

## **Оценка взаимозависимости поведения станций в локальных беспроводных сетях с протоколом IEEE 802.11**

А.И.Ляхов, д-р техн.наук, А.В.Баранов

Институт проблем передач информации РАН, Москва, Россия  
А.В.Винель, Siemens AG, Munich, Germany

В статье представлен оригинальный метод оценки производительности беспроводных локальных сетей с протоколом IEEE 802.11 в условиях нормальной нагрузки. В отличие от предшествующих подходов он позволяет учесть взаимозависимость поведения станций сети, что существенно улучшает точность оценки.

## **Evaluation of Stations Behavior Interdependence in IEEE 802.11 WLANs**

A.I.Lyakhov, A.V.Baranov

Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow,  
Russia

A.V.Vinel, Siemens AG, Munich, Germany

In the paper, we propose a novel method for IEEE 802.11 WLAN performance evaluation under normal load conditions. In contrary to previous approaches, it allows taking into account of stations behavior interdependence, what improves essentially the estimation accuracy.

### **1. Введение**

Для решения проблемы обеспечения возможности доступа в мировую сеть из любого места и в любое время (anywhere-anytime) в последнее время бурно развиваются различные беспроводные сетевые технологии, становящиеся одним из основных направлений развития сетевой индустрии. Для обеспечения эффективного управления доступом к беспроводной среде разработан ряд международных стандартов, протоколов и рекомендаций, которые специфицируют физический и MAC-уровни беспроводных сетей. Среди разработчиков беспроводных локальных сетей (БЛС) особенно популярен протокол IEEE 802.11 [1], разработанный Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) и утвержденный как международный стандарт в 1997 г.

Схема распределенного управления DCF (Distributed Coordination Function – DCF), реализующая метод множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA), является основным режимом работы протокола IEEE 802.11. В этом режиме информационные пакеты передаются в основном следующим образом. Станция, успешно принявшая кадр DATA, содержащий ин-

формационный пакет, спустя короткий межкадровый интервал (Short InterFrame Space – SIFS) отвечает положительным подтверждением ACK. После завершения очередной попытки передачи пакета станция переходит в состояние отката спустя DIFS (Distributed InterFrame Space), если попытка была успешной (т.е. коллизия отсутствовала), или EIFS (Extended InterFrame Space, EIFS > DIFS) при неудачной попытке (EIFS используется также в качестве тайм-аута ожидания ACK). При этом счетчик интервала отката устанавливается в начальное значение  $b$ , измеряемое в слотах длительностью  $\sigma$  и равновероятно выбираемое из множества  $(0, \dots, W - 1)$ . Величина  $W$  называется окном конкуренции (Contention Window – CW), и зависит от стадии отката, определяемой количеством  $i$  неудачных попыток передач пакета, т.е.  $W = W_i$ . В первую попытку передачи  $W$  устанавливается равным величине  $W_0 = CW_{min}$ , называемой минимальным окном конкуренции. После каждой неудачной передачи  $W$  удваивается, т.е.  $W_i = 2^i W_0$ , и так до достижения максимальной величины  $CW_{max} = 2^m W_0$ . На стадии отката  $i = R - 1$  станция предпринимает последнюю попытку передать пакет и, если она не удачна, то пакет удаляется из очереди (ситуация отказа).

Заметим, что параметр  $R$  оказывает значительное влияние на вероятность потери пакета. Если  $R$  мало, пакет с большой вероятностью теряется из-за исчерпания допустимого числа попыток передачи. Большое значение  $R$  может увеличивать среднее время обслуживания пакета и, следовательно, привести к росту вероятности потери пакета из-за переполнения очереди, размер которой, вообще говоря, ограничен размером буфера в реальных беспроводных устройствах.

Станция, находящаяся как в состоянии отката, так и в состоянии простоя (при пустой очереди), отслеживает активность канала. По мере того, как канал воспринимается свободным, счетчик интервала отката уменьшается и “замораживается”, когда определяется передача в канале, и опять начинает уменьшаться, когда канал снова воспринимается свободным на время, большее DIFS или EIFS (в зависимости от того, была ли последняя передача по каналу успешной или нет). Станция делает очередную попытку передачи, когда счетчик интервала отката уменьшается до 0. По окончании процесса передачи очередного пакета (независимо от его результата, т.е. как после успешной передачи, так и при потере пакета после  $R$ -ой неудачной попытки) станция возвращается на стадию  $i = 0$  и переходит в состояние отката. Если очередь станции оказалась пуста по истечении времени отката, станция переходит в состояние простоя.

Пакет, поступивший в очередь станции, находящейся в состоянии простоя, немедленно передается, если как в момент поступления, так и в течение интервала DIFS или EIFS канал был свободен. В противном случае станция переходит в состояние отката на стадию  $i = 0$ .

## 2. Предшествующие работы

В последние годы ведутся интенсивные научные исследования, направленные на повышение эффективности беспроводных радиосетей и выбор оптимальных параметров схемы DCF протокола IEEE 802.11 (см., например, [2] – [11]). В ранних работах оценка производительности проводилась либо путем имитационного моделирования (например, в [2,3]), либо с помощью приближенных аналитических моделей [4] – [6], основанных на допущениях, существенно упрощающих правило определения интервала отката. Особенности схемы DCF наиболее полно учтены в работах [7] – [11], в которых разработаны аналитические методы оценки пропускной способности локальной беспроводной сети 802.11 при высокой нагрузке (случай насыщения), когда в любой момент времени ко всем станциям БЛС всегда имеются непустые очереди. К сожалению, полученные результаты оказываются неприменимы в условиях нормальной нагрузки, когда очереди станций периодически оказываются пустыми, ввиду существенного завышения оценок среднего времени обслуживания пакетов.

Попытка описать БЛС в условиях нормальной нагрузки предпринята в [12]. Однако, в модели, применяемой в [12], не учтены два важных фактора: 1) станция после передачи пакета и отсутствии пакета в очереди также переходит в состояние отката, и 2) возможность немедленной передачи пакета, пришедшего в пустую очередь, при отсутствии передач других станций. Эти факторы учтены в [13], однако существенным недостатком работ [12,13] является применение того же допущения о статистической независимости поведения отдельных станций сети, что и в исходных работах [7] – [11]. Данное допущение, вполне применимое в случае высокой нагрузки, может привести к существенным погрешностям при оценке производительности сетей, работающих при нормальной нагрузке. В частности, если очередь одной станции непуста, то высока вероятность, что за время виртуального слота (см. [7]) в очередь другой станции также поступит пакет.

В статье после краткого описания работы схемы распределенного управления DCF протокола IEEE 802.11 в условиях нормальной нагрузки разрабатывается простая модель поведения станций сети в виде процесса рождения-гибели. Эта модель позволяет оценить среднее время нахождения пакетов в очередях сети, а также вероятность отказа в их передаче.

## 3. Описание модели

Рассмотрим БЛС с протоколом IEEE 802.11 DCF, состоящую из  $N$  статистически однородных станций, в очередь каждой из которых поступает пуассоновский поток пакетов с интенсивностью  $\Lambda$ . Пакеты одинаковы, канал считается идеальным, а время распространения сигнала между станциями – пренебрежимо малым. Кроме того, предполагается, что очередь пакетов каждой станции может содержать не более  $B$  пакетов.

Цель моделирования – оценить следующие показатели производительности:

– среднее значение  $T$  времени задержки пакета, отсчитываемого от момента поступления пакета в очередь данной станции и до момента окончания его обслуживания, т.е. по окончании интервала DIFS, завершающего успешную передачу, или интервала EIFS в случае последней неудачной попытки передачи, приводящей к потере пакета;

– усредненная вероятность отказа в передаче пакета, происходящего из-за либо переполнения очереди станции, либо истечения числа  $R$  повторных передач.

Будем называть пакеты, передача которых начинается в момент поступления, переданными асинхронно, а все остальные – переданными синхронно. Асинхронная передача имеет место, если в момент прихода пакета станция была в состоянии простоя, и канал был свободен в течении как минимум DIFS или EIFS. Таким образом, асинхронная передача происходит только при отсутствии синхронных передач других станций, а так как  $\Lambda\sigma \ll 1$ , то можно считать, что за время одного слота отсрочки в сети может произойти не более одной асинхронной передачи. Следовательно, асинхронная передача всегда успешна.

Следуя подходу, предложенному Бьянки в [7], применим следующую дискретную и целочисленную временную шкалу работы сети: моменты  $t$  и  $t+1$  соответствуют началам следующих друг за другом виртуальных слотов. 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 синхронно, 3) “асинхронный” слот, в котором одна из станций передает пакет асинхронно, и 4) “коллизийный” слот, в котором две или более станций пытаются осуществить передачу. Очевидно, вероятности этих слотов, обозначаемые соответственно  $p_e(n)$ ,  $p_s(n)$ ,  $p_a(n)$  и  $p_c(n)$ , зависят только от числа “активных” станций  $n$ , очереди которых непусты в начале данного виртуального слота.

Опишем работу сети процессом рождения-гибели с дискретным временем, причем состояние этого процесса описывается суммарным числом  $\ell$  пакетов, находящихся в очередях станций сети, включая передаваемые в данный момент пакеты, а единицей времени является виртуальный слот.

Для определения вероятностей рождения ( $\lambda(\ell)$ ), т.е. увеличения  $\ell$  на 1 за слот, и гибели ( $\mu(\ell)$ ), т.е. уменьшения  $\ell$  на 1 за слот, введем следующие допущения.

*Допущение 1.* В течение попытки передачи (включая завершающие ее интервалы DIFS или EIFS) в очереди станций может поступить не более одного пакета.

*Допущение 2.* По завершении коллизии отказ в дальнейшей передаче пакета может произойти не более, чем на одной из станций, вовлеченных в коллизию (вероятность одновременного отказа на двух и более станциях пренебрежимо мала).

При  $\ell = 0$  рождение происходит, когда одна из станций передает асин-

хронно и во время этой успешной передачи, равное  $t_s = t_{DATA} + t_{ACK} + SIFS + DIFS$  ( $t_{DATA}$  и  $t_{ACK}$  – времена передачи кадров DATA и ACK), в очередь этой или другой станции поступает еще один пакет. Таким образом,

$$\lambda(0) = \left(1 - e^{-N\Lambda\sigma}\right) \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right).$$

При  $\ell > 0$  рождение происходит, когда новый пакет поступает в непременную очередь либо во время пустого слота, либо во время асинхронной передачи, либо в течение коллизийного слота, в конце которого не происходит отказ в дальнейшей передаче пакета ни на одной из станций, вовлеченных в коллизию. Гибель происходит, когда в течение “успешного” слота или коллизии, приводящей к отказу в дальнейшей передаче пакета, не поступает новый пакет. Следовательно, при  $\ell > 0$

$$\begin{aligned} \lambda(\ell) &= \sum_{n=n_{\min}(\ell)}^{\min(N,\ell)} \gamma(n,\ell) \left\{ [1 - \beta_q^e(n,\ell)] p_e(n) \left(1 - e^{-N\Lambda\sigma}\right) \right. \\ &\quad \left. + [1 - \beta_q^f(n,\ell)] \left[ p_a(n) \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right) + p_c(n) [1 - \beta_m(n)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_c}\right) \right] \right\}, \\ \mu(\ell) &= \sum_{n=n_{\min}(\ell)}^{\min(N,\ell)} \gamma(n,\ell) \left\{ p_s(n) e^{-N\Lambda t_s} + p_c(n) \beta_m(n) e^{-N\Lambda t_c} \right\}. \end{aligned}$$

В этих формулах:

$n_{\min}(\ell) = \lceil (\ell - 1) / B \rceil + 1$ , где  $\lceil \cdot \rceil$  – целая часть числа;

$\gamma(n,\ell)$  – вероятность наличия  $n$  активных станций при условии, что сумма длины очередей в начале слота равна  $\ell$ ;

$\beta_q^e(n,\ell)$  и  $\beta_q^f(n,\ell)$  – вероятность потери из-за переполнения очереди, которая была непустой в начале слота и в которую поступает новый пакет, при данных  $n$  и  $\ell$ ; эти вероятности различны для пустого слота ( $\beta_q^e$ ) и для остальных слотов ( $\beta_q^f$ ), так как по определению в течение пустого слота пакеты могут поступать только в очереди активных станций; кроме того, очевидно, что эти вероятности равны 0 при  $\ell < n + B - 1$ ;

$\beta_m(n)$  – вероятность отказа из-за достижения предельного числа  $R$  повторных передач при данном числе активных станций;

$t_c = t_{DATA} + EIFS$  – время коллизии.

Очевидно, стационарные вероятности  $\pi(\ell)$  состояний данного процесса описываются формулами:

$$\pi(\ell) = \pi(0) \prod_{i=1}^{\ell} \frac{\lambda(i-1)}{\mu(i)}, \quad \pi(0) = 1 / \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{NB} \prod_{i=1}^j \frac{\lambda(i-1)}{\mu(i)} \right\}. \quad (1)$$

Для оценки вероятностей  $\gamma(n, \ell)$  и  $\beta(n, \ell)$  примем следующее допущение.

*Допущение 3.* Пусть суммарное число пакетов, находящихся в очередях станций сети, равно  $\ell > 0$ . Тогда все варианты размещения этих  $\ell$  пакетов по  $N$  очередям сети равновероятны.

Используя это допущение, находим для  $0 \leq \ell \leq NB$  и  $n_{\min}(\ell) \leq n \leq \min(N, \ell)$ :

$$\gamma(n, \ell) = \frac{1}{g[\ell, N, B]} \binom{N}{n} g[\ell - n, n, B - 1],$$

$$\beta_q^f(n, \ell) = 0 \text{ при } \ell < n + B - 1, \text{ а при } \ell \geq n + B - 1$$

$$\beta_q^f(n, \ell) = \frac{1}{g[\ell - n, n, B - 1]} \sum_{k=k_{\min}(\ell, n)}^{K(\ell, n)} \frac{k}{N} \binom{n}{k} g[\ell - n - k(B - 1), n - k, B - 2];$$

кроме того,  $\beta_q^e(n, \ell)$  определяется аналогично с заменой в последней формуле  $k/N$  на  $k/n$ . Здесь  $g[u, v, M]$  – число вариантов, которыми можно разместить  $u$  неразличимых шаров по  $v$  урнам так, что в любой урне было бы не более  $M$  шаров  $k_{\min}(\ell, n) = \{1, \ell - n(B - 1)\}$ , а  $K(\ell, n)$  – наибольшее целое, не превышающее отношения  $(\ell - n)/(B - 1)$ . Функция  $g[u, v, M]$  вычисляется рекурсивно согласно [9]:

$$g[0, v, M] = 1 \quad \forall v \geq 0, \quad g[u, 1, M] = 1 \text{ при } u \leq M$$

$$\text{и } g[u, 1, M] = 0 \text{ при } u > M;$$

$$g[u, v, M] = \sum_{k=0}^{\min(u, M)} g[u - k, v - 1, M] \text{ при } v \geq 2, u > 0.$$

Наконец, для нахождения вероятностей слотов и вероятности отказа  $\beta_m(n)$  примем последнее допущение.

*Допущение 4.* В начале данного виртуального слота число активных станций равно  $n$ . Тогда для любой из этих станций вероятность  $\tau(n)$  начала синхронной передачи, а также вероятность отказа  $\beta_m(n)$  в случае коллизии в этом слоте совпадают с соответствующими значениями, полученными для сети  $S_n$ , аналогичной исследуемой, но включающей в себя  $n$  постоянно активных станций. Остальные  $N - n$  станций в  $S_n$  могут передавать только асинхронно при условии, что ни одна из активных станций не передает. Если пакет поступает в очередь любой из  $N - n$  неактивных станций в момент передачи любой из станций, то этот пакет теряется.

Аналогично модели Бьянки [7] получаем следующие вероятности слотов:

$$p_e(n) = [1 - \tau(n)]^n e^{-(N-n)\Lambda\sigma}, \quad p_a(n) = [1 - \tau(n)]^n \left[ 1 - e^{-(N-n)\Lambda\sigma} \right], \quad (1a)$$

$$p_s(n) = n\tau(n)[1 - \tau(n)]^{n-1}, \quad p_c(n) = 1 - [1 - \tau(n)]^n - n\tau(n)[1 - \tau(n)]^{n-1}. \quad (2)$$

(очевидно,  $\tau(0) = 0$ ). Так как вероятность того, что текущая синхронная попытка неудачна из-за коллизии, равна

$$\xi(n) = 1 - [1 - \tau(n)]^{n-1}, \quad (3)$$

то вероятность того, что данная неудача –  $R$ -я по счету, равна

$$\beta_m(n) = [\xi(n)]^{R-1} \frac{1 - \xi(n)}{1 - [\xi(n)]^R}. \quad (4)$$

Осталось найти значение  $\tau(n)$ . Согласно лемме 1 из [9]  $\tau(n)$  находится путем решения следующей системы уравнений (здесь аргумент  $n$  опущен):

$$\tau = 2/(E[w] + 1), \quad (5)$$

где  $E[w]$  – среднее значение конкурентного окна, равное

$$E[w] = \left\{ \sum_{i=1}^R \xi^{i-1} W_i + \frac{\xi^R W_R - W_0}{1 - \xi} \right\} \frac{(1 - \xi)^2}{1 - \xi^R}, \quad (6)$$

в случае  $R \leq m$  и

$$E[w] = \left\{ \sum_{i=1}^m \xi^{i-1} W_i + W_m \sum_{i=m}^{R-1} (i - m + 2) \xi^i + \frac{(R - m + 1) W_m \xi^R - W_0}{1 - \xi} \right\} \frac{(1 - \xi)^2}{1 - \xi^R}, \quad (7)$$

в обратном случае.

#### 4. Оценка показателей производительности

Итак, модель полностью определена и мы можем ее использовать для оценки искомым показателей: среднего времени задержки  $T$  и усредненной вероятности отказа  $p_{rej}$  из-за либо переполнения очереди станции, либо истечения числа  $R$  повторных передач. По формуле Литтла имеем:

$$T = L/\Lambda_q, \quad (8)$$

где  $L$  – среднее значение  $\ell$ , а  $\Lambda_q$  – среднее число пакетов, принятых станциями в их очередь за секунду. Очевидно,  $L$  можно вычислить по формуле

$$L = \frac{1}{E[t_{vs}]} \sum_{\ell=0}^{NB} \pi(\ell) \sum_{n=n_{\min}(\ell)}^{\min(N, \ell)} \gamma(n, \ell) \left[ p_e(n) \bar{\ell}_e^n + p_a(n) \bar{\ell}_a^n + p_s(n) \bar{\ell}_s^n + p_c(n) \bar{\ell}_c^n \right], \quad (9)$$

где

$$E[t_{vs}] = \sum_{\ell=0}^{NB} \pi(\ell) \sum_{n=n_{\min}(\ell)}^{\min(N, \ell)} \gamma(n, \ell) \left[ p_e(n) \sigma + p_a(n) \left( \frac{\sigma}{2} + t_s \right) + p_s(n) t_s + p_c(n) t_c \right]$$

– средняя длительность виртуального слота, а

$$\begin{aligned}\bar{t}_e^n &= \ell \sigma + [1 - \beta_q^e(n, \ell)] \left(1 - e^{-n\Lambda\sigma}\right) \frac{\sigma}{2}, \\ \bar{t}_a^n &= \ell \left(\frac{\sigma}{2} + t_s\right) + t_s + [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right) \frac{t_s}{2}, \\ \bar{t}_s^n &= \ell t_s + [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right) \frac{t_s}{2}\end{aligned}$$

и

$$\bar{t}_c^n = \ell t_c + [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_c}\right) \frac{t_c}{2}$$

– средние значения  $\ell$  в течение соответственно пустых, асинхронных, успешных и коллизионных слотов, причем каждое из этих значений умножено на среднюю длительность соответствующего слота и рассчитано при данном  $n$ . Интенсивность поступления  $\Lambda_q$  определяем по формуле, аналогичной (9) с заменой  $\bar{\ell}$  с различными нижними индексами на:

$$\begin{aligned}h_e^n &= [1 - \beta_q^e(n, \ell)] \left(1 - e^{-n\Lambda\sigma}\right), \\ h_a^n &= 1 + [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right), \\ h_s^n &= [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_s}\right)\end{aligned}$$

и

$$h_c^n = [1 - \beta_q^f(n, \ell)] \left(1 - e^{-N\Lambda t_c}\right)$$

– средние количества пакетов, принятых в очереди станций в течение соответственно пустых, асинхронных, успешных и коллизионных слотов.

Наконец, найдем усредненную вероятность отказа  $p_{rej}$ . Так как среднее число пакетов, поступающих (но необязательно принимаемых) в очереди станций за слот, равно  $N\Lambda E[t_{vs}]$ , то, вычисляя среднее число пакетов, обслуживание которых завершается в течение данного слота, имеем

$$p_{rej} = 1 - \frac{1}{NE[t_{vs}]} \sum_{\ell=0}^{NB} \pi(\ell) \sum_{n=n_{\min}(\ell)}^{\min(N, \ell)} \gamma(n, \ell) [p_a(n) + p_s(n)]. \quad (10)$$

Итак, показатели производительности вычисляются по следующей процедуре:

1. Для всех  $\ell$  и  $n \leq \min\{\ell, N\}$  рассчитать вероятности  $\gamma(n, \ell)$  наличия  $n$  активных станций и вероятности потери  $\beta_q^e(n, \ell)$  и  $\beta_q^f(n, \ell)$ .
2. Для всех  $0 < n \leq N$  решить систему (5)–(7), найдя  $\tau(n)$ , а затем – по формуле (4) – и вероятность отказа  $\beta_m(n)$ .

3. Для всех  $0 \leq n \leq N$  найти вероятности слотов по формулам (1)–(2).
4. Для всех  $\ell \leq NB$  найти стационарные вероятности  $\pi(\ell)$  по формуле (1).
5. Рассчитать искомые показатели производительности по формулам (8)–(10).

### 5. Заключение

В статье представлен оригинальный метод оценки производительности БЛС с протоколом IEEE 802.11 в условиях нормальной нагрузки. В отличие от предшествующих подходов он позволяет учесть взаимозависимость поведения станций сети, что существенно улучшает точность оценки.

Метод легко расширяем в смысле возможного учета более сложных ситуаций путем использования результатов, полученных ранее для режима высокой нагрузки на все станции сети. Например, для моделирования гибридных методов доступа, когда для части пакетов используется механизм RTS/CTS, и учета вероятностного распределения длин пакетов достаточно всего лишь использовать для расчета длительностей успешной ( $t_s$ ) и неудачной ( $t_c$ ) передачи формулы из [7] – [9]. Если канал неидеален, то используя методы из [10,11] для оценки  $\tau(n)$  и вероятности отказа  $\beta_m(n)$ , мы оцениваем производительность с учетом влияния помех.

*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. Weinmiller J., Schlager M., Festag A., Wolisz A. Performance Study of Access Control in Wireless LANs - IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPERLAN // Mobile Networks and Applications. Vol.2, No. 1. 1997. P. 55-76.
3. Anastasi G. , Lenzini L. QoS Provided by the IEEE 802.11 Wireless LAN to Advanced Data Applications: a Simulation Analysis // Wireless Networks, vol. 6, no. 2, pp. 99-108, 2000.
4. 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.
5. 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.

6. Ho T.S., Chen K.C. Performance Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Medium Access Control Protocol // Proc. PIMRC'96, October 1996, pp.407-411.
7. Bianchi G. IEEE 802.11 – Saturation throughput analysis // IEEE Comm. Lett., 1998. V.2, P. 318-320.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Lyakhov A.I., Vishnevsky V.M. Packet Fragmentation in Wi-Fi Ad Hoc Networks with Correlated Channel Failures // Proc. 1<sup>st</sup> IEEE Int. Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2004), October 24-27, 2004, Fort Lauderdale, Florida, USA, pp.204-213.
12. 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
13. 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