

## **Вероятностные методы исследования широкополосных беспроводных сетей**

*В.М. Вишнеvский, А.И. Ляхов*

Институт проблем передачи информации РАН, Москва, Россия

*Хр. Даскалова*

Институт информационных технологий БАН, София, Болгария

IEEE 802.11 – один из наиболее популярных протоколов создания высокоскоростных широкополосных беспроводных сетей. Хотя первоначально этот протокол предназначался только для локальных сетей, в настоящее время он успешно применяется для сетей городского и регионального масштаба. В данной статье дается обзор современных вероятностных методов исследования, оценки производительности и оптимизации протокола IEEE 802.11 и беспроводных сетей на его основе.

## **Stochastic Methods for Study of Broadband Wireless Networks**

*V.M. Vishnevsky, A.I. Lyakhov*

Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow, Russia

*Hr. Daskalova*

Institute of Information Technologies, BAS, Sofia, Bulgaria

IEEE 802.11 is one of the most popular protocols for high-rate broadband wireless networks. Although it was intended initially only for wireless LANs, at present it is successfully exploited for wireless MANs and regional networks. In the paper, we give a survey of modern stochastic methods for study, performance evaluation and optimization of the IEEE 802.11 protocol and 802.11 wireless networks.

### **1. Введение**

IEEE 802.11 [1] – один из наиболее популярных протоколов для беспроводных и мобильных сетей. В этом протоколе IEEE 802.11 фундаментальным механизмом доступа к беспроводной среде является функция распределенного управления (Distributed Coordination Function – DCF), реализующая метод CSMA/CA (множественный доступ с прослушиванием несущей и избеганием коллизий). Согласно этому методу последовательные попытки передачи каждой станции беспроводной сети разделены интервалом задержки, а также случайным временем отсрочки (backoff time), отсчет которого ведется только при свободном канале. Время отсрочки  $b$  измеряется в слотах длительностью  $\sigma$  и равновероятно выбирается из множества  $(0, \dots, W-1)$ , где  $W = W_i$  – окно конкуренции, зависящее от стадии отсрочки, определяемой количеством  $i$  не-

удачных попыток передач пакета. После каждой неудачной передачи  $W$  удваивается, т.е.  $W_i = 2^i W_0$ , и так до достижения максимальной величины  $W_m$ .

В целом, как в России, так и за рубежом ведутся интенсивные научные исследования, направленные на повышение эффективности беспроводных сетей и выбор оптимальных параметров протокола IEEE 802.11.

## 2. Локальные сети

**Случай высокой нагрузки.** Работы [2] и [3] явились в некотором смысле базовыми для развития методов оценки производительности беспроводных сетей IEEE 802.11. В этих работах оценивалась пропускная способность локальной беспроводной сети в условиях высокой нагрузки. В этих работах применена следующая дискретная и целочисленная временная шкала работы сети, единицей которой является виртуальный слот. Виртуальные слоты не одинаковы, и каждый из них может представлять из себя: 1) «пустой» слот отсрочки  $\sigma$ , в котором ни одна из станций не ведет передачу; 2) «успешный» слот, в котором только одна из станций передает пакет; 3) «коллизийный» слот, в котором передают две или более станций. Согласно модели Бьянки [2], предполагается, что в начале каждого слота каждая станция пытается отправить пакет с одинаковой вероятностью, равной  $\tau$ . В модели Кали [3] предполагается, что время отсрочки  $b$  не зависит от  $i$  и выбирается из геометрического распределения с параметром  $\tau$ . Поведение отдельных станций, предполагаемое независимым, согласно модели Бьянки описывается цепью Маркова, изображенной на рис. ( $p$  – вероятность коллизии, предполагаемая независимой от числа  $i$  сделанных попыток передачи). Здесь состояние станций описывается парой  $(i, k)$ , где  $k$  – значение счетчика отсрочки.

Как было показано Вишневецким и Ляховым в работе [4], являющейся развитием [2] и [3], предположения моделей Бьянки [2] и Кали [3] эквивалентны. Кроме того, в этих работах считалось, что любая станция может начать передачу в начале каждого слота. Однако в реальной схеме DCF сразу после окончании передачи только передававшая станция может снова начать передачу. Этот эффект, отмеченный в [5], подробно исследован в [4], где также учтены ограничения на число попыток передачи.

Вышеописанные работы проводились в предположении идеального канала передачи, однако пренебрежение помехами обычно приводит к существенному завышению оценок пропускной способности, так как в современных городских условиях электромагнитные помехи – неизбежный фактор, ухудшающий пропускную способность сети из-за искажения пакетов. Поэтому дальнейшее развитие методов оценки производительности локальных сетей IEEE 802.11 было связано с учетом влияния помех на пропускную способность сети. Первым шагом в этом направлении была работа [6]. Данные исследования были продолжены в [7] в направлении оценки эффективности применения фрагментации пакетов, рекомендуемой стандартом IEEE 802.11 для сети, работающей в условиях помех.

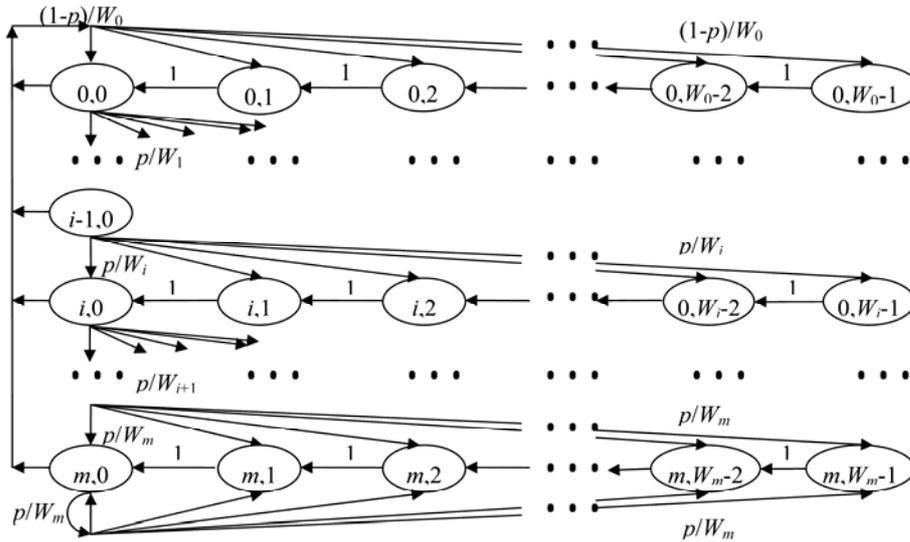


Рис. 1. Марковская модель изменения состояния станции

**Производительность при нормальной нагрузке.** К сожалению, результаты, полученные в большинстве работ, посвященных протоколу IEEE 802.11, неприменимы в условиях нормальной нагрузки, когда очереди станций периодически оказываются пустыми, ввиду существенного завышения оценок таких показателей производительности, как: среднее время обслуживания пакетов и среднее время задержки пакета на MAC-уровне, т.е. среднее время пребывания на данной станции, включая возможное ожидание и обслуживание.

Попытка описать работу беспроводной локальной сети в условиях нормальной нагрузки предпринята в [8], где модель Бьянки на рис. дополнена состоянием *Idle*, в которое может перейти станция после очередной передачи. Однако, в модели, применяемой в [8], не учтены два важных фактора: 1) станция после передачи пакета переходит в состояние отсрочки даже при отсутствии пакета в ее очереди, и 2) возможность немедленной (асинхронной) передачи пакета, пришедшего в пустую очередь, при отсутствии передач других станций. Для учета этих факторов в [9] и [14] в модель Бьянки введена дополнительная (верхняя) строка состояний  $(-1, k)$ , соответствующая состояниям отсрочки при пустой очереди ( $k > 0$ ) и состоянию простоя ( $k = 0$ ). При поступлении пакета в пустую очередь и невозможности асинхронной передачи, станция переходит в состояние  $(0, k-1)$ , если она была в  $(-1, k > 0)$ , или равновероятно в одно из состояний  $(0, 0 \dots W_0-1)$ , если она была в состоянии простоя. При опустошении очереди станция равновероятно переходит в одно из состояний  $(-1, 0 \dots W_0-1)$ . Анализ данной модели [9] позволяет довольно точно

оценивать средние времена обслуживания и задержки пакетов на MAC-уровне.

### 3. Городские и региональные сети

Результаты указанных работ по оценке локальных сетей оказываются практически неприменимыми для оценки пропускной способности городских и региональных беспроводных сетей, так как в типичных условиях городской сети абонентские станции скрыты друг от друга, что резко увеличивает вероятность коллизий и приводит к рассинхронизации этих станций.

**Моделирование распределенного управления.** [10] можно считать первой работой, посвященной анализу беспроводных сетей со скрытыми станциями. В ней, однако, вообще не учитываются повторные попытки передачи, что, естественно, сильно завышает оценки пропускной способности.

Следующей по времени появления является работа [11], посвященная оценке производительности городской беспроводной сети со структурой, изображенной на рис. 2. Использовалась двухуровневая модель: первый уровень, представляющий собой сеть очередей, изображенную на рис. 3, описывал информационное взаимодействие устройств сети, а второй уровень отвечал за оценку времен передачи пакетов с учетом особенностей схемы DCF протокола IEEE 802.11. Точность этого метода моделирования оказалась, однако, невысокой, так как при оценке среднего времени передачи использовалось допущение о пуассоновском характере распределения попыток передачи станций беспроводной сети.

[12] и [13] – это единственные аналитические работы, детально учитывающими особенности функционирования протокола IEEE 802.11 в условиях скрытых станций. В типовой городской радиосоте [7] преобладает трафик «сверху-вниз», т.е. от базовой к оконечным станциям, так как в основном абонентам требуется информация, получаемая из мировой сети Интернет через базовую станцию, причем основная доля беспроводного трафика связана с передачей больших файлов посредством TCP/IP-соединений.

В связи с этим в [12] и [13] допущение о постоянном наличии непустой очереди пакетов, готовых к передаче, используется только для базовой станции, а оконечные станции функционируют в режиме нормальной нагрузки (т.е. их очереди часто бывают пусты).

**Моделирование централизованного управления.** Эффективность схемы DCF высока при низкой загруженности сети, однако производительность этой схемы существенно падает при увеличении количества терминалов и нагрузки, что связано с высокой вероятностью коллизий и увеличенными временами отсрочки. Альтернативный механизм централизованного управления PCF позволяет решить эти проблемы, так как он работает в условиях отсутствия конкуренции, что позволяет обеспечивать гораздо более высокий максимум пропускной способности, чем DCF.

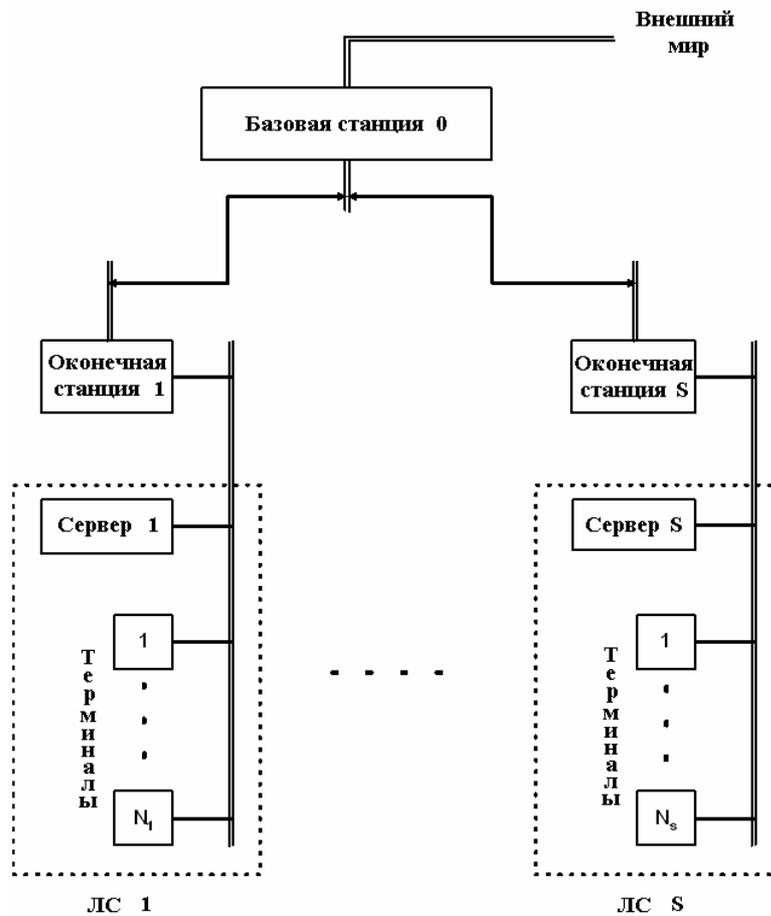


Рис. 2. Структура городской беспроводной сети

В связи с этим в [12] и [13] допущение о постоянном наличии непустой очереди пакетов, готовых к передаче, используется только для базовой станции, а оконечные станции функционируют в режиме нормальной нагрузки (т.е. их очереди часто бывают пусты).

**Моделирование централизованного управления.** Эффективность схемы DCF высока при низкой загрузке сети, однако производительность этой схемы существенно падает при увеличении количества терминалов и нагрузки, что связано с высокой вероятностью коллизий и увеличенными временами отсрочки. Альтернативный механизм централизованного управления PCF по-

звoляет решить эти проблемы, так как он работает в условиях отсутствия конкуренции, что позволяет обеспечивать гораздо более высокий максимум пропускной способности, чем DCF.

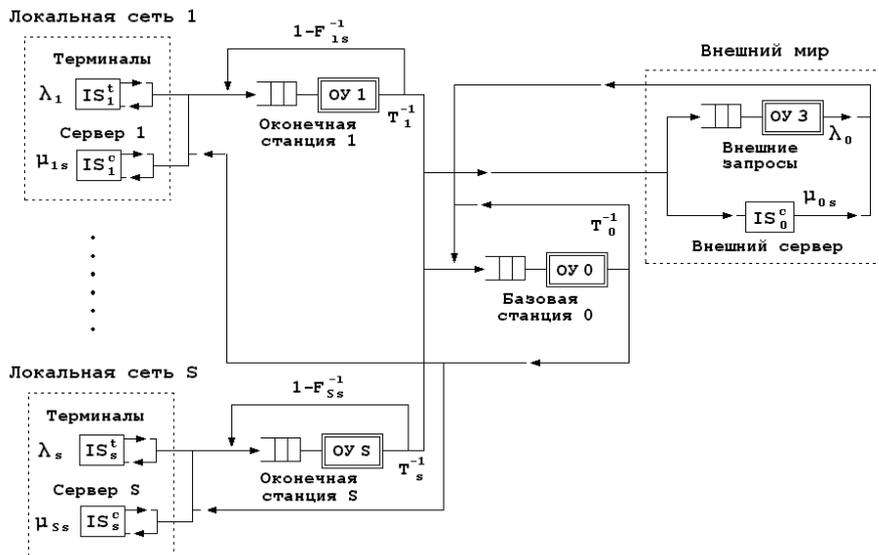


Рис. 3. Модель городской беспроводной сети с распределенным управлением

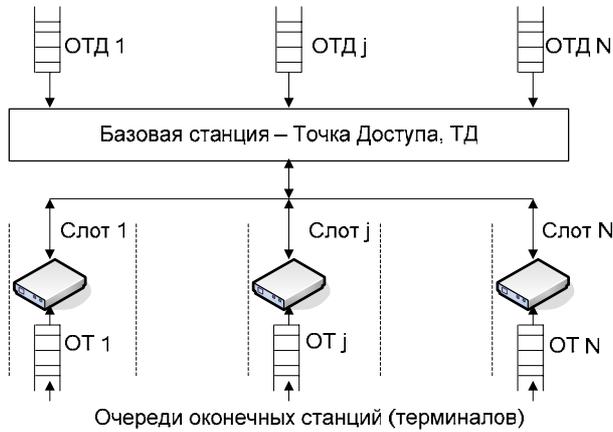


Рис. 4. Работа схемы PCF

В общем виде PCF описывается следующей схемой (см. рис. 4): базовая станция, называемая также точкой доступа, опрашивает терминалы (оконечные станции) по кругу, т.е. PCF представляет собой схему TDMA, в которой время работы сети разбито на циклы опроса, состоящие из временных слотов переменной длины. Слот  $j$  предназначен для обмена кадрами между ТД и  $j$ -м терминалом. В отличие от терминала, контролирующего одну очередь пакетов, ТД управляет  $N$  очередями ТД (ОТД), где  $N$  – количество опрашиваемых терминалов, и ОТД  $j$  содержит пакеты, предназначенные для передачи терминалу  $j$ .

Впервые аналитическое моделирование городской беспроводной сети, управляемой схемой PCF, было проведено в [15] с использованием того же двухуровневого подхода, что и в [11]. Так как при схеме PCF базовая станция управляет несколькими очередями, то модель на рис. 3 заменяется на модель на рис. 5.

В случае большого количества терминалов и невысокого или пульсирующего трафика при схеме PCF происходят значительные потери пропускной способности, вызванные неудачными попытками опроса, в ответ на которые не последовала передача полезной информации. Для снижения этих потерь авторами данной статьи предложена динамическая стратегия опроса, в соответствии с которой терминал непременно опрашивается, только если его счетчик отсрочки  $k$  равен окну опроса  $W_i$ , заданному для каждой стадии его опроса  $i=0,1,\dots,I$ . В нулевой стадии  $k=W_0=1$ , и терминал опрашивается в каждом цикле. Когда ТД получает нулевой кадр от терминала, она определяет, что ОТ пуста, и увеличивает стадию  $i$ . При получении от терминала пакета с данными ТД возвращает его на нулевую стадию. Частные случаи этой стратегии опроса были предложены в [16] (с  $W_i=2^i$  – для сетей Bluetooth) и в [17] – с единственной стадией отсрочки.

В [14] и [18] построены Марковские модели, описывающие изменения очередей в сети 802.11 PCF в случае идеального канала и обобщенной стратегии динамического опроса. Состояние ОТД описывались только ее длиной, в то время как описание состояния очереди терминала включало также номер стадии опроса и значение счетчика опросов. Соответственно, модель ОТД представляла собой простейший процесс рождения-гибели, а модель очереди терминала имела значительно более сложный вид, показанный на рис.6.

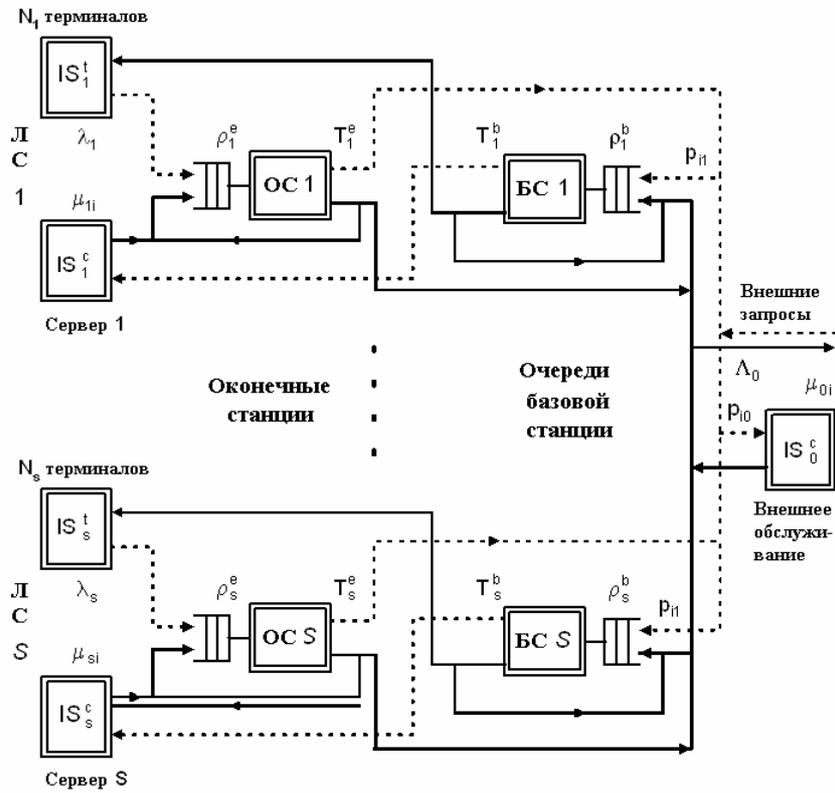


Рис. 5. Модель городской беспроводной сети с централизованным управлением

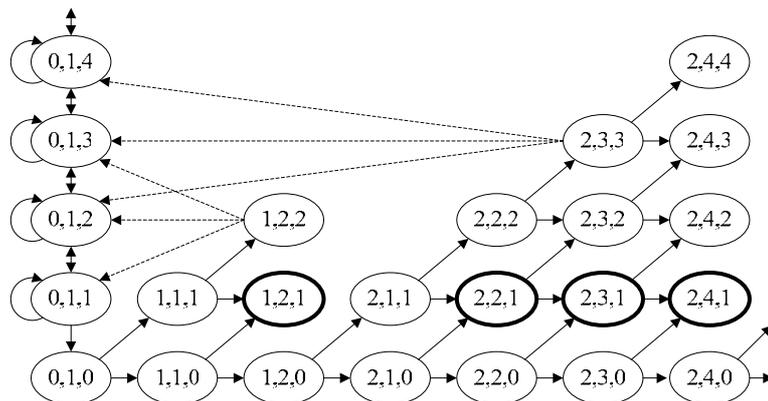


Рис. 6. Цепь Маркова для очереди терминала при  $W_1=2$  и  $W_2=4$ .

#### 4. Заключение

В статье представлен обзор современных вероятностных методов, применяемых для исследования, оценки производительности и оптимизации протокола IEEE 802.11 и беспроводных сетей на его основе.

*Работа выполнена при поддержке Фонда содействия отечественной науке.*

#### Литература

1. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition.
2. Bianchi G. IEEE 802.11 – Saturation throughput analysis // IEEE Comm. Lett., 1998. V.2, P. 318-320.
3. Cali F., Conti M., Gregory E. IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and protocol enhancement // Proc. INFOCOM'98, San Francisco, 1998. P. 142-149.
4. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I. IEEE 802.11 Wireless LAN: Saturation Throughput Analysis with Seizing Effect Consideration // Cluster Computing, Apr. 2002. V.5, N.2, P. 133-144.
5. Bononi L., Conti M., Donatiello L. Design and Performance Evaluation of Distributed Contention Control (DCC) Mechanism for IEEE 802.11 Wireless Local Area Network // J. Parallel Distrib. Comput, 2000. V.60, N.4.
6. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I. 802.11 LANs: Saturation Throughput in the Presence of Noise // Proc. of 2nd Int. IFIP TC6 Networking Conf. (Networking 2002), Pisa, Italy, May 19-24, 2002. - Lecture Notes in Computer Science, V.2345, P.1008-1019, Springer-Verlag, 2002.
7. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей // М.: Техносфера, 2003. -512с.
8. Ziouva E., Antonakopoulos T. The IEEE 802.11 distributed coordination function in small-scale ad-hoc wireless LANs // International Journal of Wireless Information Networks, Vol.10, No. 1, 2003
9. Баранов А.В., Ляхов А.И. “Оценка производительности протокола IEEE 802.11 в режиме нормальной нагрузки” // Тр. V Международного Семинара «Информационные сети, системы и технологии» (ИССиТ-2005), Москва, 2004, с.121-125
10. Chhaya H.S., Gupta S. Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC Protocol // Wireless Networks, Mar. 1997. V.3, N.3, P. 217-234.

11. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Терещенко Б.Н. Моделирование беспроводных сетей с децентрализованным управлением // Автоматика и телемеханика, 1999. № 6, С.88-99.
12. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И. Оценка максимальной пропускной способности региональной радиосети, используемой для доступа в Интернет // VIII межд.конф. по информационным сетям, системам и технологиям (МКИССиТ-2002), Санкт-Петербург, 16-19 сентября 2002. С.34-42.
13. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Гузаков Н.Н. Оценка максимальной производительности беспроводного доступа в Интернет // Автоматика и телемеханика, 2004. №9, с.52-70.
14. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.
15. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I., Bakanov A.S. Method for performance evaluation of wireless networks with centralized control // Proc. Int. Conf. "Distributed Computer Communication Networks (Theory and applications)" (DCCN'99). Tel-Aviv, Israel, November 9-13, pp. 189-194, 1999.
16. Bruno R., Conti M., Gregori E. Bluetooth: Architecture, Protocols and Scheduling Algorithms // Cluster Computing. 2002. Vol. 5. P.117-131.
17. Ziouva E., Antonakopoulos T. Effective Voice Communications over IEEE 802.11 WLANs Using Improved PCF Procedures // Proc. of 3rd Int. Network Conf. INC-2002, July 2002.
18. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I., Guzakov N.N. An Adaptive Polling Strategy for IEEE 802.11 PCF // Proc. 7th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'04), Abano Terme, Italy, September 12-15, vol.1, pp.87-91, 2004.