, 2005. 583 p.
9. Liu L. Proportional fair scheduling for multi-cell multi-user MIMO systems / L. Liu, Y.-H. Nam, J. Zhang // Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2010. P. 1-6.
10. Крылов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети // В.В. Круглов, М.И. Длин, Р.Ю. Голуков. Москва : Физматиз, 2001. 224 с.
11. Аунг М. М. Исследование и разработка алгоритмов планирования и приоритетного управления доступом в сетях WiMAX : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2010.

*Харьковский национальный
университет радиотехники*

Поступила в редколлегию 07.03.2020