

УДК 004.728.3.057.4

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ

А. В. Анисимов,

аспирант

А. М. Тюрликов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается режим ожидания стандарта IEEE 802.16m, приводится анализ средней задержки и показателей энергоэффективности мобильной станции при приеме потока данных с переменной интенсивностью при использовании данного режима.

Ключевые слова — сбережение энергии, качество обслуживания, режим ожидания.

Введение

В настоящее время при проектировании и развертывании систем передачи информации все большее распространение получают беспроводные технологии широкополосного доступа. Среди них лидирующие позиции прочно удерживают IEEE 802.16 и LTE (*Long Term Evolution*). Обе технологии обладают широкими возможностями по поддержке работы мобильных пользователей. Поскольку мобильные станции (МС) пользователей имеют ограниченный запас аккумуляторной батареи, остро встает задача выработки новых и улучшения существующих механизмов сбережения энергии, потребляемой МС.

Вместе с тем современные стандарты широкополосных беспроводных технологий ограничиваются общим описанием механизмов сбережения энергии и не предоставляют информации о методах выбора параметров для их оптимальной работы. Существенным также является тот факт, что ненадлежащее использование механизмов сбережения энергии не только повышает энергозатраты МС, но и может привести к снижению показателей качества обслуживания пользователей. Как следствие, важной прикладной задачей становится разработка способов выбора оптимальных параметров для эффективного функционирования механизмов сбережения энергии. Решению данной задачи и посвящена настоящая работа.

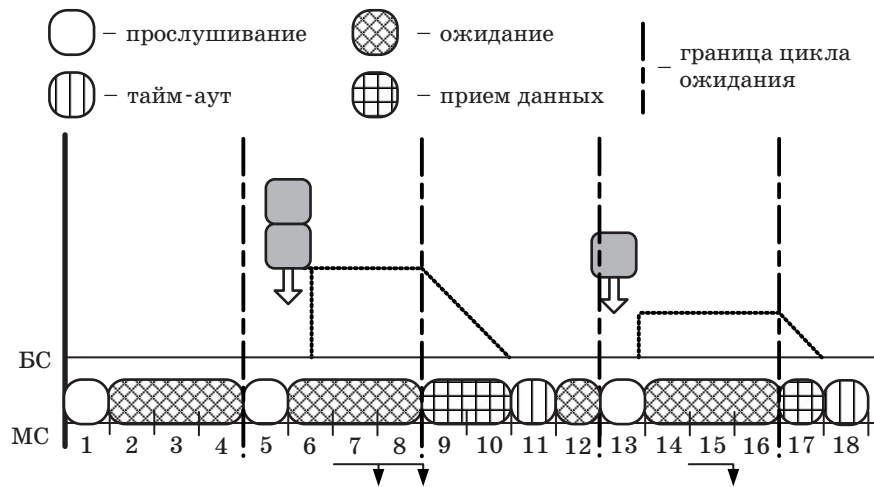
Поскольку технология беспроводного доступа IEEE 802.16 к настоящему моменту получи-

ла наиболее широкое распространение, дальнейшее изложение построено с учетом ее особенностей согласно новейшему стандарту IEEE 802.16m [1]. Сами особенности стандарта IEEE 802.16m были подробно описаны в книге [2]. В данной работе рассматриваются только аспекты, связанные с функционированием механизма сбережения энергии (или режима ожидания, *sleep mode*) при нисходящей передаче информации.

Режим ожидания стандарта IEEE 802.16m

Согласно стандарту IEEE 802.16m, время функционирования системы разбивается на одинаковые временные отрезки, которые называются кадрами. Далее длительность всех рассматриваемых временных интервалов мы будем измерять в кадрах.

Основная идея режима ожидания состоит в том, что все время функционирования МС разбивается на интервалы времени, которые называются циклами ожидания. Длительность цикла ожидания обозначается S . Каждый цикл ожидания состоит из активного интервала и интервала ожидания. Во время активного интервала радиотракт на МС включен и МС слушает радиоканал, а во время интервала ожидания МС отключает свой радиоприемник и канал не слушает, таким образом снижая свои энергозатраты. Каждый цикл ожидания начинается с активного интервала. На рис. 1 представлен пример функционирования системы в режиме ожи-



■ Рис. 1. Режим ожидания

дания. В начале каждого цикла ожидания в течение некоторого времени базовая станция *BC* сообщает *МС*, есть ли у нее данные для передачи. Такой интервал времени называется интервалом прослушивания, его длительность обозначается *L*. Если данных нет, *МС* переключается в состояние ожидания, выключая свой приемник. В случае, когда у *BC* есть данные для передачи, начинается их передача к *МС*. При этом длительность активного интервала увеличивается, а интервала ожидания уменьшается. Период времени, в течение которого *МС* осуществляет прием данных от *BC*, будем называть интервалом приема. Интервал приема может длиться до конца цикла ожидания.

После каждого кадра, в котором была передача данных, *МС* продолжает слушать канал в течение некоторого времени. Такой интервал времени будем называть тайм-аутом и обозначать *T*. Наличие тайм-аута необходимо для того, чтобы узнать, есть ли на *BC* еще данные для передачи. Если за время тайм-аута новой передачи данных не было, *МС* переключается в состояние ожидания до конца текущего цикла.

Соответственно, режим ожидания полностью задается тремя параметрами *C, L, T*.

Обзор работ по режиму ожидания

В настоящее время множество научных работ посвящено анализу режима энергосбережения в стандарте IEEE 802.16e. Наиболее полный анализ, проведенный в работах [3, 4], основан на изучении системы *M/GI/1/K* с перерывами. Авторы приводят также алгоритм оптимизации для случая, когда имеется ограничение на вероятность потери сообщения с данными. В статье [5] детальный анализ режима ожида-

ния построен на изучении системы *M/G/1* с перерывами, длительность которых может иметь различные распределения. Помимо анализа приводится набор оптимизационных алгоритмов в зависимости от того, какие параметры системы известны. Однако во всех вышеперечисленных работах в качестве входного потока используется поток Пуассона. Отдельный интерес представляет рассмотрение входных потоков, отличных от пуассоновского. В частности, в работе [6] изучается влияние вида входного потока на энергопотребление *МС* в режиме ожидания и сравниваются результаты для случаев с пуассоновским входным потоком и входным потоком Эрланга. Анализ задержки и энергопотребления в режиме ожидания при использовании модели входного потока *DBMAP (Discrete-time Batch Markovian Arrival Process)* представлен в работе [7].

Все приведенные работы посвящены изучению режима ожидания стандарта IEEE 802.16e. Данный режим сильно отличается от режима ожидания стандарта IEEE 802.16m. В работе [8] можно найти анализ энергопотребления *МС* при режиме ожидания стандарта IEEE 802.16m и передаче пуассоновского потока.

В настоящей статье представлен анализ средней задержки и энергозатрат *МС* во время функционирования в режиме ожидания стандарта IEEE 802.16m при передаче пуассоновского потока и частного случая *DBMAP* потока. Кроме этого, ставится и решается оптимизационная задача по обеспечению требуемых параметров качества обслуживания при минимизации энергозатрат *МС*, а также рассматривается влияние различных моделей потоков данных и изменения их характеристик на среднюю задержку и энергозатраты.

Оптимизационная задача

Технология IEEE 802.16 обеспечивает качество обслуживания (QoS) для различных типов пользовательских потоков. К параметрам качества обслуживания относятся задержка, вариация задержки (*jitter*), минимальная зарезервированная и максимальная скорости потока данных. Очевидно, что использование режима ожидания негативно влияет (увеличивает значения) на задержку и вариацию задержки. Соответственно выбор параметров режима ожидания необходимо осуществлять так, чтобы обеспечить требуемые значения параметров качества обслуживания. В данной работе учитывается только один параметр — средняя задержка. И задача минимизации энергозатрат решается при ограничении на среднюю задержку передачи данных.

Минимизировать

$$f_E(C, L, T)$$

при ограничении

$$f_D(C, L, T) \leq D_{\max},$$

где D_{\max} — максимально допустимая средняя задержка; C — длительность цикла ожидания; L — длительность периода прослушивания; T — тайм-аут.

Модель системы передачи информации

Для анализа режима ожидания была разработана модель системы передачи информации, которая описывается следующим набором допущений.

Допущение 1. Рассматривается функционирование системы связи, состоящей из одной БС и одной МС.

Допущение 2. Рассматривается только нисходящая передача данных (от БС к МС).

Допущение 3. В течение кадра может быть передано не более одного сообщения с данными.

Допущение 4. Сообщения передаются на МС в порядке их поступления на БС, без перерывов в расписании.

Допущение 5. Если сообщение с данными поступило в буфер БС в течение кадра с номером k , то оно может быть передано МС не ранее следующего кадра, т. е. кадра с номером $k + 1$.

Допущение 6. Входной поток сообщений представляет собой поток Пуассона.

Допущение 7. Мощность, потребляемая МС в состоянии ожидания, равна P_S , а в состоянии прослушивания — P_A .

Кратко поясним приведенные допущения. Допущение 1 вызвано тем, что влияние расписания передач одной МС на расписания передач других

МС определяется набором правил и алгоритмов, которые используются планировщиком на БС. Однако алгоритм работы планировщика не описан в стандарте [1], а разработка и анализ различных алгоритмов работы планировщика выходят за рамки статьи. Поэтому авторами не учитывается влияние МС друг на друга и рассматривается только одна пара БС — МС. Кроме этого, учитывается только нисходящая передача данных, так как количество передаваемых данных от БС к МС существенно больше, чем в обратном направлении (5:1) [9]. В связи с тем, что рассмотрение функционирования планировщика оставлено за пределами данной работы, приняты допущения 3 и 4. Допущение 5 основано на том факте, что составление расписания передач для кадра с номером $k + 1$ осуществляется во время кадра с номером k . Допущение 7 не накладывает каких-либо существенных ограничений на применимость приводимого ниже анализа, который может быть легко расширен для случая с большим количеством уровней потребляемой мощности. Для получения численных значений приняты $P_A = 750$ мВт и $P_S = 50$ мВт [8].

Анализ режима ожидания при пуассоновском входном потоке

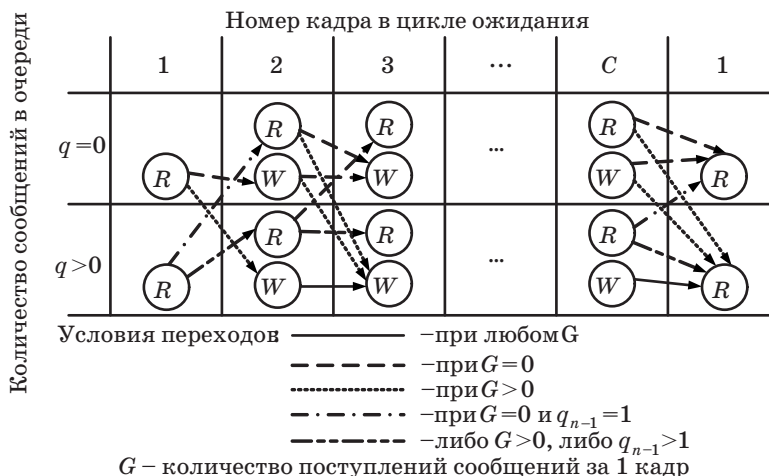
Общий подход к анализу.

Принятая выше модель может быть описана с помощью системы массового обслуживания M/D/1 с перерывами. Однако прямое применение результатов анализа такой модели из известных работ [10, 11] невозможно из-за того, что в нашем случае длительности перерывов (периодов ожидания) имеют различные распределения и зависят между собой.

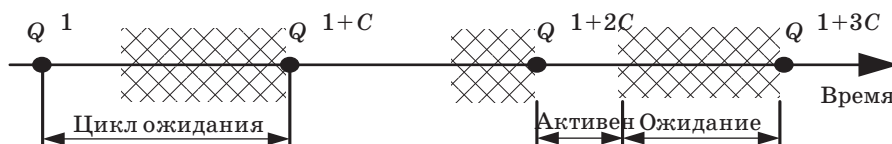
В рамках анализа средней задержки передачи сообщений и энергозатрат МС в условиях функционирования системы в режиме ожидания используются следующие обозначения: C ; L ; k — номер цикла ожидания; λ — интенсивность входного потока, сообщений/кадр. Для упрощения описания анализа предполагается, что $L = T = 1$.

Рассмотрим случайный процесс (Q^t, M^t) , где Q^t — количество сообщений в очереди на БС в начале кадра с номером t ; M^t — состояние МС в начале кадра с номером t , который может принимать два значения: R — активное состояние и W — состояние ожидания. На рис. 2 изображены возможные переходы для данного процесса во время цикла ожидания.

Наблюдать случайный процесс будем в точках начала циклов ожидания (рис. 3). Особенность данных точек состоит в том, что в эти моменты времени система характеризуется только одним параметром — Q^t , потому что в начале цикла



■ Рис. 2. Возможные переходы



■ Рис. 3. Формирование вложенной цепи Маркова

ожидания МС всегда переключается в активное состояние. Отметим, что значение Q^{1+nC} зависит только от $Q^{1+(n-1)C}$, поэтому справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Последовательность значений Q^1, Q^{1+C}, Q^{1+2C} образует вложенную цепь Маркова.

С ростом интенсивности длительность периодов ожидания уменьшается, и в предельном случае функционирование системы можно рассматривать как функционирование системы M/D/1, которая является устойчивой при любом $\lambda < 1$. Поэтому справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. Определенная выше цепь Маркова имеет стационарное распределение при $\lambda < 1$.

Строгое доказательство последнего утверждения может быть получено из результатов работы [12].

Введем следующее обозначение для переходных вероятностей:

$$p_{ij}^C = \Pr\{Q^{1+nC} = j | Q^{1+(n-1)C} = i\}.$$

Нижний индекс указывает, как изменилось количество сообщений в очереди на БС, а верхний — за какое количество кадров произошло данное изменение. Расчет переходных вероятностей p_{ij}^C осуществляется по следующему рекуррентному выражению:

$$p_{ij}^C = \begin{cases} A_j^C, & i = 0; \\ 0, & i \geq C, j - (i - C) < 0; \\ A_{j-i+C}^C, & i \geq C, j - (i - C) \geq 0; \\ \sum_{k=0}^{j+C-i} p_{kj}^{C-i}, & 0 < i < C, \end{cases}$$

где A_j^C — вероятность того, что за C кадров поступит ровно j новых сообщений. Для случая с пуассоновским входным потоком $A_j^C = \frac{(\lambda C)^j}{j!} e^{-\lambda C}$.

Граничное условие

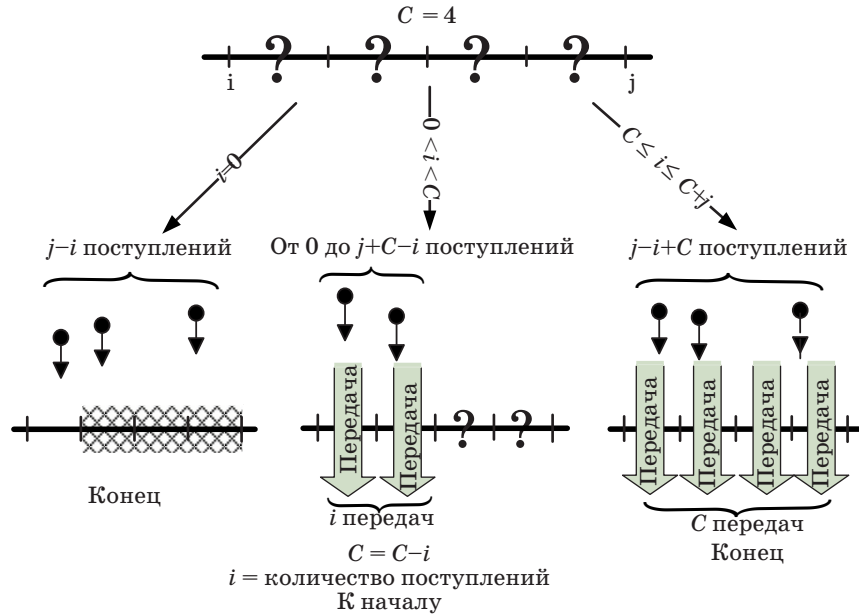
$$p_{ij}^1 = \begin{cases} A_j^1, & i = 0; \\ 0, & i \geq C, j - (i - C) < 0; \\ A_{j-i+C}^1, & i \geq C, j - (i - C) \geq 0. \end{cases}$$

Пример одной итерации расчета переходных вероятностей p_{ij}^C при $C = 4$ приводится на рис. 4.

Введем определение матрицы \mathbf{P} вероятностей переходов, состоящей из элементов p_{ij}^C :

$$\mathbf{P} = [p_{ij}^C].$$

Отметим, что матрица \mathbf{P} имеет следующий вид:



■ Рис. 4. Пример расчета переходных вероятностей

$$P = \begin{pmatrix} P_{00}^C & P_{01}^C & P_{02}^C & \dots \\ P_{10}^C & P_{11}^C & P_{12}^C & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ P_{C0}^C & P_{C1}^C & P_{C2}^C & \dots \\ 0 & P_{C0}^C & P_{C1}^C & \dots \\ 0 & 0 & P_{C0}^C & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Используя специфический вид матрицы, можно рассчитать стационарные вероятности нахождения i сообщений в очереди на БС в начале произвольного цикла ожидания, как показано в работе [13].

Расчет средней задержки и энергозатрат.

Для расчета средней задержки и величины энергозатрат необходимо знать стационарное рас-

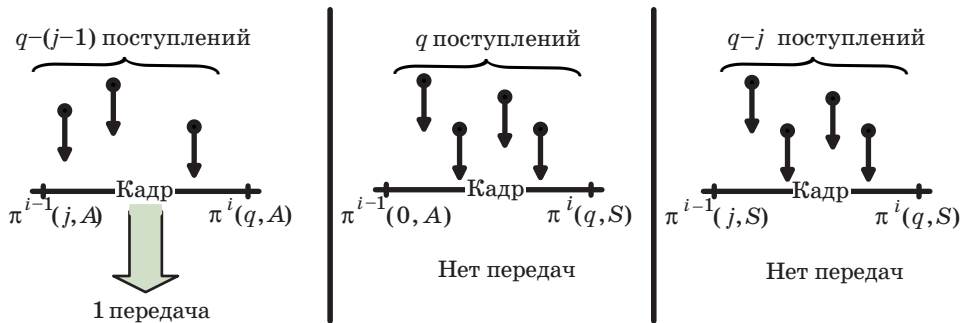
пределение количества сообщений в очереди на БС в начале каждого кадра. Выше был приведен механизм расчета стационарного распределения в начале первого кадра цикла ожидания. Соответственно необходимо рассчитать стационарное распределение в начале каждого кадра внутри цикла ожидания. Введем обозначение данных стационарных распределений

$$\pi^i(q, m) = \lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{Q^{i+C(k-1)} = q, M^{i+C(k-1)} = m\},$$

где $i = [1, C]$.

Возможные переходы за один кадр внутри цикла ожидания изображены на рис. 5. Из рис. 2 и 5 следует, что расчет вероятностей $\pi^i(q, m)$ внутри цикла ожидания осуществляется по следующим формулам:

$$\pi^i(q, R) = \sum_{j=1}^{q+1} \pi^{i-1}(j, R) A_{q-(j-1)}^1; \quad (1)$$



■ Рис. 5. Возможные переходы за один кадр

$$\pi^i(q, W) = \sum_{j=0}^q \pi^{i-1}(j, W) A_{q-j}^1 + \pi^{i-1}(0, R) A_q^1, \quad (2)$$

где A_i^1 — вероятность того, что за один кадр поступит i новых заявок.

Выражение (1) применяется для случая, когда МС находится в активном состоянии (т. е. в предыдущем кадре была передача данных). Переход в активное состояние с q сообщениями в очереди на БС возможен только в том случае, когда МС была в активном состоянии в начале предыдущего кадра и в очереди было хотя бы одно сообщение. Выражение (2) используется для случая, когда МС находится или переходит в состояние ожидания. Если в начале предыдущего кадра сообщений в очереди на БС не было, то МС переключится в состояние ожидания.

Используя полученные ранее значения $\pi^i(q, m)$, можно вычислить среднюю длину очереди в начале каждого кадра в рамках цикла ожидания по формуле

$$E[q^i] = \sum_{l=0}^{\infty} l(\pi^i(l, R) + \pi^i(l, W)).$$

Далее используем обобщенную формулу Литтла для вычисления средней задержки передачи данных

$$E[D] = \frac{\sum_{i=1}^C E[q^i]}{C\lambda} + \frac{F}{2},$$

где $E[q^i]$ — среднее количество сообщений в очереди на БС в начале i -го кадра цикла ожидания; λ — средняя интенсивность входного потока; F — длительность кадра.

Принимая во внимание допущение 7, вычисление средней величины энергопотребления за цикл ожидания осуществим по формуле

$$E[E] = P_A + \sum_{i=2}^C \left(P_S \sum_{j=1}^{i-1} \pi^j(0, R) + P_A \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} \pi^j(0, R) \right) \right).$$

Учет влияния изменчивости входного потока

Изменение модели входного потока.

В настоящее время имеется ряд исследований, в которых утверждается, что потоки данных, возникающие в реальных системах передачи данных, не являются пуассоновскими [14]. Существует множество моделей потоков данных, которые рекомендованы к использованию при изучении современных систем передачи данных (например, [15—17]). Однако данные модели отлича-

ются сложностью построения и анализа. Для изучения влияния изменчивости входного потока на рассматриваемые характеристики системы предлагается использовать упрощенную модель входного потока. Изменим допущение относительно модели входного потока следующим образом.

Допущение 6'. В начале каждого кадра определяется состояние источника сообщений. С вероятностью P_{ON} источник находится в состоянии ON, а с вероятностью P_{OFF} — в состоянии OFF. Число сообщений, поступивших в состоянии ON, является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона с интенсивностью λ_{ON} . В состоянии OFF поступлений сообщений нет.

Описанную выше модель можно рассматривать как частный случай дважды стохастического пуассоновского процесса (ДСПП). Далее такую модель потока мы будем называть потоком со «всплесками». Используя результаты работы [18], приводимый выше анализ может быть обобщен на случай с ДСПП потоком.

Обобщение анализа.

Рассмотрим модель системы, в которой используется входной поток со случайной интенсивностью. В данном случае алгоритм расчета средней задержки и энергозатрат такой же, как и для случая с пуассоновским входным потоком, кроме расчета вероятности A_i^C . При входном потоке со случайной интенсивностью эта вероятность рассчитывается следующим образом:

$$A_i^C = \sum_{j=1}^C P_{OFF}^j P_{ON}^{C-j} \binom{C}{j} \frac{(\lambda_{ON}(C-j))^i}{i!} e^{-\lambda_{ON}(C-j)}.$$

Решение оптимизационной задачи

Из описания алгоритма работы режима ожидания и введенной системы допущений следует справедливость следующего утверждения.

Утверждение 3. Функция средней задержки $f_D(C, 1, 1)$ является монотонно возрастающей при увеличении длительности цикла ожидания C , в то время как функция энергозатрат $f_E(C, 1, 1)$ является монотонно убывающей.

Как следует из данного утверждения, для решения оптимизационной задачи достаточно найти максимальное значение длительности периода ожидания C_{max} , для которого выполняется ограничение из оптимизационной задачи

$$f_D(C_{max}, 1, 1) \leq D_{max},$$

являющееся оптимальным: $C_{max} = C_{opt}$.

Зависимость оптимальной длительности цикла ожидания от средней интенсивности входного

потока при разных типах потока представлена на рис. 6, а. Для построения данного графика было выбрано ограничение на среднюю задержку передачи данных, равное 30 мс. На графике изображены результаты решения оптимизационной задачи, т. е. отмечены длительности циклов ожидания, при которых соблюдается ограничение на среднюю задержку и минимизируются затраты МС.

Вид зависимости оптимальной длительности цикла ожидания от интенсивности входного потока объясняется тем, что в области малых интенсивностей задержка передачи в большей степени определяется длительностью цикла ожидания. Отсюда, продолжительные циклы ожидания недопустимы. С ростом интенсивности потока все большая часть цикла ожидания отводится под прием данных, поэтому длительность цикла ожидания может быть увеличена с соблюдением ограничения на среднюю задержку. Однако с дальнейшим ростом интенсивности входного потока система приближается к точке насыщения, поэтому необходимо уменьшать длительность цикла ожидания.

Также на графике рис. 6, а отражены результаты для случая ДСПП потока с различными вероятностями P_{ON} . При одинаковой средней продолжительности состояний ON и OFF источника сообщений сохраняется такой же вид рассматриваемой зависимости, как и при пуассоновском входном потоке. Однако из-за наличия «всплесков» наблюдаются меньшие значения длительности цикла ожидания в сравнении с пуассоновским входным потоком. Кроме этого, с уменьшением длительности периода ON (и, соответственно, с увеличением длительности OFF периода) изменяется характер зависимости.

Данная зависимость становится монотонно убывающей.

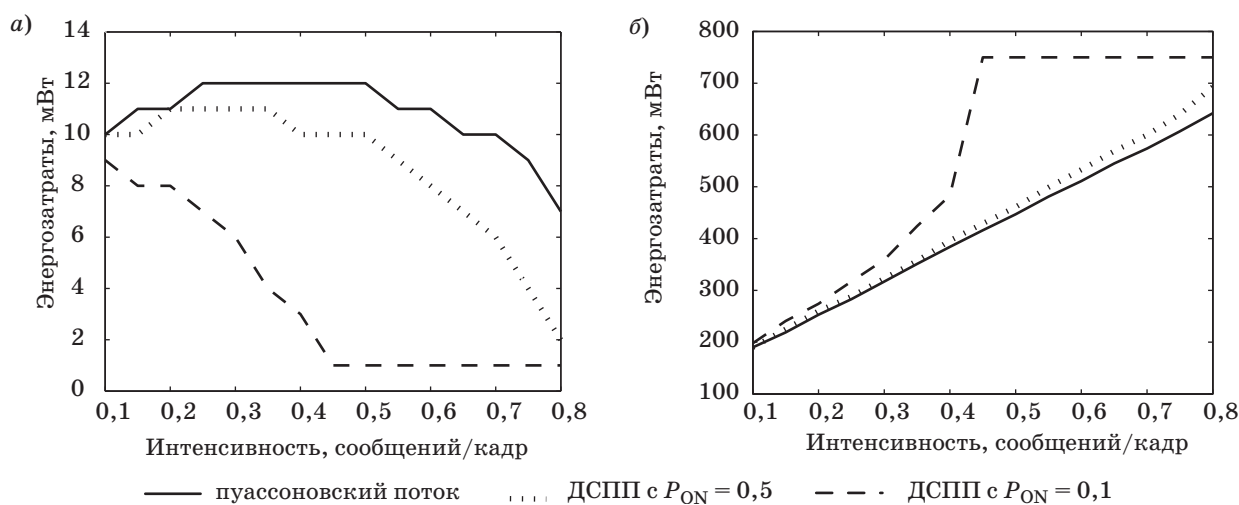
Зависимость энергозатрат от средней интенсивности входного потока изображена на рис. 6, б. Здесь же изображены зависимости для различных моделей входного потока. В случае пуассоновского входного потока энергозатраты линейно увеличиваются с ростом средней интенсивности. Для случая с ДСПП с $P_{ON} = 0,5$ существует также линейная зависимость на большем диапазоне интенсивностей, за исключением области высоких интенсивностей, так как там наблюдается экспоненциальный рост энергозатрат. Кроме этого, экспоненциальная зависимость наблюдается и для случая с ДСПП с $P_{ON} = 0,1$.

Заключение

На основе приведенных графиков и рассуждений можно сделать следующий вывод.

Если выбирать длительность цикла ожидания исходя только из значения средней интенсивности и предполагая, что входной поток представляет собой пуассоновский процесс, в случае потока со «всплесками» ограничения на среднюю задержку передачи данных будут нарушены, хотя величина энергозатрат МС будет минимальной. Если предполагать, что входной поток имеет сильно выраженные «всплески», и выбирать значение цикла ожидания исходя из этого, ограничение на среднюю задержку передачи данных будет соблюдено, однако величина энергозатрат будет достаточно высокой.

При корректном выборе параметров режима ожидания можно обеспечить требуемое качество обслуживания как для случая приема потока со «всплесками», так и для пуассоновского потока.



■ Рис. 6. Зависимость оптимальной длины цикла ожидания (а) и энергозатрат (б) от интенсивности потока

Литература

1. IEEE P802.16m/D5. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Apr. 2010. — 925 p.
2. Вишневский В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX путь к 4G. — М.: Техносфера, 2009. — 472 с.
3. Park Y., Hwang G. Performance modelling and analysis of the sleep mode in IEEE 802.16e WMAN// Proc. of the 65th IEEE Vehicular Technology Conf. 2007. P. 2801–2806.
4. Park Y., Hwang G. An efficient power saving mechanism for delay-guaranteed services//IEEE 802.16e. IEICE Transactions on Communications. 2009. Vol. 1. P. 277–287.
5. Alouf S., Altman E., Azad A. Analysis of an M/G/1 queue with repeated inhomogeneous vacations with application to IEEE 802.16e power saving mechanism// Proc. of the 5th Intern. Conf. on Quantitative Evaluation of Systems. 2008. P. 27–36.
6. Mohammad N., Nejatian P., Nayebi M. Evaluating the effect of non-Poisson traffic patterns on power consumption of sleep mode in the IEEE 802.16e MAC// Proc. of the Intern. Conf. on Wireless and Optical Communications Networks. 2007. P. 1–5.
7. DeTurck K. et al. Performance of the IEEE 802.16e sleep mode mechanism in the presence of bidirectional traffic//Proc. of the Intern. Workshop on Green Communications. 2009. P. 1–5.
8. Baek S., Son J., Choi B. Performance analysis of sleep mode operation for IEEE 802.16m advanced WMAN// Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Communications Workshops. 2009. P. 1–4.
9. Flament M. et al. An approach to 4th Generation Wireless Infrastructures: Scenarios and Key Research Issues//Proc. VTC'99. Houston, TX, May 1999. P. 16–20.
10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. — М.: Машиностроение, 1979. — 432 с.
11. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. — М.: Мир, 1989. — 544 с.
12. Vacelli F., Foss S. On the saturation rule for the stability of queues//J. Appl. Prob. 1995. N 32. P. 494–507.
13. Neuts M. F. Structured Stochastic Matrices Of M/G/1 Type And Their Applications. — CRC Press, 1989. — 532 p.
14. Ahson S. et al. WiMAX Technologies, Performance Analysis, and Qos. — CRC Press, 2008. — 296 p.
15. Traffic Model for 802.16 TG3 MAC-PHY Simulations// IEEE 802.16.3c-01/30r1. Mar. 2001. — 27 p.
16. Mean Traffic Bit Rate with ON-SID Modeling of VoIP Traffic//IEEE C802.16m-07/123, July 2007. — 6 p.
17. WiMAX System Evaluation Methodology. Version 2.1, July 2008. — 209 p.
18. Хименко В. Характеристики типа «превышений уровней» для случайных точечных процессов // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 4. С. 436–443.