

Оценка производительности широковещательных технологий в сетях с протоколом IEEE 802.11

А.И.Ляхов, д-р техн. наук
Институт проблем передач информации РАН, Москва, Россия
П.Е.Пупырев, Tokyo University, Japan

Данная статья посвящена проблемам реализации широковещания в беспроводных сетях с протоколом IEEE 802.11 и распределенным управлением. Впервые разрабатывается аналитический метод, основанный на марковских моделях и позволяющий эффективно оценивать основной показатель производительности таких сетей – среднее время оповещения.

Evaluation of Broadcasting Technologies Performance in IEEE 802.11 Networks

A.I.Lyakhov
Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow, Russia
P.E.Poupyrev, Tokyo University, Japan

The paper is devoted to the problems of broadcasting implementation in IEEE 802.11 wireless networks with distributed control. We develop the first analytical method based on Markov models to estimate efficiently the main performance index in these networks: the mean notification time.

1. Введение

Протокол IEEE 802.11 [1] – это одна из наиболее популярных беспроводных технологий организации мобильных и ad hoc сетей. В этом протоколе основным механизмом доступа является схема распределенного управления DCF (Distributed Coordination Function), реализующая множественный доступ к несущей с избеганием коллизий (CSMA/CA). В абсолютном большинстве предшествующих работ (см., например, [2-4]), посвященных протоколу IEEE 802.11, его производительность оценивалась при направленной (unicast) передаче, когда пакет предназначается только одной станции-адресату. Однако протокол регламентирует также механизм широковещательной передачи пакета, когда пакет передается всем станциям данной сети (broadcast). Особый интерес представляет широковещательная передача пакетов при распределенном режиме управления.

В целом, и в России, и за рубежом ведутся разработки систем, основанных на широковещательной передаче пакетов в распределенном режиме управления. К примеру – проект «Whizbe» [5], где разрабатывается программное обес-

печение для карманных компьютеров с радиointерфейсом, которое позволит всем устройствам, находящимся территориально в одном месте, самоорганизовываться в локальную сеть и оповещать о присутствии владельцев этих устройств в данном месте. При этом предполагается, что количество станций в таких сетях может достигать 10000 в местах массового скопления людей, например на стадионе.

Отдельным направлением развития беспроводных сетей стали беспроводные распределенные сети датчиков, которые сейчас находят самые разнообразные применения, такие как, например:

- беспроводные датчики слежения за температурой в комнатах дома, передающие информацию на приемник климатической системы, приемник противопожарной охраны, на приемник рабочей станции владельца дома [6];
- датчики утечки газопровода на нефтегазовых предприятиях, где измеряемые данные поступают диспетчерам ремонтных служб, причем в таких системах обычно устанавливается сразу несколько приемников сигнала для большей надежности, что обуславливает необходимость ширококвещательной передачи.

В такого рода ширококвещательных системах ключевым моментом является оптимизация среднего времени генерации пакетов, т.е. временного интервала между последовательными моментами, когда источник данных помещает следующий пакет в очередь ширококвещательного устройства. В качестве критерия оптимизации можно рассматривать среднее время оповещения, понимаемое как временной интервал между последовательными приемами пакетов от одного и того же источника.

В схеме IEEE 802.11 DCF никаких механизмов подтверждения пакетов с ширококвещательными сообщениями не предусмотрено. Устройство начинает передачу кадра DATA, содержащего ширококвещательный пакет, при следующих условиях:

- 1) канал свободен в течение DIFS (Distributed InterFrame Space) с момента последней передачи по сети;
- 2) время отсрочки устройства истекло;
- 3) в очереди устройства есть пакеты для передачи.

В частности, при прибытии нового пакета устройство либо немедленно начинает его передачу, если канал был свободен, а устройство было в состоянии простоя, либо переходит в состояние отсрочки. Будем называть указанную немедленную передачу пакета *асинхронной*, отличая ее от *синхронной* передачи, выполняемой после отсрочки. При переходе в состояние отсрочки счетчик времени нахождения в состоянии отсрочки устанавливается в начальное значение b , которое называется временем отсрочки, измеряется в слотах длительностью σ и равномерно выбирается из множества $(0, \dots, W-1)$. Значение W , называемое конкурентным окном, не зависит от числа сделанных попыток (в отличие от адресной передачи), так как ширококвещательная передача не подтверждается и следовательно повторные передачи на MAC-уровне отсутствуют.

Отсчет времени отсрочки ведется только при свободном канале, прекращается, когда канал становится занят, и возобновляется спустя DIFS после его освобождения. Станция начинает синхронную передачу, когда ее счетчик отсрочки становится равным нулю. Если эта ситуация происходит одновременно на двух и более станциях, имеет место коллизия, при которой все передаваемые пакеты этих станций теряются.

Станция, завершившая передачу пакета, возвращается в состояние отсрочки. Если по окончании времени отсрочки очередь станции пуста, то эта станция переходит в состояние простоя.

2. Аналитическая модель

Итак, рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из N станций, каждая станция генерирует широкополосные пакеты одинаковой длины с интенсивностью λ . Предполагается экспоненциальное распределение времен генерации, и, кроме того, очередь пакетов каждой станции может содержать не более B пакетов, а время распространения сигнала пренебрежимо мало.

Разрабатываемая аналитическая модель направлена на определение оптимальных значений интенсивностей генерации пакетов λ (при заданном количестве станций N), что бы минимизировать среднее время оповещения T_{OPOV} . Попутно определяются такие важные показатели производительности беспроводной сети как вероятность коллизий пакетов P_C и вероятность отказа в обслуживании из-за переполнения буфера очереди P_{REJ} .

Опишем поведение станции данной сети цепью Маркова на рис. 1. Как и в [2], единицей времени рассматриваемого Марковского процесса является виртуальный слот (промежуток времени между последовательным изменением счетчика отсрочки у каждой станции, не находящейся в состоянии простоя), причем возможны лишь следующие три вида слотов:

- а) «пустой» слот, во время которого ни одна станция не вела передачу,
- б) асинхронный слот, в котором какая-либо станция вела асинхронную передачу,
- в) синхронный слот, в котором какая-либо станция пыталась вести синхронную передачу.

Заметим, что асинхронная передача происходит только при отсутствии синхронных передач других станций, а так как $N\lambda\sigma \ll 1$, то можно считать, что за время одного слота отсрочки в сети может произойти не более одной асинхронной передачи. Следовательно, асинхронная передача всегда успешна.

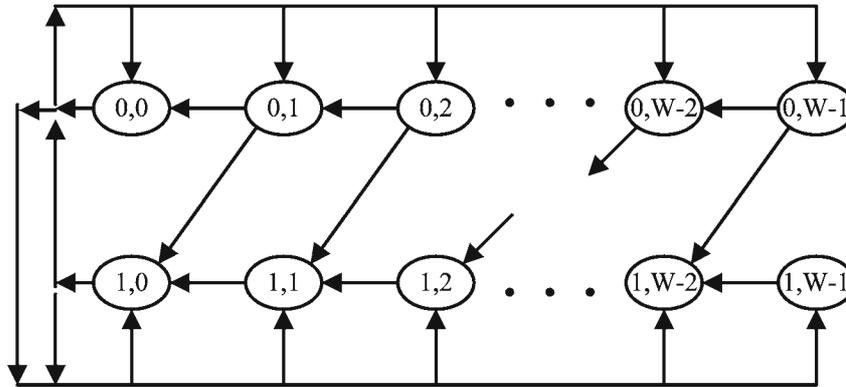


Рис. 1. Цепь Маркова, изображающая состояния станции.

Цепь Маркова на рис.1 включает в себя состояния (i, k) , где $i = 0, 1$ – флаг наличия пакетов в очереди, а $k = 0, \dots, W-1$ характеризует значение счетчика отсрочки. В ней состоянию простоя станции соответствует состояние $(0, 0)$. Состояния, когда у станции нет пакета для передачи, но при этом она выполняет процедуру отсчета – это $(0, 1) \dots (0, W-1)$. Наконец, состояния, когда в очереди есть пакеты и станция выполняет процедуру отсчета – это $(1, 0) \dots (1, W-1)$.

Пусть $\alpha(i, k)$ – стационарная вероятность состояния (i, k) , а $P\{i_2, k_2 | i_1, k_1\}$ – вероятность перехода из (i_1, k_1) в (i_2, k_2) . Введем следующие обозначения:

P_0 – вероятность опустошения очереди после завершения синхронного обслуживания.

P_S – вероятность прихода хотя бы одного пакета за время виртуального слота, при условии, что очередь данной станции пуста. Очевидно, что эта вероятность включает в себя два компонента: $P_S = P_S^F + P_S^E$, где P_S^F и P_S^E – вероятности прихода хотя бы одного пакета за время соответственно непустого и пустого слота, при условии, что очередь данной станции пуста.

P_T – вероятность прихода хотя бы одного пакета за время передачи, включая интервал задержки DIFS.

Определим возможные одношаговые ненулевые переходы между состояниями и соответствующие им вероятности переходов:

- $P\{1, k | 1, k+1\} = 1, k \in [0, W-2]$, – уменьшение счетчика отсрочки.
- $P\{1, k | 1, 0\} = \frac{1 - \bar{P}_0}{W}, k \in [0, W-1]$, – синхронная передача, после которой в

очереди есть еще хотя бы один пакет; $\bar{P}_0 = P_0 e^{-\lambda DIFS}$.

- $P\{0, k | 1, 0\} = \frac{\bar{P}_0}{W}$, $k \in [0, W-1]$, – синхронная передача, после которой в очереди больше нет пакетов.
- $P\{1, k | 0, k+1\} = P_S$, $k \in [0, W-2]$, – уменьшение счетчика отсрочки и в пустую очередь приходит пакет.
- $P\{0, k | 0, k+1\} = 1 - P_S$, $k \in [0, W-2]$, – уменьшение счетчика отсрочки, очередь остается пустой.
- $P\{1, k | 0, 0\} = \frac{P_S^F + P_S^E P_T}{W}$, $k \in [0, W-1]$, – переход из состояния простоя в состояние отсрочки. Такой переход имеет место, если в момент прихода пакета среда была занята или в момент асинхронной передачи приходит еще один пакет.
- $P\{0, k | 0, 0\} = \frac{P_S^E (1 - P_T)}{W}$, $k \in [1, W-1]$, – переход соответствует асинхронной передаче, после которой в очереди нет больше пакетов и счетчик $b=k>0$.
- $P\{0, 0 | 0, 0\} = 1 - P_S + \frac{P_S^E (1 - P_T)}{W}$, – нет поступивших пакетов или имела место асинхронная передача, за время которой не поступило больше пакетов и счетчик $b=0$.

Определим стационарные вероятности. Исходя из уравнений глобального баланса для состояний $(0, k)$

$$\alpha(0, W-1) = \kappa_0 = \alpha(1, 0) \frac{\bar{P}_0}{W} + \alpha(0, 0) \frac{P_S^E (1 - P_T)}{W},$$

$$\alpha(0, W-j) = \kappa_0 + (1 - P_S) \alpha(0, W-j+1), \quad j=2, \dots, W-1,$$

имеем

$$\alpha(0, W-j) = \kappa_0 \sum_{k=0}^{j-1} (1 - P_S)^k = \kappa_0 \frac{1 - (1 - P_S)^j}{P_S}, \quad j=1, \dots, W-1.$$

Из уравнений глобального баланса для состояний $(1, k)$

$$\alpha(1, W-1) = \kappa_1 = \alpha(1, 0) \frac{1 - \bar{P}_0}{W} + \alpha(0, 0) \frac{P_S^F + P_S^E P_T}{W},$$

$$\alpha(1, W-j) = \kappa_1 + P_S \cdot \alpha(0, W-j+1) + \alpha(1, W-j+1), \quad j=2, \dots, W,$$

имеем

$$\alpha(1, W-j) = j\kappa_1 + \left(j - \sum_{k=0}^{j-1} (1 - P_S)^k \right) \kappa_0 = j(\kappa_1 + \kappa_0) - \kappa_0 \frac{1 - (1 - P_S)^j}{P_S}, \quad j=1, \dots, W.$$

В частности, для $(1, 0)$ получаем:

$$\alpha(1, 0) = P_S \cdot \alpha(0, 0) + \alpha(1, 0) - \left(\alpha(1, 0) \frac{\bar{P}_0}{W} + \alpha(0, 0) \frac{P_S^E (1 - P_T)}{W} \right) \frac{1 - (1 - P_S)^j}{P_S},$$

откуда выражаем $\alpha(1, 0)$ через $\alpha(0, 0)$

$$\alpha(1, 0) = \frac{\frac{WP_S^2}{1-(1-P_S)^W} - P_S^E (1-P_T)}{\bar{P}_0} \cdot \alpha(0, 0).$$

Аналогично выражаем остальные стационарные вероятности

$$\alpha(0, W-j) = P_S \cdot \frac{1-(1-P_S)^j}{1-(1-P_S)^W} \cdot \alpha(0, 0), \quad j=1, \dots, W-1,$$

$$\alpha(1, W-j) = \left\{ \frac{j}{W} \left(P_S + \frac{\frac{WP_S^2}{1-(1-P_S)^W} - P_S^E (1-P_T)}{\bar{P}_0} \right) - P_S \frac{1-(1-P_S)^j}{1-(1-P_S)^W} \right\} \cdot \alpha(0, 0),$$

$j=1, \dots, W$. $\alpha(0, 0)$ определяется исходя из нормировочного уравнения

$\sum_{(i,k)} \alpha(i, k) = 1$. В итоге получаем:

$$\alpha(0, 0) = \left\{ 1 - P_S + \frac{W+1}{2} \cdot \left(P_S + \frac{\frac{WP_S^2}{1-(1-P_S)^W} - P_S^E (1-P_T)}{\bar{P}_0} \right) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

$$\alpha(1, 0) = \frac{\frac{WP_S^2}{1-(1-P_S)^W} - P_S^E (1-P_T)}{\bar{P}_0} \cdot \alpha(0, 0), \quad (2)$$

$$\alpha(0, j) = P_S \cdot \frac{1-(1-P_S)^{W-j}}{1-(1-P_S)^W} \cdot \alpha(0, 0), \quad j=1, \dots, W-1, \quad (3)$$

$$\alpha(1, j) = \frac{W-j}{W} [P_S \cdot \alpha(0, 0) + \alpha(1, 0)] - \alpha(0, j), \quad j=1, \dots, W-1. \quad (4)$$

Пусть τ – вероятность синхронной передачи данной станции за время виртуального слота. Очевидно, что $\tau = \alpha(1, 0)$. Кроме того, вероятность того, что синхронная передача станции будет неудачна из-за коллизии и вероятность асинхронной передачи станции τ_a очевидно равны:

$$P_C = 1 - (1-\tau)^{N-1}, \quad \tau_a = \alpha(0, 0)P_S^E.$$

Определим времена длительности возможных слотов:

- длительность слота при синхронной передаче $t_S = t_p + DIFS$,
- длительность слота при асинхронной передаче $t_A = (\sigma/2) + t_p + DIFS$,
- длительность пустого слота σ – по определению.

Вероятность прихода пакета за время передачи с учетом DIFS, будет равна $P_T = 1 - e^{-\lambda_s}$. Теперь определим вероятности P_S^F и P_S^E . Рассмотрим три возможных случая.

1. Синхронная передача другой станции. Вероятность случая – $Q_S = 1 - (1 - \tau)^{N-1}$, а вероятность поступления пакета – $Q_S P_T$.
2. Асинхронная передача другой станции. При анализе этого случая используем допущение о том, что за один виртуальный слот может произойти только одна асинхронная передача, и она успешна. Тогда условная вероятность этого случая равна $Q_A = (N-1)\tau_a(1-\tau)^{N-2}$, а вероятность поступления – $Q_A P_T$.
3. Отсутствие передачи пакета другими станциями. Вероятность случая – $Q_E = 1 - Q_S - Q_A$, а вероятность прихода хотя бы одного пакета за время пустого слота, при условии, что очередь данной станции пуста, равна: $P_S^E = Q_E(1 - e^{-\lambda\sigma})$.

Следовательно, вероятность прихода хотя бы одного пакета за время непустого слота, при условии, что очередь данной станции пуста, равна $P_S^F = (Q_S + Q_A)P_T$.

Для завершения определения модели осталось найти P_0 – вероятность опустошения очереди после завершения обслуживания. Процесс изменения очереди можно описать следующей моделью, показанной на рис. 2.

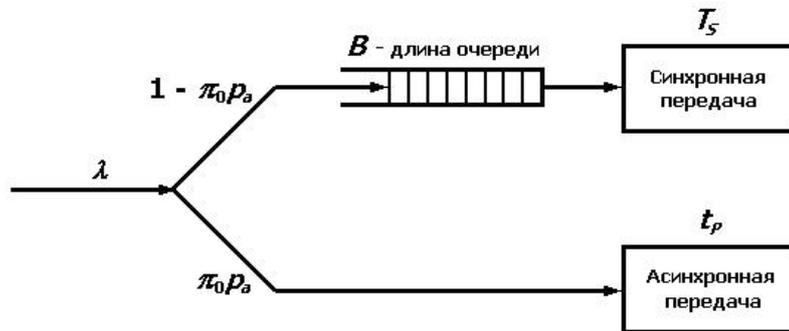


Рис. 2. Процесс изменения очереди.

Пакеты, приходящие на станцию, не занятую обслуживанием других пакетов, с вероятностью p_a обслуживаются асинхронно и поэтому успешно в течение времени t_p . В остальных случаях они поступают в буфер размером B и обслуживаются синхронно в течение случайного времени со средним значением T_S .

Предположим, что время синхронного обслуживания распределено экспоненциально. Тогда изменение очереди синхронного обслуживания пакетов,

очевидно, описывается процессом рождения – гибели, стационарная вероятность состояния i которого равна $\pi_i = \pi_0 \lambda_0 \lambda^{i-1} (T_S)^i$, где $i = 1, \dots, B$, $\lambda_0 = (1 - p_a) \lambda$, а $1 - p_a$ – вероятность того, что пакет, пришедший в пустую очередь, будет передан синхронно. Следовательно, вероятность опустошения очереди после завершения синхронного обслуживания равна $P_0 = \frac{\pi_1}{1 - \pi_0}$, а

так как

$$\pi_0^{-1} = 1 + (1 - p_a) \sum_{i=1}^B (\lambda T_S)^i, \text{ то } P_0 = 1 / \sum_{i=1}^B (\lambda T_S)^{i-1}.$$

Попутно определим вероятность отказа в обслуживании пакета вследствие переполнения очереди:

$$P_{REJ} = \pi_B = \pi_0 (1 - p_a) (\lambda T_S)^B$$

Оценку вероятности p_a , а также времени синхронного обслуживания T_S и основного показателя производительности T_{OPOV} проведем в следующем разделе.

3. Оценка показателей производительности

Для нахождения вероятности p_a и среднего времени синхронного обслуживания разобьем пакеты, обслуживаемые синхронно, поступающие в течение всех возможных виртуальных слотов (i, k) на следующие 4 категории:

- 1) поступление в течение слотов $(1, k)$, где $k \in [0, W - 1]$;
- 2) поступление в течение слотов $(0, k)$, где $k \in [1, W - 1]$;
- 3) поступление в течение передачи другой станции во время слота $(0, 0)$;
- 4) поступление во время асинхронной передачи данной станции.

Для каждой из этих категорий подсчитаем среднее количество поступающих синхронно обслуживаемых пакетов n_i и n_i^0 ($i = 1, \dots, 4$), где n_i – общее количество пакетов, а n_i^0 – количество пакетов, поступающих в пустую очередь.

Доля пакетов приходящих в пустую очередь и обслуживаемых асин-

хронно: $p_a = \tau_a / \left(\tau_a + \sum_{i=1}^4 n_i^0 \right)$, а

$$T_S = \left[(T_S^* + DIFS) \sum_{i=1}^4 (n_i - n_i^0) + \sum_{i=1}^4 T_S^i n_i^0 \right] / \sum_{i=1}^4 n_i,$$

где $T_S^* = \frac{W-1}{2} t_{VS} + t_P$, а $t_{VS} = Q_E \sigma + Q_S t_S + Q_A t_A$, – средняя длительность виртуального слота, в котором данная станция воздерживается от передачи.

Кроме того, T_S^i – средние времена обслуживания пакетов, поступающих в пустую очередь.

Найдем значения n_i, n_i^0 и T_S^i для каждой из введенных категорий.

Категория 1. Поступление в течение слотов $(1, k)$, где $k \in [0, W-1]$. Пакеты поступают в пустую очередь в течение интервала DIFS, следующего за синхронной передачей другого пакета. Поэтому $n_1^0 = (1 - e^{-\lambda \cdot DIFS}) \bar{P}_0 \cdot \alpha(1, 0)$, а общее число пакетов, поступивших в течение слотов этой категории $n_1 = \lambda t_{VS} \sum_{k=1}^{W-1} \alpha(1, k) + \lambda t_p \cdot \alpha(1, 0)$, и $T_S^1 = T_S^* + \frac{DIFS}{2}$.

Категория 2. Поступление в течение слотов $(0, k)$, где $k \in [1, W-1]$. Так как только первый пакет, поступивший в течение каждого из данных слотов, поступает в пустую очередь, то $n_2^0 = Q^* \sum_{k=1}^{W-1} \alpha(0, k)$, где

$$Q^* = Q_E (1 - e^{-\lambda t_{SLOR}}) + Q_S (1 - e^{-\lambda t_S}) + Q_A (1 - e^{-\lambda t_A}),$$

а $n_2 = \lambda t_{VS} \sum_{k=1}^{W-1} \alpha(0, k)$. В этом случае, при поступлении пакета в пустую очередь, среднее время обслуживания для k -го слота будет $T_S^{2(k)} = \left(k - \frac{1}{2}\right) t_{VS} + t_p$ и окончательно

$$T_S^2 = t_p + \frac{t_{VS} Q^*}{n_2^0} \sum_{k=1}^{W-1} \left(k - \frac{1}{2}\right) \alpha(0, k).$$

Категория 3. Пакеты поступают в течение слота $(0, 0)$, и в это время идет передача другой станции. Для этого случая $n_3^0 = [Q_S (1 - e^{-\lambda t_S}) + Q_A (1 - e^{-\lambda t_A})] \alpha(0, 0)$, $n_3 = \lambda (Q_S t_S + Q_A t_A) \alpha(0, 0)$,

и среднее время обслуживания равно $T_S^3 = T_S^* + \frac{Q_S t_S + Q_A t_A}{2(1 - Q_E)}$.

Категория 4. Пакет, поступает в течение слота $(0, 0)$ и в течение этого слота происходит асинхронная передача этой станции. Среднее время обслуживания для пакета, поступившего в пустую очередь, в этом случае равно

$T_S^4 = T_S^* + \frac{t_S}{2}$. Количество таких пакетов $n_4^0 = P_S^E (1 - e^{-\lambda t_S}) \alpha(0, 0) = P_T \tau_a$,

а общее количество $n_4 = \tau_a \lambda (t_p + DIFS) = \tau_a \lambda \cdot t_S$.

Окончательно, учитывая асинхронную передачу, получаем среднее время оповещения:

$$T_{OPOV} = \frac{1}{\lambda(\pi_0 P_a + (1 - \pi_0 P_a)(1 - P_C)(1 - P_{REJ}))}. \quad (5)$$

4. Численные результаты

Для обоснования работоспособности аналитической модели использовалось имитационное моделирование. На рис. 3 приведена зависимость среднего времени оповещения от среднего времени генерации, полученная аналитически и имитационно, при количестве станций в локальной беспроводной сети $N=50$ и размере пакета данных $L=1000$ байт, что соответствует времени передачи кадра $t_p=850$ мкс. Результаты имитационного моделирования полностью подтверждают работоспособность аналитической модели.

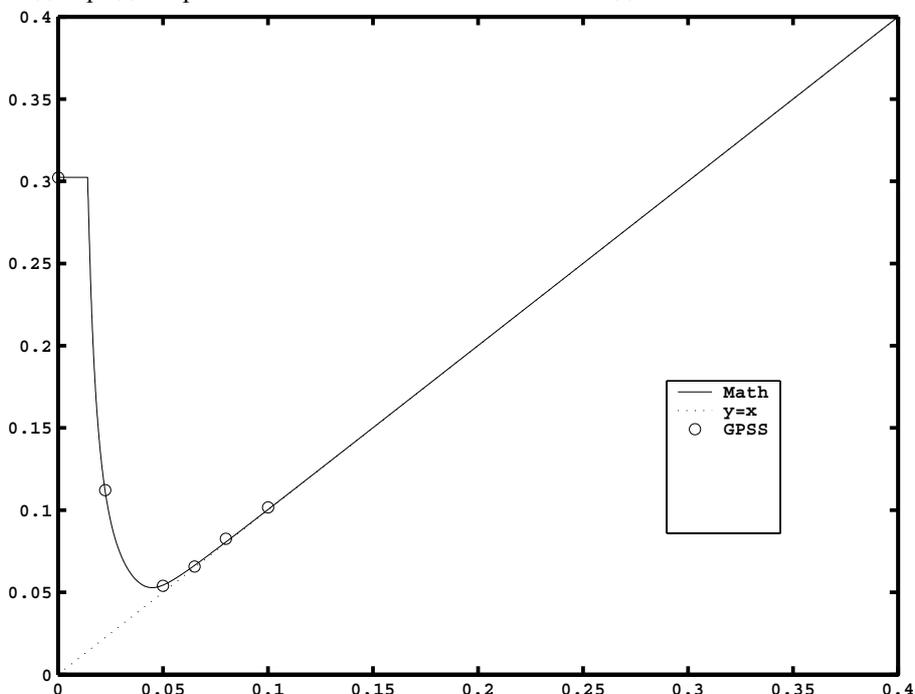


Рис.3. Зависимости среднего времени оповещения от среднего времени генерации λ^{-1} (с), полученные аналитически (Math) и имитационно (GPSS)

На графике явно выражено минимальное значение среднего времени оповещения. Его возрастание при увеличении среднего времени генерации обуславливается тем, что все пакеты передаются асинхронно, а значит успешно, и в этом случае время оповещения в точности равно времени генерации. Возрастание времени оповещения при уменьшении времени генерации обуславливается процессами коллизий, так как большая часть пакетов передается син-

хронно, и отказами в обслуживании вследствие переполнения очереди. Случаю насыщения, когда в очередях станций всегда есть пакеты, соответствует горизонтальный участок графика.

5. Заключение

В этой статье разработан новый аналитический метод оценки производительности ширококвещательной беспроводной сети с протоколом IEEE 802.11. Этот метод, основанный на марковских моделях, позволяет с высокой точностью оценивать основной показатель производительности – среднее время оповещения. Использование данного метода позволяет эффективно проводить оптимизацию времени генерации ширококвещательных сообщений с целью минимизации среднего времени оповещения.

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. Pupyrev P., Kosuga M., Davis P. Analysis of Wireless Message Broadcast in Large Ad Hoc Networks of PDAs // Proc. 4th IEEE conf. on Mobile and Wireless Communications Networks, pp. 299-303, 2002.
6. Cheng L., Marsic I. Piecewise Network Awareness Service for Wireless/Mobile Pervasive Computing // Mobile Networks and Applications (MONET), Vol. 7, No. 4, pp. 269-278, 2002.