

УДК 504.054

# АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ И ДОСТУПОМ СОЕДИНЕНИЙ В СЕТЯХ LTE



[Ю.Ю. Коляденко, А.М. Алали](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – Intensive development of wireless networks poses problems to increase their productivity. Important issues in the area of quality of service are the problem of access control in order to obtain higher bandwidth unbalanced traffic and reduce packet delay. The paper provides a solution to the problem of access control based on fuzzy logic using spatio-temporal access. Solving the problem of providing QoS LTE requires additional resources. One of the most promising is the use of the resources of the spatial resource. In the paper analyzes the effectiveness of access control based on fuzzy logic using a spatio-temporal access by the developed simulation model. The dependencies of the requested resources from the SINR had found. The analysis showed that the use of space-time access saves up to 2 - 3 subchannels. The experimental results showed that the use of spatio-temporal access increases the probability of a successful connection to 0,2-0,35.

**Анотація** – В роботі запропоновано вирішення задачі управління доступом, засноване на нечіткій логіці з використанням просторово-часового доступу. Проведено аналіз ефективності запропонованого методу управління доступом і показано, що застосування цього методу дає економію до 2 – 3 підканалів.

**Аннотация** – В работе предложено решение задачи управления доступом, основанное на нечеткой логике с использованием пространственно-временного доступа. Проведен анализ эффективности предложенного метода управления доступом и показано, что применение этого метода дает экономию до 2 – 3 подканалов.

## Введение

В настоящее время беспроводные сети передачи информации являются одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. LTE - это технология широкополосной беспроводной связи, дополняющая линии DSL и кабельные технологии в качестве альтернативного решения проблемы "последней мили" на больших расстояниях [1]. Интенсивное развитие беспроводных сетей ставит проблемы увеличения их производительности, необходимость разработки алгоритмов, обеспечивающих своевременную и надежную передачу информации, которые повысят коэффициент использования полосы пропускания, сократят время реагирования базовой станции на запросы абонентских станций, обеспечат качество обслуживания (QoS) для различных видов трафика.

Важными проблемами в области обеспечения качества обслуживания являются проблемы управления доступом для ограничения числа соединений с целью предотвращения возможности переполнения и блокировки низкоприоритетных потоков. Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритма управления доступом, для того чтобы получить более высокую пропускную способность при несбалансированном трафике и снизить задержку пакетов.

## I. Обзор существующих алгоритмов управления распределением ресурсов и доступом соединений

Проблема управления доступом соединений активно исследовалась как для проводных, так и для беспроводных систем. Для анализа различных алгоритмов управления доступом соединений были предложены аналитические модели, основанные на цепях Маркова [2]. Однако большинство из этих моделей работают только с уровнем вызовов/соединений (т.е. с вероятностями блокирования новых вызовов и отбрасывания транзитных вызовов) для традиционных голосовых сетей. В беспроводных сетях с коммутацией пакетов, ориентированных на данные, к которым относятся сети LTE, в дополнение к уровню соединений также необходимо рассматривать функционирование на уровне пакетов, т.е. внутри соединений.

Имеется ряд работ, выполненных в области теоретического исследования производительности при помощи систем массового обслуживания (СМО). Две из них посвящены схемам контроля доступом соединений для многоканальной и многопользовательской сети OFDMA. Первая схема основана на пороговом значении, в ней используется концепция охранного канала для ограничения числа принимаемых соединений определенным пороговым значением. Вторая схема основана на информации о состоянии очереди и также использует концепцию небольшого охранного канала, в этой схеме новое соединение принимается с некоторой вероятностью приёма соединения.

Главная цель механизма управления доступом состоит в том, чтобы ограничить количество имеющихся потоков соединений таким образом, чтобы можно было гарантировать производительность качества обслуживания для всех поступающих соединений. На рис. 1 показаны основные компоненты системы управления доступом. Когда оценщик производительности используется для получения текущего состояния системы, распределитель ресурсов использует это состояние для перераспределения имеющихся радиоресурсов (например, временной интервал, код и мощность, и подканалы для сетей TDMA, CDMA, и OFDMA соответственно). Затем, решение управления доступом заставляет принять или отклонить входящее соединение.

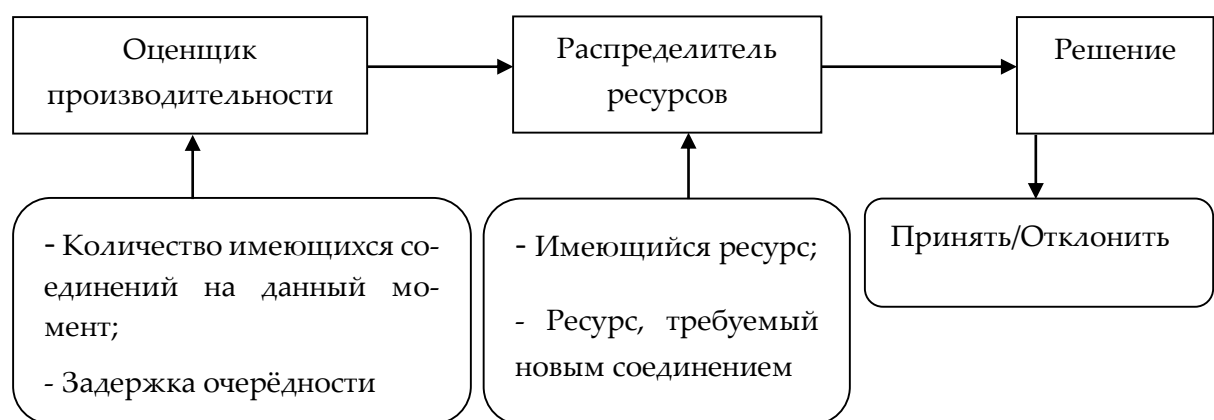


Рис. 1. Основные компоненты управления доступом

Используются два алгоритма управления доступом для абонентских станций, для того чтобы гарантировать характеристики качества обслуживания имеющихся соединений.

### **Алгоритм, основанный на пороговом значении**

В этом случае пороговое значение  $C$  используется для ограничения количества имеющихся соединений. Когда появляется новое соединение, модуль управления доступом проверяет, будет ли общее количество соединений, включая и входящее, меньше или равно пороговому значению  $C$ . Если будет равно или меньше, тогда принимается новое соединение, если не будет равно или меньше, то новое соединение отклоняется.

### **Алгоритм, основанный на анализе очередей**

Этот алгоритм работает на основе вероятности приёма соединения  $p_x$ , которая определяется статусом очереди. Например, когда поступает соединение, модуль управления доступом принимает соединение с вероятностью  $p_x$ , где  $x$  ( $x \in \{0, 1, \dots, X\}$ ) - количество пакетов в очереди в данный интервал времени. Здесь  $X$  обозначает размер очереди данной абонентской станции. Следует заметить, что величину параметра  $p_x$  можно выбрать на основе требований, предъявляемых к производительности радиоканала (например, задержка пакета, вероятность потери пакета).

## **II. Алгоритм, основанный на нечеткой логике**

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

Формальный аппарат нечеткой логики включает в себя определения [3]:

- а) функции принадлежности (ФП),
- б) лингвистической переменной (ЛП),
- в) логических операторов MINIMUM, MAXIMUM,
- г) нечеткого правила «Если...То...».

Нечеткое множество  $A$  задается упорядоченной парой:  $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$ , где  $x$  есть порождающий элемент, а  $\mu_A(x)$  есть мера принадлежности к множеству  $A$  [3]. 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) [3]. 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 [3], 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. Выбор конкретного профиля ФП осуществляется на основе экспертных знаний и последующей корректировки в процессе отладки системы [3].

Базовые логические операции в нечеткой логике могут быть определены различными способами (в рамках концепций Т-норм и Т-конорм) [3], 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:

$$\begin{aligned} \text{MIN}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\} &= \mu_1(x) \wedge \mu_2(x) = \text{MINIMUM}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \\ \text{MAX}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\} &= \mu_1(x) \vee \mu_2(x) = \text{MAXIMUM}\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

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  $\mu$  [3]. 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, имеется правило нечеткого логического вывода [3], 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,  $p = 1, \dots, P$ ):

$$\begin{aligned} \text{если } x_1 \text{ есть } \mu_{ap1}, x_2 \text{ есть } \mu_{ap2}, \dots, x_I \text{ есть } \mu_{apI}, \\ \text{то } y_1 \text{ есть } \mu_{bp1}, \dots, y_J \text{ есть } \mu_{bpJ}, \text{ иначе....} \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) записано для  $I$  входных лингвистических переменных  $x_1, \dots, x_I$  и  $J$  выходных лингвистических переменных  $y_1, \dots, y_J$ . Часть «Если...» называется предпосылкой, часть «То...» – следствием,  $\mu_{api}$  и  $\mu_{bpj}$  – метки (компактное обозначение) образцовых ФП предпосылки и следствия  $\mu_{ap1}(x_1), \dots, \mu_{apI}(x_I)$  и  $\mu_{bp1}(y_1), \dots, \mu_{bpJ}(y_J)$ . Формализм (2) задает причинно-следственные связи предпосылки и следствия и, в случае наблюдения приближенного значения предпосылки, позволяет сделать приближенный вывод о значениях следствия.

В работе [3] 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 доступом в сетях LTE на основе математического аппарата нечеткой логики представлена на рис. 2.

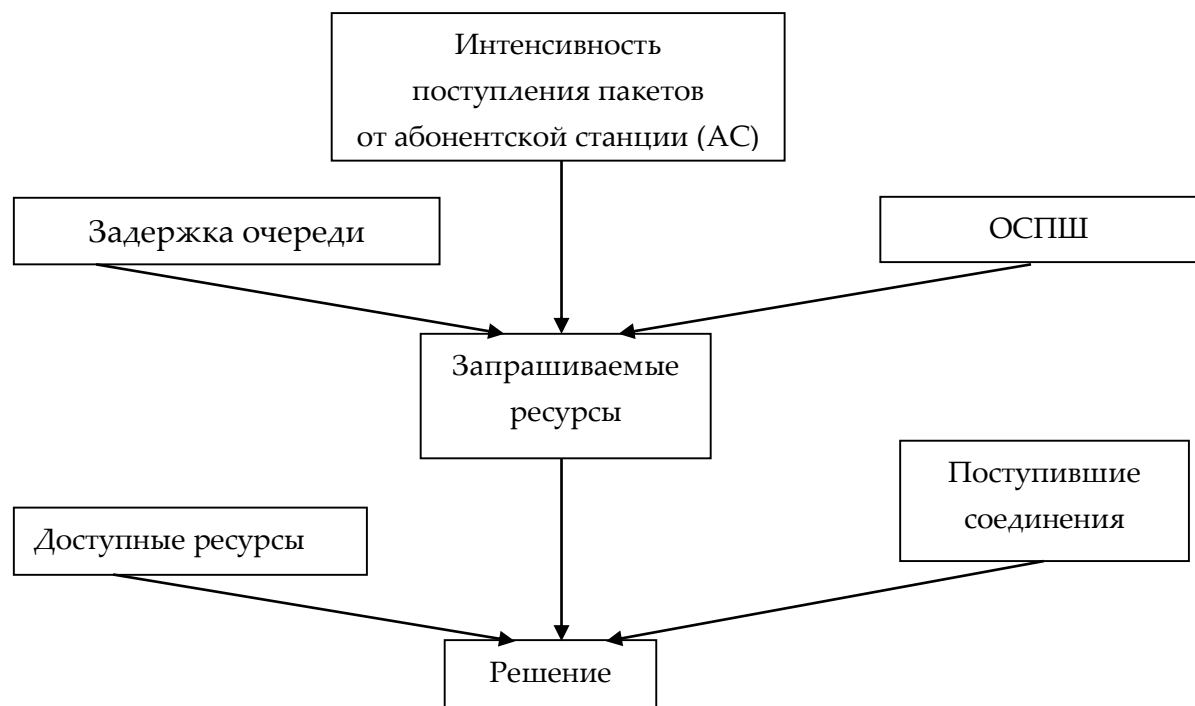


Рис. 2. Схема нечеткого управления доступом

Процесс функционирования нечеткой системы управления доступом выглядит следующим образом [4]. При установлении нового соединения соответствующий мобильный узел сообщает на базовую станцию приблизительные параметры источника трафика (то есть интенсивность поступления пакетов от АС) и задержку очереди. Затем БС измеряет среднее отношение сигнал/помеха+шум (ОСПШ) нового соединения и переводит его в значения лингвистических переменных. Эти точные значения входных переменных преобразуются в значения лингвистических переменных при помощи определенных ФП. Запрашиваемые 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.

Число распределенных подканалов, доступные ресурсы и число поступивших запросов на соединения фаззифицированы в ячейке следующим образом:

$$C_A = (L - (n_1 * b_1 + n_2 * b_2 + n_3 * b_3 + n_4 * b_4)) / L, \quad (3)$$

где  $S_A$  – доступные ресурсы в процентах к общему числу ресурсов;  $L$  – общее число ресурсов;  $n_x$  – число активных соединений для класса  $x$ ;  $b_x$  – число ресурсов, требуемых для класса  $x$ .

На этом этапе осуществляется переход от нечетких значений величин (то есть запрашиваемых ресурсов,  $S_A$  и числа поступивших соединений) к вероятности соединения. На основе этой вероятности БС принимает или отвергает новое соединение.

Из данной системы следует, что повысить вероятность соединения можно при помощи увеличения ОСПШ, а именно при организации пространственно-временного доступа.

### III. Организация пространственно-временного доступа

Решение проблемы обеспечения QoS LTE требует привлечения дополнительных ресурсов. Одним из наиболее перспективных ресурсов является использование пространственного ресурса [5].

Организация связи с пространственно-временным доступом (ПВД) может быть осуществлена в три этапа.

Первым этапом ПВД является организация заявки на связь абонентской станцией. Вторым этапом ПВД является определение направления прихода сигнала абонента. Третьим этапом ПВД является предоставление связи абоненту по узкому лучу, формируемому в соответствии с заявкой многолучевой антенны.

#### 1-й этап

Заявку на связь ретранслятор принимает по широкому лучу. Обеспечение высокой надежности приема заявки может быть достигнуто с помощью широкополосного помехоустойчивого сигнала (ШПС).

Следует заметить, что необходимый эффект достигается за счет широкополосных сигналов не только в частотно-временной, но и пространственной областях. Суть получаемого энергетического выигрыша и выигрыша в помехоустойчивости за счет ШПС в частотно-временной и пространственно-временной областях можно пояснить, используя метод понижения размерности пространства представления сигналов.

Известно, что переход от одномерных представлений сигналов  $S(t)$  к двумерным или более мерным позволяет привлекать дополнительные физические параметры и свойства, расширяющие возможности по их модуляции, обработке, повышению помехоустойчивости и др. Для  $n$ -мерных сигналов могут быть указаны такие важные свойства как поляризация и степень этой поляризации, когерентность и степень когерентности. Для сигналов, расширяющих представление в частотно-временной области возможно получение базы сигнала  $B = \Delta F \cdot \tau \gg 1$ , где  $\Delta F$  - полоса занимаемых частот,  $\tau$  - длительность информационного импульса.

Обработка случайных сигналов в общем случае сводится к получению отображения этого сигнала  $\vec{S}(t)$  из множества его отображения  $\{S\}$  во множество решений  $\{R\}$ , состоящее, как правило, из детерминированных значений:

$$S \xrightarrow{f} R. \quad (4)$$

Алгоритмы реализации оператора (4) различны. Они зависят от целей и критериев решения задач приема, а также тех возможностей и ограничений, в рамках которых приходится решать эту задачу.

Размерности (**dim**) множеств  $\{S\}$  и  $\{R\}$  могут совпадать или быть различными. Из теории множеств известно, что отображение (4) при

$$\mathbf{dim}\{S\} > \mathbf{dim}\{R\} \quad (5)$$

является вырожденным и в общем случае связано с потерей информации. Однако на практике отображение типа (5) часто приходится использовать при приеме и обработке сигналов связи. Так, при обычном выполнении условий на приеме  $\mathbf{dim}\{R\} = 1$  использование пространственного или иного метода разнесения на  $N$  - ветвей, когда  $\vec{S}(t) = (S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t))^T$ , как раз и есть вырожденным отображением значений пространства случайных сигналов размерности  $N$  в одномерное пространство решений  $\{R\}$  на выходе сумматора или демодулятора.

Такого же рода отображение (5) имеет место при ПВОС с использованием адаптивных антенных решеток (ААР) и адаптивных компенсаторов помех (АКП). При этом, если на входе каждого из антенных элементов ААР имеем плотность распределения  $w(\vec{S}(t)/\vec{\xi}(t), t)$ , то на выходе общего сумматора добиваются того, чтобы эта плотность преобразовалась к виду  $w(\vec{S}(t)/\vec{\xi}(t), t) = w(\vec{S}(t), t)$ , что является признаком достаточности статистики и позволяет далее использовать стандартные методы принятия оптимальных решений.

При использовании  $N$ -позиционной псевдослучайной последовательности (ПСП) и при совпадении этой ПСП с опорной эквивалентное соотношение сигнал/шум на выходе общего сумматора увеличивается в базу раз, чем и достигается повышение помехоустойчивости приема во столько же раз.

Выбирая отображение (5) и получая статистику, мы тем самым добиваемся выполнения достаточности этой статистики. Так, при наличии мешающего параметра  $\theta$  условие получения достаточной статистики  $t$ , независимой от  $\theta$ , определяется выражением

$$M\{c(v)\} = \int c(v)h(x/t)g(t/\theta)dx = M\{M(c(v)/t)\}, \quad (6)$$

где математическое ожидание  $M\{\cdot\}$  берется по распределению статистики  $t$ . Таким образом, функция от  $t$   $M(c(v)/t)$  не зависит от  $\theta$ , поскольку  $t$  – достаточная статистика.

## 2-й этап

Известные методы оценки пространственного спектра основаны на выделении и оценке компонентов аддитивной смеси сигналов, приходящих из различных направлений.

Для детерминированных сигналов оценка вектора значений  $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$  производится с помощью разложения Фурье:

$$y_m(\omega_l) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_{-T/2}^{T/2} y_m(t) e^{-j\omega_l t} dt, \quad (7)$$

где  $\omega_l = \frac{2\pi}{T}(l_1 + l)$  - значение пространственной частоты, определяемое по выборке на интервале  $T$  с учетом эквидистантного расположения  $l = 1, 2, \dots, L$  относительно 1-го антенного элемента.

Для случайных сигналов чаще используют алгоритмы Music, Esprit и другие процедуры, основанные на получении собственных значений матрицы пространственной корреляции  $R_{xx}$ . Процедура, основанная на выделении собственных значений, является достаточно громоздкой, поскольку требует большого объема выборки, чаще расходящейся (или слабо обусловленной). Кроме того, возникают ложные отметки, являющиеся результатом мешающих параметров. К мешающим параметрам можно отнести сигналы других станций, прием по боковым лепесткам, а также собственные шумы. Поэтому данные методы не всегда позволяют произвести уверенную оценку элементов пространственного спектра. Более того, для сети LTE данные задачи необходимо решать в реальном масштабе времени при наличии динамической сигнально-помеховой обстановки (СПО).

В работе [6] разработана и проанализирована рекурсивная процедура оценки пространственного спектра. Сама же оценка производится с использованием ААР с так называемым формированием пространственных окон. Таким образом, переходя от одного пространственного окна к другому, мы на каждом переходе формируем нули диаграммы направленности, ориентированные на прочие направления прихода сигналов.

Процедура состоит из трех основных рекурсивных составляющих:

- 1) выделение пространственного окна;
- 2) подавление сигналов, приходящих со всех невыделенных направлений;
- 3) рекурсивное определение отметки соответствия амплитуды и пространственной фазы в выделенном окне.

Ограничение на ширину окна определяется исходя из числа и направленности антенных элементов.

В первой фазе цикла формируется пространственное окно с помощью управляющего вектора:

$$\vec{V}(\theta) = [\exp(\sin(\theta/180) \cdot \pi), \exp(j \sin(\theta/180) \cdot \pi), \dots, \exp(j(n-1) \cdot (\sin(\theta/180) \cdot \pi)), \dots, \exp(j(N-1) \cdot (\sin(\theta/180) \cdot \pi))], \quad (8)$$

где  $n$  – номер антенного элемента,  $n = \overline{0, N-1}$ ,  $N$  – количество антенных элементов,  $\theta$  – угол (направление пространственного окна).

На второй фазе цикла включается процедура подавления сигналов, приходящих по боковым лепесткам. Данная процедура может быть реализована с использованием алгоритмов Уидроу, Калмана-Бьюси, Апфельбаума или других известных алгоритмов управления вектором весовых коэффициентов адаптивной антенной решетки. Так, модификация алгоритма Апфельбаума для подавления сигналов вне выделенного окна имеет следующий вид:

$$\vec{W}(k+1) = \vec{W}(k) - 2\mu(k)[\vec{X}(k)\vec{W}^T(k)\vec{X}(k) - \vec{V}(\theta)], \quad (9)$$

где  $\mu(k)$  – шаговой коэффициент.

Далее выполняется рекурсивная процедура определения отметки соответствия амплитуды и пространственной фазы в выделенном окне:

$$P(k+1, \theta) = P(k, \theta) + \vec{W}(\theta)^T \vec{X}(k) \cdot \vec{X}(k)^T \vec{W}(\theta). \quad (10)$$

К началу третьей фазы переходные процессы второй фазы должны быть завершены. При этом остается отметка о сигнале, попадающем в защитное окно.

Достоинством такого алгоритма является то, что он является достаточно универсальным как для решения задач приема сигналов в условиях многолучевости, где обеспечивается отслеживание максимума этого спектра, так и для решения задач подавления нежелательных сигналов (помех). В последнем случае удается осуществлять подавление различных нестационарных (типа импульсных) помех, поскольку дается оценка их направления прихода  $\{\hat{\theta}\}$ .

### 3-й этап

В качестве алгоритмов формирования пучка узких лучей могут быть использованы программные методы и алгоритмы адаптивных антенных решеток, синтезированные для нестационарной СПО.

При нестационарной СПО происходят пространственно-временные изменения параметров сигнала и помехи. Эти изменения могут происходить из-за влияний среды распространения радиоволн, перемещения приемника или передатчика помехи и других причин. Для такой СПО уравнение состояния вектора весовых коэффициентов (ВВК) для  $m$ -го абонента будет иметь общий вид [5]:

$$\vec{W}_m(k+1) = F(k)\vec{W}_m(k) + G(k)\vec{u}(k), \quad (11)$$

где  $F(k)$  и  $G(k)$  являются соответственно матрицами состояния и интенсивностей изменений параметров сигналов и помех;  $f_{ij}$  – элементы  $i, j = \mathbf{dim} \vec{W}_m(k)$ , являющиеся величинами, обратными коэффициентам взаимной корреляции между  $i$  и  $j$  компонентами;  $\vec{u}(t)$  – порождающий белый гауссов шум со спектральной плотностью мощности  $N_u$ .

Для нестационарной СПО разработаны процедуры [5], определяющие состояние ВВК в динамике:

$$\vec{W}_m(k+1) = F(k)\vec{W}_m(k) + P(k)R_{xx}(k)N_v^{-1} \left[ R_{xx}(k)\vec{W}_m(k) - d(k)_s \right], \quad (12)$$

где  $d(k)_s$  – эталонное значение полезного сигнала (опорный сигнал);  $R_{xx}(k)$  – матрица пространственной корреляции входных сигналов  $R_{xx}(k) = \vec{X}(k) \cdot \vec{X}(k)^T$ ;  $P_m(k)$  – матрица значений апостериорной дисперсии оценки  $\vec{W}_m(k)$   $m$ -го абонента, определяемая из уравнения:

$$P_m(k+1) = F(k)P_m(k) + P(k)F^T(k)P_m(k)R_{xx}(k)N_v^{-1}R_{xx}(k)P_m(k) + G^T(k)N_uG(k). \quad (13)$$

При этом сигнал от  $m$ -го абонента на выходе ААР определяется выражением:

$$y_m(k) = \vec{X}^T(k) \vec{W}_{opt_m} + \tilde{n}(k), \quad (14)$$

где  $\tilde{n}$  – шумы в каналах приема.

Структурная схема организации ПВД с  $N$ -элементной ААР для обеспечения связи с  $m$  абонентами представлена на рис. 3. Согласно данной схеме в устройстве управления ВВК генерируется опорный сигнал  $d(k)$  в соответствии с априорной информацией о направлении прихода сигнала от абонента и формируется ВВК согласно процедуре (12). Далее взвешенный сигнал поступает на сумматор, где реализуется процедура (14), и приемник. Таким образом, для каждого абонента формируется свой узкий луч диаграммы направленности.

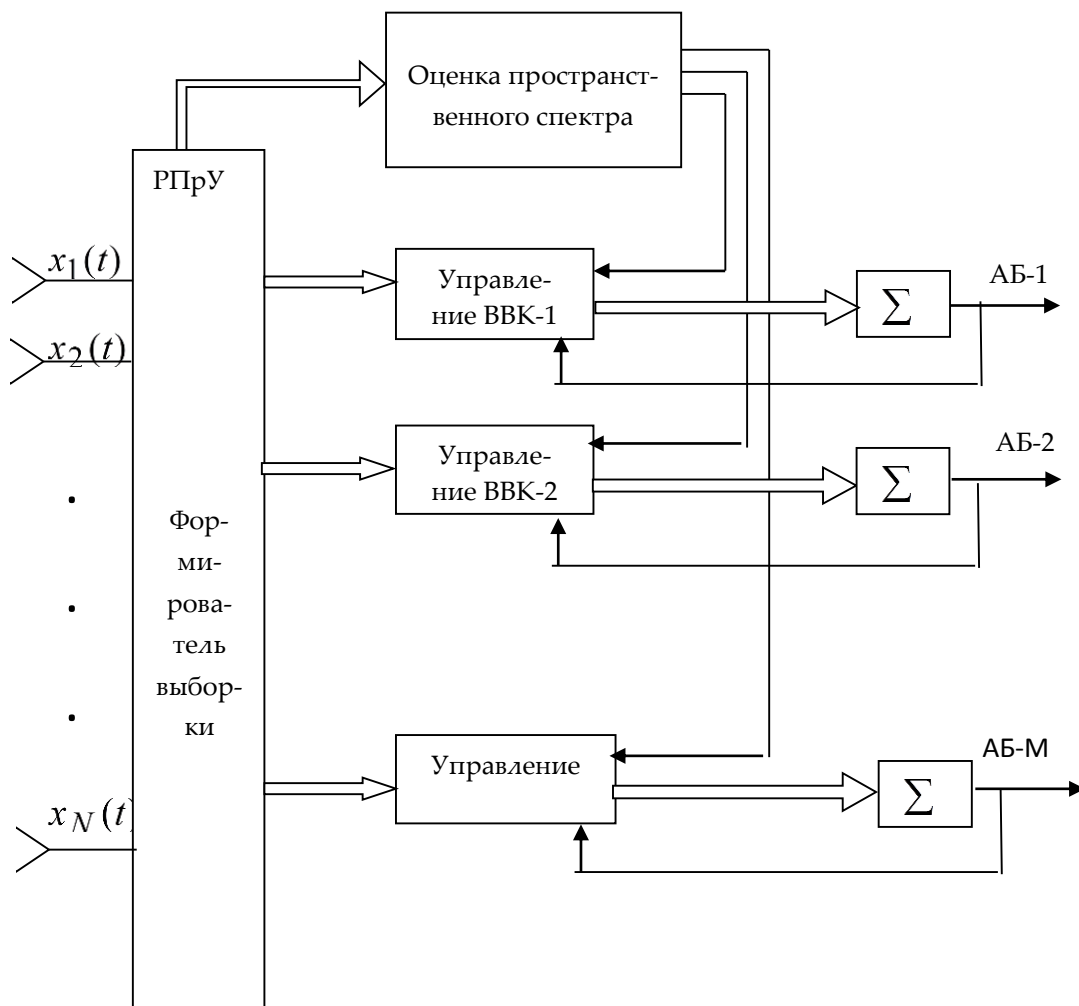


Рис. 3. Структурная схема организации ПВД

На рис 4 представлены графики зависимости ОСПШ на выходе ААР от ОСПШ на входе ААР при количестве антенных элементов  $N = 2$  (нижняя кривая),  $N = 4$  (средняя кривая) и  $N = 8$  (верхняя кривая). Из данных графиков видно, что применение пространственно-временного доступа позволяет повысить ОСПШ на 20 – 30 и более дБ.

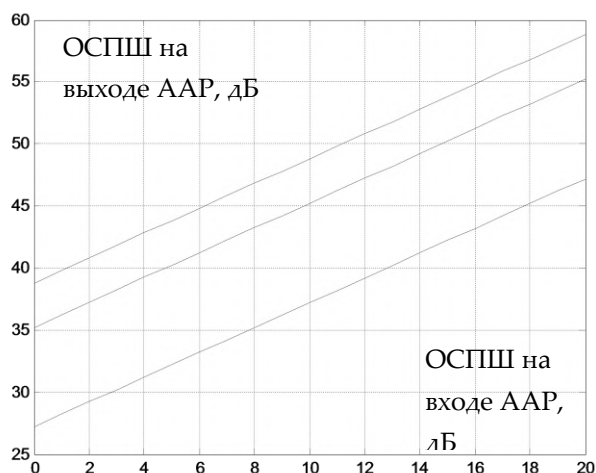


Рис. 4. Графики зависимости ОСПШ на выходе ААР от ОСПШ на входе ААР

#### IV. Имитационная модель пространственно-временного доступа, основанная на нечеткой логике

Модуль Fuzzy Logic 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. 5 представлена система нечеткого вывода для формирования запрашиваемых ресурсов.

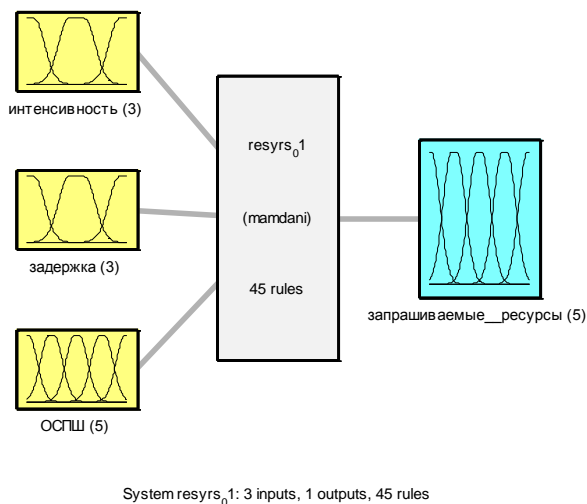


Рис. 5. Система нечеткого вывода для формирования запрашиваемых ресурсов

Для задания ФП необходимо устанавливать диапазон изменения и отображения для переменных входов. Для входа интенсивности задаются три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход, соответственно, как «низкая», «средняя» и «высокая» (рис. 6, а) в диапазоне от 100 до 400.

Для входа задержки задаются три ФП гауссова типа, каждая из которых характеризует вход, соответственно, как «низкая», «средняя» и «высокая» (рис. 6, б) в диапазоне от 0 до 55.

Для входа ОСПШ задаются пять ФП гауссова типа, каждый из которых характеризует вход, соответственно, как «низкое», «ниже среднего», «среднее» «выше среднего» и «высокое» (рис. 6, в) 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.

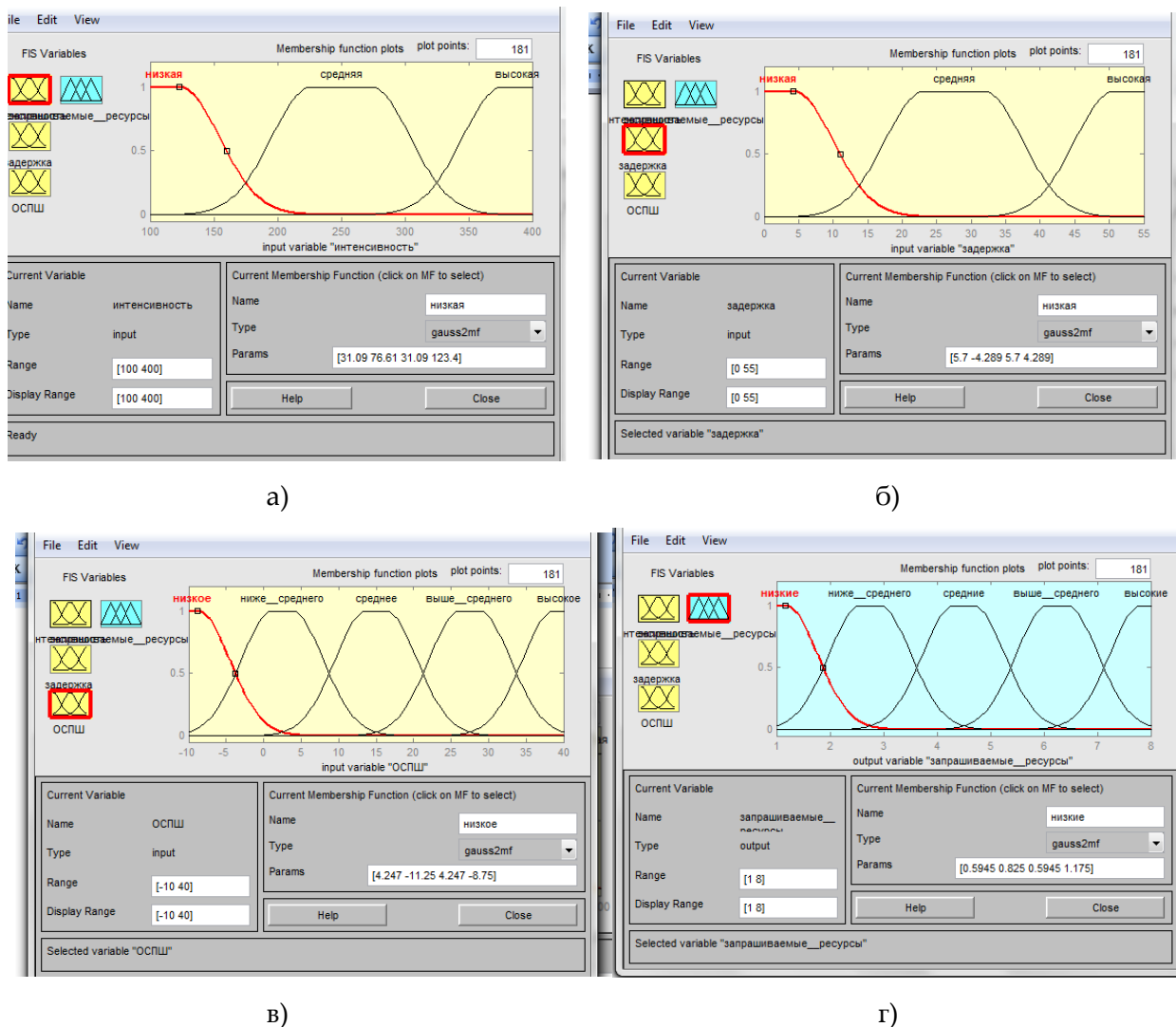


Рис. 6. Фазовые портреты для входных переменных: а) «интенсивность»; б) «задержка»; в) «ОСПШ» и г) выходной переменной «запрашиваемые ресурсы»

Выходной переменной являются запрашиваемые ресурсы. Для выхода задаются пять ФП гауссова типа, каждый из которых характеризует выходы, соответственно, как «низкие», «ниже среднего», «средние» «выше среднего» и «высокие» (рис. 6, г) в диапазоне от 1 до 8 подканалов.

Следующим шагом в формировании задачи является составление правил типа «Если... То...». Например, если интенсивность поступления пакетов от АС – низкая и задержка очереди – низкая и среднее ОСПШ – плохое, то запрашиваемые ресурсы – средние. Всего создано 45 правил нечеткого вывода.

Далее была создана система нечеткого логического вывода для принятия решения на предоставления доступа (рис.7). Входными переменными в данном случае являются «запрашиваемые ресурсы», «доступные ресурсы» и «поступившие соединения». Выходной переменной является «вероятность соединения». Система нечеткого вывода на предоставление соединения имеет 27 правил нечеткого логического вывода.

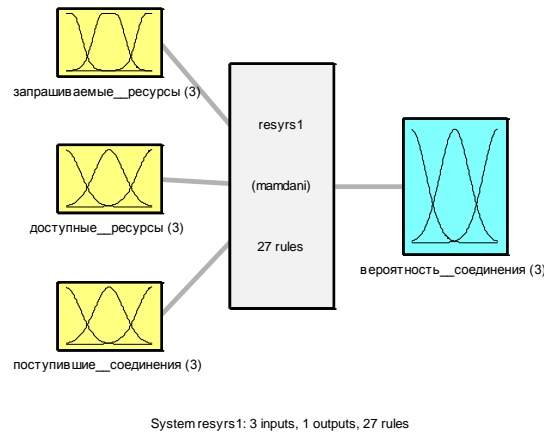
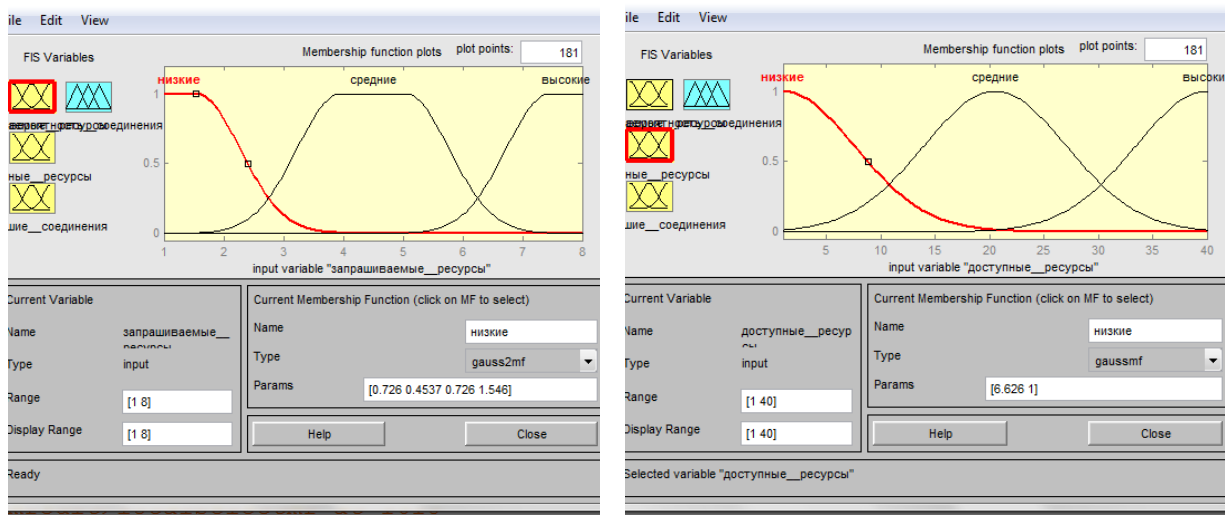


Рис. 7. Система нечеткого вывода для принятия решения на предоставление доступа

На рис. 8, а показаны ФП входной переменной «запрашиваемые ресурсы», которые имеют диапазон изменения от 1 до 8 подканалов. Входная переменная имеет три функции принадлежности гауссова типа, которые интерпретируются как «низкие», «средние» и «высокие».



а)

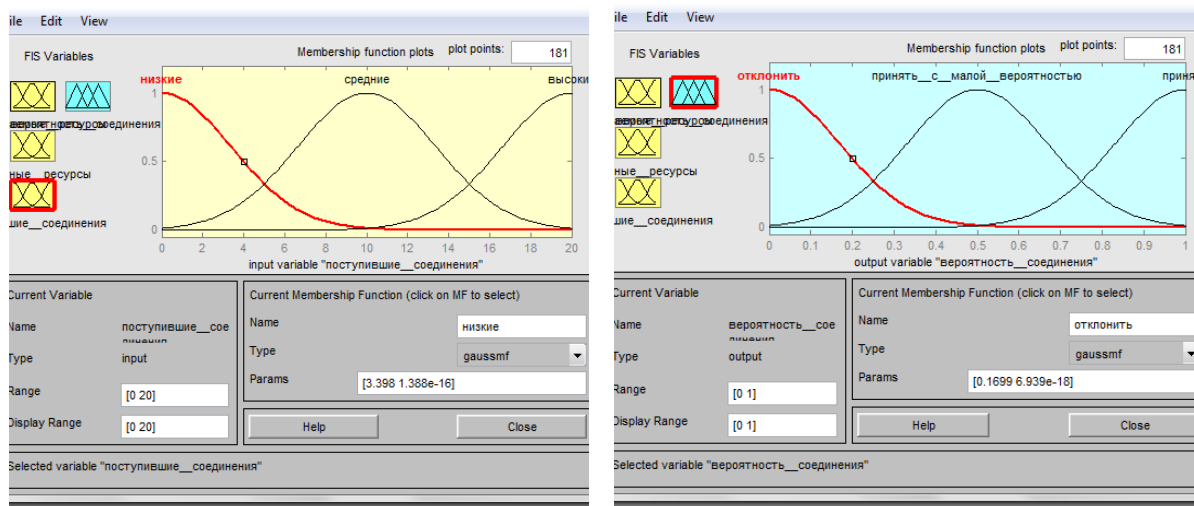
б)

Рис. 8. Фазовые портреты входных переменных а) «запрашиваемые ресурсы»; б) «доступные ресурсы»

На рис. 8, б. показаны ФП входной переменной «доступные ресурсы», которые имеют диапазон изменения от 1 до 40 подканалов. Входная переменная имеет три функции принадлежности гауссова типа, которые интерпретируются как «низкие», «средние» и «высокие».

На рис. 9, а показаны ФП входной переменной «поступившие соединения», которые имеют диапазон изменения от 0 до 20 подканалов. Входная переменная имеет три функции принадлежности гауссова типа, которые интерпретируются как «низкие», «средние» и «высокие».

На рис. 9, б показаны ФП выходной переменной «вероятность соединения», которые имеют диапазон изменения от 0 до 1. Выходная переменная имеет три функции принадлежности гауссова типа, которые интерпретируются как «отклонить», «принять с малой вероятностью» и «принять».



а)

б)

Рис. 9. Фазовые портреты: а) входных переменных «поступившие соединения»;  
б) выходной переменной «вероятность соединения»

## V. Анализ эффективности пространственно-временного доступа, основанного на нечеткой логике

С помощью разработанной имитационной модели проведен анализ эффективности пространственно-временного доступа, основанного на нечеткой логике.

Первый эксперимент состоял в том, что на вход системы нечеткого вывода для формирования запрашиваемых ресурсов подавалось значение ОСПШ, которое изменялось в пределах от - 10 до 30 дБ. Интенсивности поступления пакетов генерировались случайным образом от 100 до 400 пакетов в секунду. Задержка была выбрана максимальной и составила 55 мс.

На рис. 10. представлены графики зависимости запрашиваемых ресурсов от ОСПШ. Верхняя кривая соответствует случаю предоставления доступа без ПВД. Нижняя кривая соответствует случаю предоставления доступа с ПВД. Из данных графиков видно, что применение ПВД дает экономию до 2 – 3 подканалов.

Второй эксперимент состоял в том, что на вход системы нечеткого вывода для принятия решения о предоставлении доступа подавалось значение поступивших соединений, которое изменялось в пределах от 0 до 20. Запрашиваемые ресурсы для системы без ПВД были приняты равными 7 подканалам, а для системы с ПВД – равными

5 подканалам. Число активных соединений  $n_x$  для класса  $x$  генерировались случайным образом от 0 до 5. После чего в соответствии с выражением (3) рассчитывались доступные ресурсы. На рис.11 представлены зависимости вероятности соединения от количества поступивших соединений. Верхняя кривая соответствует случаю системы с ПВД. Нижняя кривая соответствует случаю системы без ПВД. Из данных графиков видно, что вероятность соединения на 0,2 – 0,3 больше для системы с ПВД по сравнению с системой без ПВД.

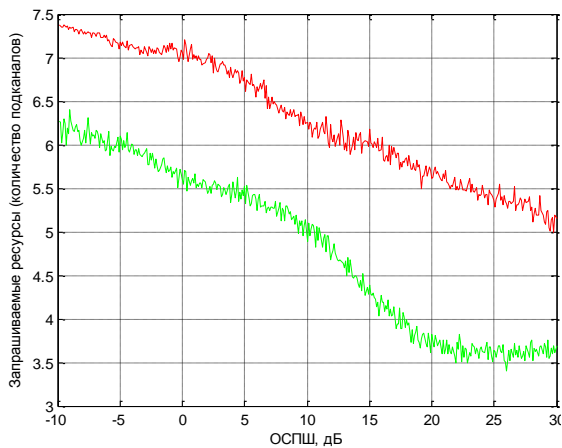


Рис. 10. Графики зависимости запрашиваемых ресурсов от ОСПШ

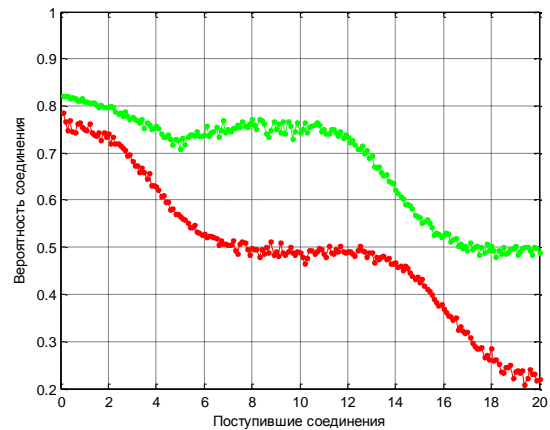


Рис. 11. Графики зависимости вероятности соединения от количества поступивших соединений

Третий эксперимент состоял в том, что на вход системы нечеткого вывода для принятия решения о предоставлении доступа подавалось значение доступных ресурсов, которое изменялось в пределах от 3 до 40 подканалов.

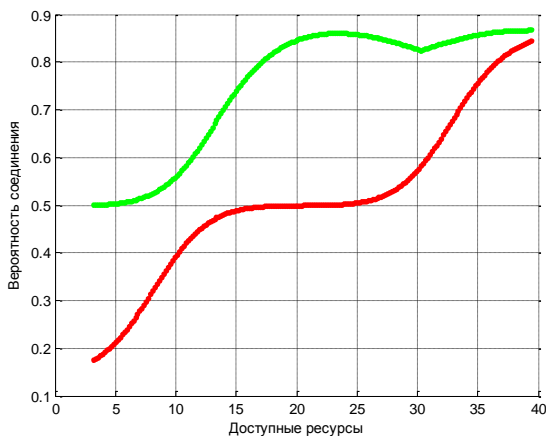


Рис. 12. Графики зависимости вероятности соединения от доступных ресурсов

Запрашиваемые ресурсы для системы без ПВД были приняты равными 7 подканалам, а для системы с ПВД – равными 5 подканалам. Поступившие соединения были приняты равными 10. На рис.12 представлены зависимости вероятности соединения от доступных ресурсов. Верхняя кривая соответствует случаю системы с ПВД. Нижняя кривая соответствует случаю системы без ПВД. Из данных графиков видно, что использование ПВД дает возможность повысить вероятность соединения на 0,3 – 0,35.

## Выводы

1. Важными проблемами в области обеспечения качества обслуживания являются проблемы управления доступом для ограничения числа соединений с целью предотвращения возможности переполнения и блокировки низкоприоритетных потоков. В работе предложено решение задачи управления доступом, основанное на нечеткой логике с использованием пространственно-временного доступа.

2. Известно, что вероятность нового соединения зависит от отношения сигнал/помеха+шум в канале связи. Показано, что применение ПВД позволяет повысить ОСПШ на 20 – 30 и более дБ.

3. В работе проведен анализ эффективности управления доступом, основанном на нечеткой логике с использованием ПВД. Получены зависимости запрашиваемых ресурсов от ОСПШ. Анализ показал, что применение ПВД дает экономию до 2 – 3 подканалов. Получены зависимости вероятности соединения от количества поступивших соединений. Анализ показал, что вероятность соединения на 0,2 – 0,3 больше для системы с ПВД по сравнению с системой без ПВД. Получены зависимости вероятности соединения от доступных ресурсов. Анализ показал, что использование ПВД дает возможность повысить вероятность соединения на 0,3 – 0,35.

## Список литературы:

1. Гельгор А.Л., Попов Е.А. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 204 с.
2. Fang Y., Zhang Y. Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2002. – Vol. 51, No.2. – P 371-382.
3. Крылов В.В., Дли М.И., Голуков Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматиз, 2001. – 224 с.
4. Аунг М.М. Исследование и разработка алгоритмов планирования и приоритетного управления доступом в сетях WiMAX: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 24 с.
5. Поповский В.В., Коляденко Ю.Ю. Использование пространственно-временного доступа в спутниковых системах подвижной связи с учетом стабилизации платформы ретранслятора связи // Праці УНДІРТ. Теоретичний та науково-практичний журнал радіозв'язку, радіомовлення і телебачення. – 2006. – № 2 (45). – С. 101-109.
6. Коляденко Ю.Ю. Оценка пространственного спектра сигналов с адаптивной пространственно-временной обработкой // Вісник Українського будинку економічних та науко-технічних знань. – 2003. – № 2. – С. 128-132.