

УДК 004.728.3.057.4

## УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ДОСТАВКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА АБОНЕНТСКУЮ СТАНЦИЮ

**А.В. Анисимов**, аспирант С.-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП); alexeyanisimov86@gmail.com

**С.Д. Андреев**, научный сотрудник С.-Петербургского института информатики и автоматизации РАН; serge.andreev@gmail.com

**А.М. Тюрликов**, доцент ГУАП; turlikov@vu.spb.ru

**Ключевые слова:** когнитивная сеть, режим ожидания, средняя задержка, энергоэффективность, качество обслуживания.

**Введение.** По мере того как беспроводные сети передачи информации (СПИ) охватывают все большие территории и увеличивается число их абонентов, существенно возрастает сложность их проектирования и реализации. Прежде всего, это обуславливается мобильностью абонентских устройств, требующей принципиально новых подходов к вопросам разработки и эксплуатации современных систем связи.

Сегодня активно развиваются два подхода, использующие *принципы кооперации и когнитивности*. Кооперацию и когнитивность часто рассматривают как взаимодополняющие принципы, из которых последний позволяет СПИ получать и использовать в работе сведения относительно себя самой и своего окружения. В частности, возможен учет структуры системы связи, ее возможностей, ограничений, взаимодействия с окружающей средой, способа использования радиоресурсов и др.

Разработанные к настоящему моменту беспроводные СПИ пользуются весьма ограниченным набором данных об окружающей среде, поэтому в ближайшем будущем планируется значительно расширить их возможности в этом направлении. Совместное применение принципов кооперации и когнитивности особенно в беспроводных сетях, где среда динамически изменяется в реальном масштабе времени, позволит мобильным устройствам гибко подстраивать собственные возможности под особенности своего окружения.

В данном контексте когнитивность представляет собой многогранный процесс, включающий получение знаний о среде функционирования СПИ, учет сведений о целевых установках работы системы, а также изменение поведения системы с помощью полученной таким образом информации. Конечная цель работы когнитивной системы связи – наиболее эффективное использование имеющихся радиоресурсов, а также улучшение производительности работы как отдельного соединения, так и сети в целом.

Современные СПИ, работающие согласно принципу когнитивности, принято называть когнитивными сетями. В них совместно применяются новейшие технологии из различных областей знания. Следует, однако, различать термины когнитивная сеть и «когнитивное радио» [1, 2]. В то время как когнитивное функционирование системы связи охватывает все уровни эталонной модели взаимодействия открытых систем, технология «когнитивного радио» сосредотачивается лишь на задачах физического и канального уровней.

Впервые определить принцип когнитивности в сетевом контексте попытались сравнительно недавно. В [3, 4] когнитивной называется СПИ, учитывающая цели и задачи собственного функционирования для обеспечения требуемого набора и качества услуг, а также для взаимодействия с другими элементами системы связи. Вскоре за первыми работами в данной области последовали другие, современный обзор которых представлен в [5, 6].

Рассмотрим понятие когнитивной сети подробнее. В [3] когнитивная сеть рассматривается как система связи, направленная на определенные цели. В процессе их достижения система имеет возможность получать сведения об окружающей среде, планировать, принимать решения и действовать на их основе, а также анализировать следствия предпринятых действий. Данная последовательность этапов, названная авторами когнитивным циклом, предназначена для анализа окружающей среды, принятия решения на основе проведенного анализа, выбора стратегии поведения, наиболее соответствующей конечным целям, и, наконец, осуществления действий в соответствии с выбранной стратегией. По итогам предпринятых действий система анализирует их последствия и использует результат анализа для усовершенствования процесса принятия решений в будущем.

Такое определение когнитивной сети в явном виде не учитывает знания, получаемые системой связи, ограничиваясь исключительно описанием когнитивного цикла и упоминанием конечных целей. В соответствии с [4, 6, 7] получаемые системой знания являются важнейшими компонентами когнитивной сети, поэтому приведенное выше определение не может считаться полным. Таким образом, представляется необходимым переформулировать исходное определение когнитивной СПИ, как это сделано в [5]. Согласно уточненному определению, *когнитивная сеть представляет собой систему, которая использует в своей работе дополнительные знания, получаемые как при вертикальном (cross-layer) взаимодействии уровней, так и при горизонтальном взаимодействии разнородных технологий и абонентских устройств*.

В данной работе рассмотрим наиболее современный протокол функционирования беспроводной СПИ [8], разработанный для мобильных абонентских устройств и учитывающий особенности их беспроводного взаимодействия. Решается актуальная задача энергоэффективного управления доступом к беспроводному каналу связи в целях организации своевременной доставки информации на абонентскую станцию (АС). Несмотря на использование новейших телекоммуникационных технологий, СПИ, работающая по вышеупомянутому протоколу, не может считаться когнитивной в смысле модифицированного определения из [5]. Однако исследуемый алгоритм управления режимом ожидания АС позволяет во время функционирования учитывать параметры вышележащих уровней и обеспечивать прием информации с минимальными затратами энергии. Таким образом, рассматриваемая система связи может считаться когнитивной в узком смысле, реализуя вертикальное взаимодействие уровней.

**Обзор стандарта IEEE 802.16m.** Этот стандарт является дальнейшим развитием стандарта IEEE 802.16e [8], в котором учтены требования, предъявляемые к сетям связи четвертого поколения IMT-Advanced. При этом гарантируется обратная совместимость с предшествующей версией IEEE 802.16e. На рис. 1 изображена диаграмма состояний АС при функциони-

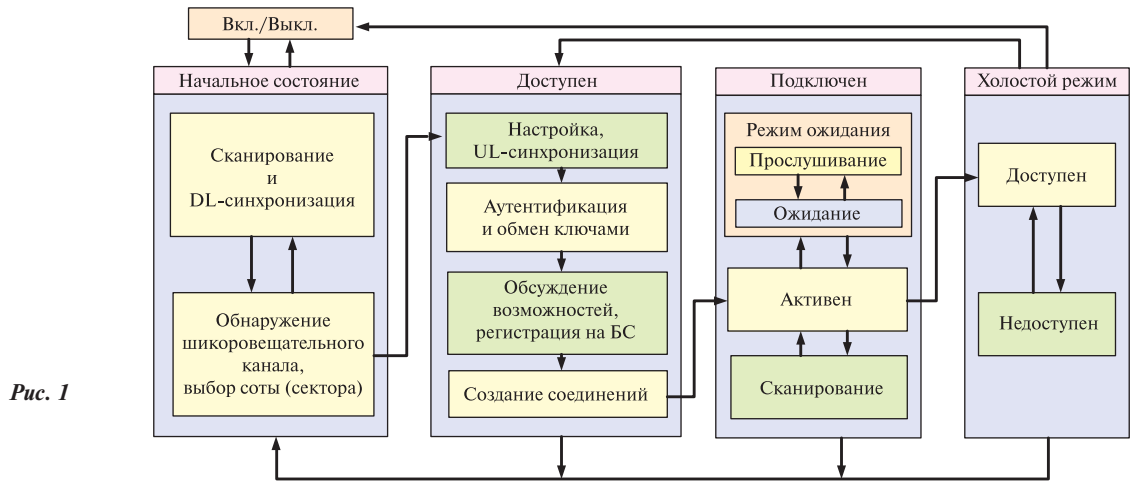


Рис. 1

ровании в сети IEEE 802.16. Начальное состояние и состояние «доступен» соответствуют этапу подключения АС к сети и регистрации на базовой станции (БС). Остальные два состояния выделяются на этапе функционирования АС в сети.

Находясь в активном состоянии, АС может перейти в режим ожидания (sleep mode), позволяющий ей снизить энергозатраты. Также предусмотрен холостой режим функционирования (idle mode). АС переходит в данный режим между сеансами приема/передачи данных. В данной работе рассматривается только режим ожидания.

**Режим ожидания стандарта IEEE 802.16e.** Режим ожидания предназначен для снижения энергозатрат АС во время сеансов передачи данных (ПД). При функционировании в данном режиме АС чередует периоды прослушивания и ожидания. Во время периодов ожидания АС отключает свой радиоинтерфейс и становится недоступной для БС, поэтому никакой ПД от БС к АС во время периодов ожидания не происходит. Во время прослушивания БС передает АС информацию о наличии в буфере на БС данных, адресованных данной АС. Если такие данные есть, то начинается их передача. В противном случае АС переходит к следующему периоду ожидания.

В стандарте [8] определены три различных типа режима ожидания, характеризующиеся различными классами сохранения энергии (КСЭ). КСЭ первого типа задает режим ожидания с переменным периодом ожидания. Если за время первого периода не было поступлений данных в очередь на БС, то длительность следующего периода ожидания вычисляется по формуле:

$$S_i = \min(2S_{i-1}, S_{\max}), \tag{1}$$

где  $S_{i-1}$  – длительность предыдущего периода ожидания;  $S_{\max}$  – его максимальная длительность. В случае, когда в очереди на БС имеются данные для АС, происходит выход из режима ожидания и начинается ПД.

Постоянную длину периода ожидания имеет КСЭ второго типа, тогда как КСЭ третьего типа определяет длительность однократного периода ожидания. Последний, однако, не входит в стандарт IEEE 802.16m.

**Режим ожидания стандарта IEEE 802.16m.** В [9-12] предложен ряд улучшений режима ожидания. Основная цель этих предложений – сделать режим ожидания более гибким и эффективным.

Во время функционирования режима ожидания стандарта IEEE 802.16m все время работы разбивается на циклы ожидания (рис. 2). Каждый цикл состоит из периодов ожида-

ния и прослушивания. Как и в стандарте IEEE 802.16e, длительность цикла ожидания может быть как постоянной, так и переменной. Независимо от этого длительность периода прослушивания всегда остается постоянной, т.е. может меняться только продолжительность периода ожидания.

Обозначим длительность периода прослушивания через  $L$ . Ее можно увеличить, когда в очереди на БС имеются данные для АС. Максимально возможное увеличение периода прослушивания – это граница цикла ожидания. После приема очередного сообщения с данными АС (пере)запускает таймер. Если за время работы таймера не было приема новых сообщений с данными, то АС переходит к периоду ожидания, который длится до конца текущего цикла ожидания.

В настоящее время опубликовано много научных работ, посвященных исследованию анализа режима энергосбережения в стандарте IEEE 802.16e. С различными аспектами анализа режима ожидания можно познакомиться в работах [13-28].

**Аналитические результаты. Модель системы связи.** Ниже описывается модель системы ПИ, разработанная для анализа режима ожидания. Модель основана на ряде допущений:

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

**Допущение 2.** Входной поток данных, предназначенных для отправки АС, подчиняется распределению Пуассона с интенсивностью  $\lambda$  сообщений в секунду.

**Допущение 3.** На БС имеется бесконечный буфер для хранения поступающих сообщений.

**Допущение 4.** В течение кадра может быть передано не более одного сообщения с данными.

**Допущение 5.** Сообщения передаются на АС в порядке их поступления на БС, без перерывов в расписании.

**Допущение 6.** Если сообщение с данными поступило в буфер БС в течение кадра с номером  $k$ , то оно может быть передано на АС не ранее следующего кадра, т.е. кадра с номером  $k+1$ .

Кратко поясним сделанные выше допущения. Влияние различных АС друг на друга во время приема нисходящих потоков данных в значительной степени зависит от набора правил и алгоритмов, используемых планировщиком на БС. В стандарте не приводится описание работы такого планировщика, поэтому в допущении 1 рассматривается одна АС. Допущение 2 связано с тем, что на практике для моделирования систем связи широко применяются потоки данных, основанные на пуассоновском [29], поэтому ниже рассматривается пуассоновский поток.

Результаты, полученные в данной работе, можно обобщить на случай более сложных входных потоков, в том числе предлагаемых в [29, 30]. Допущение 3 не вносит каких-либо ограничений на последующие применения численных результатов. Более того, ограничение на размер буфера может быть включено в приводимый ниже анализ без каких-либо затруднений. Как отмечалось выше, стандарт [8] не включает писание работы планировщика. Поэтому для упрощения дальнейшего изложения вводятся допущения 4, 5. Допущение 6 отмечает, что планирование радиоресурсов для следующего кадра с номером  $k+1$  происходит во время текущего кадра с номером  $k$ .

Пример функционирования рассматриваемой системы связи изображен на рис. 2. В данном случае длительность начального периода ожидания равна двум кадрам, а длительности периода прослушивания и тайм-аута одинаковы и равны одному кадру.

Приводимый ниже анализ учитывает два уровня энергозатрат, зависящих от состояния, в котором находится АС. Первый уровень соответствует состоянию прослушивания, второй – ожидания.

**Постановка оптимизационной задачи.** Как следует из описания алгоритма управления режимом ожидания, использование этого режима, кроме снижения энергопотребления АС, ведет к увеличению средней задержки ПД. Поэтому для оценки эффективности данного режима энергосбережения необходимо учитывать как энергозатраты со стороны АС, так и среднюю задержку ПД. Следуя [31], для оценки энергоэффективности режима ожидания введем следующую величину:

$$U = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\text{кол-во принятых данных за время } t, \text{ бит}}{\text{энергозатраты за время } t, \text{ Дж}}. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, какое количество данных можно принять, затратив 1 Дж энергии.

При фиксированной интенсивности входного потока величина  $U$  зависит от следующего набора параметров:  $S_0, S_{\max}$  – размеры начального и максимального периода ожидания, соответственно;  $L$  – длительность периода прослушивания;  $T_T$  – длительность тайм-аута. Введем в рассмотрение функцию  $f_U(S_0, S_{\max}, L, T_T)$ , которая описывает зависимость энергоэффективности от приведенных выше параметров. Аналогично введем функцию  $f_D(S_0, S_{\max}, L, T_T)$ , описывающую зависимость средней задержки от того же набора параметров.

На основе введенных выше функций сформулируем следующую оптимизационную задачу: максимизировать  $f_U(S_0, S_{\max}, L, T_T)$  при ограничении  $f_D(S_0, S_{\max}, L, T_T) \leq D_{\max}$ . Следует отметить, что в данном случае вводится ограничение на среднюю задержку ПД ( $D_{\max}$ ). Однако возможны и другие постановки оптимизационной задачи.

**Анализ энергозатрат АС.** Проведем анализ энергоэффективности режима ожидания. Рассмотрим алгоритм управления этим режимом, основанный на предложениях [9-11]. Кроме того, дополнительно предположим, что длительность интервалов ПД и тайм-аута не включаются в длительность циклов ожидания. Такое допущение позволяет использовать регенеративный подход для анализа характеристик режима ожидания [32]. Суть данного подхода заключается в том, что вся временная ось делится на интервалы, называемые циклами регенерации. На рис. 2 приведен пример цикла регенерации. Его начало совпадает с моментом запуска таймера, после которого АС переходит к периоду ожидания. Отметим, что за цикл регенерации осуществляется прием как минимум одного сообщения.

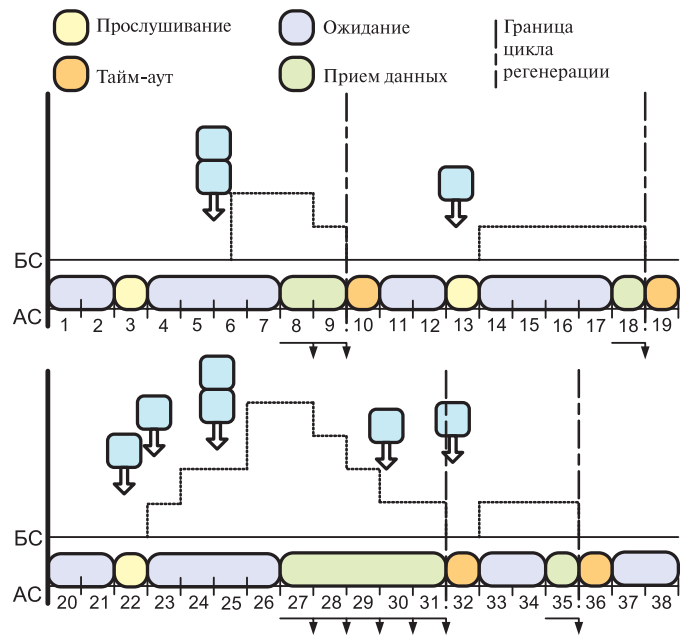


Рис. 2

Из [32] следует, что для расчета энергоэффективности (2) достаточно вычислить эту величину для одного цикла регенерации:

$$U = \frac{E[\text{кол-во принятых данных за цикл регенерации}]}{E[\text{энергозатраты за цикл регенерации}]}. \quad (3)$$

В нашем случае (3) можно переписать следующим образом:

$$U = \frac{E[B]}{P_A E[T_A] + P_S E[T_S]}, \quad (4)$$

где  $E[B]$  – математическое ожидание количества принятых данных за цикл регенерации;  $P_A$  и  $P_S$  – мощность, затрачиваемая АС в активном состоянии и состоянии ожидания, соответственно;  $E[T_A]$  и  $E[T_S]$  – среднее время, которое АС находится в активном состоянии и состоянии ожидания за цикл регенерации, соответственно.

Математическое ожидание количества принятых данных за цикл регенерации может быть рассчитано по формуле:

$$E[B] = bE[R], \quad (5)$$

где  $b$  – размер сообщения;  $E[R]$  – математическое ожидание количества принятых сообщений за цикл регенерации. Обозначим вероятность того, что за цикл регенерации будет принято в точности  $r$  сообщений через  $P(r)$ . Для расчета  $P(r)$  воспользуемся выражением:

$$P(r) = \sum_{j=1}^r Q(j)A(j, r-j), \quad (6)$$

где  $Q(j)$  – вероятность того, что в момент начала передачи в буфере на БС будет находиться в точности  $j$  сообщений;  $A(j, i)$  – вероятность того, что за время передачи уже имеющихся  $j$  сообщений поступят  $i$  новых. Отметим, что данная формула является обобщением результата, приведенного в [33].

Вероятность  $Q(j)$  может быть рассчитана по формуле:

$$Q(j) = \sum_{i=0}^{\infty} \Pi(0, t_i) \Pi(j, V_{i+1}), \quad (7)$$

где  $V_i = S_i + L$ ;  $t_i = \sum_{k=1}^i V_k$ ;  $\Pi(j, \tau)$  – вероятность того, что за интервал времени  $\tau$  поступит в точности  $j$  сообщений.

Вероятность  $A(k, j)$  можно вычислить рекуррентно:

$$A(k, i) = \sum_{j=1}^i \Pi(j, k) A(j, i - j); \tag{8}$$

$$A(0, j) = j e^{-j\lambda}.$$

Среднее время пребывания АС в состоянии ожидания и прослушивания за один цикл регенерации может быть найдено по (9) и (10), соответственно:

$$T_s = \sum_{i=1}^{\infty} S_i \Pi(0, t_{i-1}) (1 - \Pi(0, V_i)); \tag{9}$$

$$T_A = E[R] + \sum_{i=1}^{\infty} i \Pi(0, t_{i-1}) (1 - \Pi(0, V_i)). \tag{10}$$

Подставив (5), (9), (10) в (4), получим окончательное выражение для расчета энергоэффективности.

*Анализ средней задержки.* Общей задержкой передачи сообщения будем называть интервал времени, начало которого соответствует моменту поступления меченого сообщения в буфер на БС. Окончание данного интервала соответствует окончанию кадра, в котором передается меченое сообщение. Функционирование исследуемой системы в режиме ожидания можно рассматривать как функционирование системы M/G/1 с перерывами [33, 34].

Анализ, представленный в [33, 34], основан на допущении того, что длительности перерывов (периодов ожидания) есть независимые и одинаково распределенные случайные величины. При использовании режима ожидания с КСЭ первого типа это допущение неверно, так как длительности перерывов зависят друг от друга и, кроме этого, имеют различные распределения. Можно доказать, что для анализа средней задержки ПД может быть использована формула:

$$E[D] = W + W_t = \frac{\lambda E[X^2]}{2(1 - \lambda)} + \frac{E[T^2]}{2E[T]} + W_t, \tag{11}$$

где  $\lambda$  – интенсивность входного потока;  $E[X^2]$  – второй момент времени обслуживания одного сообщения  $E[T]$  и  $E[T^2]$  первый и второй моменты суммарной длительности интервалов времени между двумя следующими друг за другом периодами приема данных, соответственно;  $W_t$  – длительность приема сообщения.

Заметим, что выражение (11) визуально близко к известной формуле Поллачека-Хинчина для системы M/G/1 с перерывами. Однако в данном случае второе слагаемое рассчитывается иначе, а именно, вычисляется первый и второй момент интервала времени между двумя соседними периодами обслуживания.

*Решение поставленной оптимизационной задачи.* Для упрощения последующего изложения положим длительности периода прослушивания и тайм-аута равными 1 кадру. Кроме этого, предположим, что размеры начального и максимального периодов ожидания равны  $S = S_0 = S_{\max}$ . Можно показать, что в этом случае обе функции  $f_D$  и  $f_U$  монотонно возрастают. Поэтому решение оптимизационной задачи сводится к увеличению размера периода ожидания до тех пор, пока  $f_D$  не достигнет величины ограничения. При этом энергоэффективность будет равна максимальному значению. Таким образом, оптимальное значение длительности периода ожидания:

$$S_{opt} = \max\{S : f_D(S, S, 1, 1) \leq D_{\max}\}. \tag{12}$$

На рис. 3 изображена зависимость энергоэффективности от интенсивности входного потока и ограничения на задержку ПД при пуассоновском входном потоке.

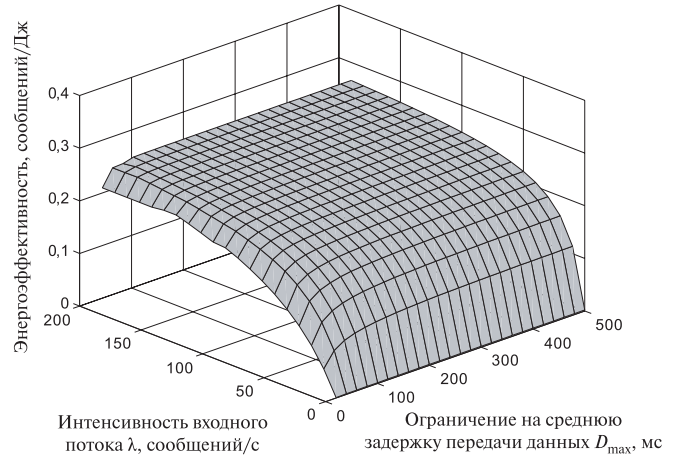


Рис. 3

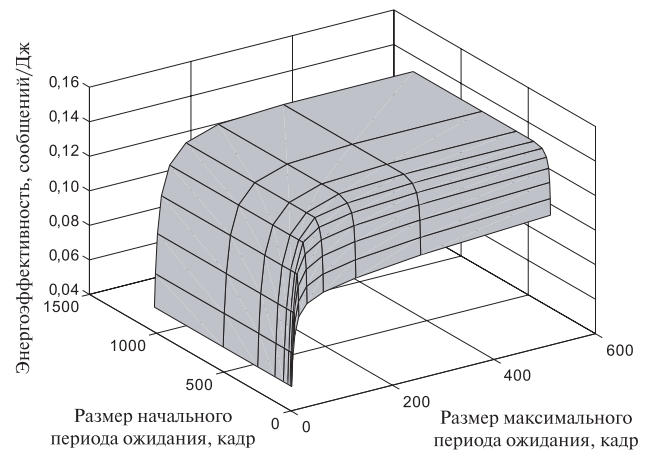


Рис. 4

Введем переменный размер периода ожидания, т.е.  $S_0 \neq S_{\max}$ . На рис. 4 представлена зависимость энергоэффективности от размеров начального и конечного периодов ожидания. Отметим, что влияние размера конечного периода ожидания наблюдается только в области начальных значений. Однако граница влияния данного параметра зависит от интенсивности входного потока. Размер начального периода ожидания оказывает более существенное влияние на энергоэффективность. Также из графика видно, что переменный период ожидания не обеспечивает более высокого уровня энергоэффективности и его использование при пуассоновском входном потоке нецелесообразно.

**Результаты имитационного моделирования.** *Описание имитационной модели.* Разработанная модель основана на тех же допущениях, что и приводимый выше анализ. Единственное отличие касается используемой модели входного потока. Для получения средней задержки ПД и энергоэффективности в условиях передачи реального трафика в моделирующей программе были реализованы модели входных потоков HTTP (hypertext transfer protocol) и VoIP (voice over IP).

Модели основаны на использовании прерванного пуассоновского потока (interrupted poisson process – IPP) и прерванного детерминированного потока (interrupted deterministic process – IDP), соответственно. Описание и параметры моделей приводятся в [29]. Согласно [30], длительность кадра  $T_f = 5$  мс, энергопотребление в активном состоянии  $P_A = 750$  мВт, а энергопотребление в состоянии ожидания  $P_S = 50$  мВт.

На рис. 5 представлена зависимость энергоэффективности от размера постоянного периода ожидания при передаче

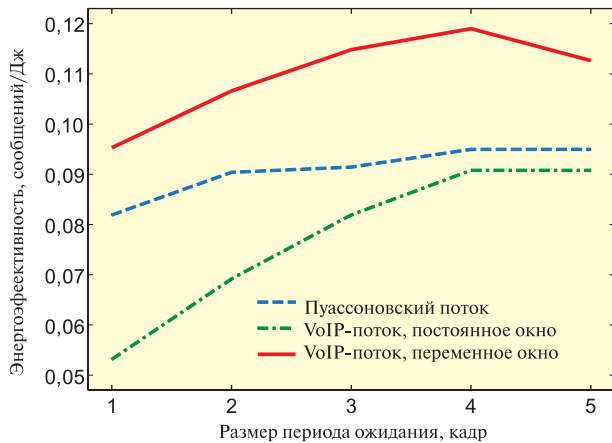


Рис. 5

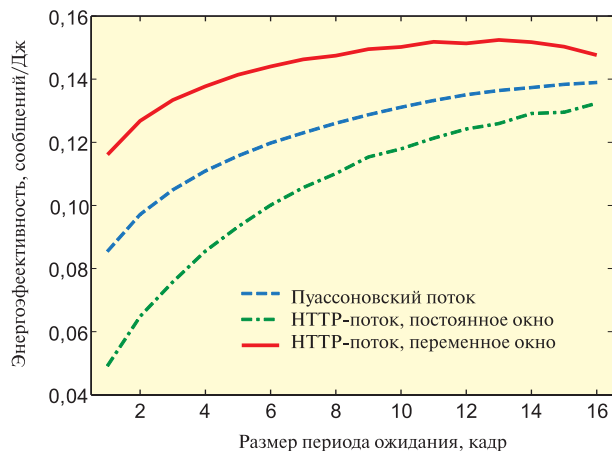


Рис. 6

VoIP-потока, требующего жесткого соблюдения параметров качества обслуживания (quality of service – QoS). Один из таких параметров – задержка «из конца в конец» («mouth-to-ear»). В [30, 35] верхняя граница задержки указана равной 150 мс. Задержка передачи на участке БС–АС составляет только часть полной задержки, поэтому задержку передачи на этом участке ограничиваем величиной в 20 мс.

На рис. 5 изображены три кривые: нижняя соответствует случаю с постоянным периодом ожидания, верхняя – с переменным. Конечный выигрыш при использовании переменного периода ожидания вместо постоянного составляет около 30%. Тем не менее, стандартом предусмотрено использование постоянного периода ожидания при передаче VoIP-потока. Одной из возможных причин этого является рост случайной задержки или джиттера (jitter) в случае переменного периода ожидания.

На рис. 6 приводится аналогичная характеристика для HTTP-потока. При его передаче не предъявляются такие жесткие требования к параметрам QoS, как при передаче VoIP-потока, т.о. выбранное ограничение для задержки составляет 50 мс. Как и в случае VoIP-потока, использование переменного периода ожидания обеспечивает более высокий уровень энергоэффективности. Отметим, что при увеличении допустимой задержки разница между двумя уровнями энергоэффективности уменьшается.

**Заключение.** Описываемая упрощенная модель ПД в сети IEEE 802.16 позволяет учесть обменное соотношение между задержкой при приеме данных АС и ее энергетической эффективностью. В предлагаемом способе анализа алгоритма

управления режимом ожидания используются достаточно простые выражения. С их помощью можно получить значения средней задержки ПД и энергоэффективности режима ожидания при пуассоновском входном потоке.

Полученные численные результаты были расширены с помощью средств имитационного моделирования для случаев входных потоков VoIP и HTTP. Как было показано, переменный период ожидания обеспечивает более высокий уровень энергоэффективности, чем постоянный, при одинаковых ограничениях на среднюю задержку ПД. Проведенный численный анализ энергоэффективности для случая пуассоновского входного потока дает оценку снизу для случая с переменным периодом ожидания и верхнюю – для случая с постоянным периодом ожидания при приеме потока со «всплесками».

*Работа выполнена при поддержке РФФИ по проектам № 10-08-01071-а и № 08-08-00403-а, а также в рамках программы фундаментальных исследований ОНТИ РАН по проекту 2.3.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Mitola J., Maguire G. Cognitive radio: making software radios more personal// IEEE Personal Communications, 1999. – Vol. 6, № 4. – P. 13–18.
- Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio/ PhD thesis, Computer Communication System Laboratory, Department of Teleinformatics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. – May 2000.
- Thomas R., DaSilva L., MacKenzie A. Cognitive networks/ Proc. of the 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005.
- Clark D., Partridge C., Ramming J., Wroclawski J. A knowledge plane for the Internet/ Proc. of the Conference of the Special Interest Group on Data Communication. – 2003. – P. 3–10
- Fortuna C., Mohorcic M. Trends in the development of communication networks: Cognitive networks// Computer Networks. –2009. – Vol. 53, № 9. – P. 1354–1376.
- Mahmoud Q. Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks. John Wiley and Sons, 2007.
- Balamuralidhar P., Prasad R. A context driven architecture for cognitive nodes// Wireless Personal Communications. – 2008. – Vol. 45, № 3. – P. 423–434.
- IEEE 802.16-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. – May 2009.
- Sleep Mode Operation for IEEE 802.16m, C802.16m-08/721r1. – July 2008.
- Keep-awake Mechanism for IEEE 802.16m Sleep Mode, C802.16m-08/718. – July 2008.
- Sleep Mode for IEEE 802.16m System, C802.16m-08688r1. – July 2008.
- The Draft IEEE 802.16m System Description Document, IEEE 802.16m-08/003r5. – October 2008.
- Xiao Y. Energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN// IEEE Communications Letters. – 2005. – Vol. 9, № 7. – P. 595–597.
- Han K., Choi S. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE 802.16e mobile broadband wireless access systems/ Proc. of the IEEE 63rd Vehicular Technology Conference. – 2006. – Vol. 3. – P. 1141–1145.
- Seo J., Lee S., Park N., Lee H., Cho C. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE 802.16e/ Proc. of the IEEE 60th Vehicular Technology Conference. – 2004. – Vol. 2. – P. 1169–1173.
- Park Y., Hwang G. Performance modelling and analysis of the sleep mode in IEEE 802.16e WMAN/ Proc. of the 65th IEEE Vehicular

- Technology Conference. – 2007. – P. 2801–2806.
17. **Park Y., Hwang G.** An efficient power saving mechanism for delay-guaranteed services in IEEE 802.16e// IEICE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 1. – P. 277–287.
  18. **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 International Conference on Quantitative Evaluation of Systems. – 2008. – P. 27–36.
  19. **Nui Z., Zhu Y., Benetis V.** A phase-type based Markov chain model for IEEE 802.16e sleep mode and its performance analysis/ Proc. of the IEEE International Test Conference. – 2007. – P. 791–802.
  20. **Han Y., Min S., Jeong D.** Performance comparison of sleep mode operations in IEEE 802.16e terminals/ Proc. of the 7th International Conference on Computational Science. – 2007. – P. 441–448.
  21. **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 International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. – 2007.
  22. **Zhang Y., Fujise M.** Energy management in the IEEE 802.16e MAC// IEEE Communications Letters. – 2006. – Vol. 10, № 4. – P. 311–313.
  23. **DeTurck K., Andreev S., DeVuyst S., Fiems D., Wittevrongel S., Bruneel H.** Performance of the IEEE 802.16e sleep mode mechanism in the presence of bidirectional traffic/ Proc. of the International Workshop on Green Communications. – 2009.
  24. **Blondia C., Casals O.** Statistical multiplexing of VBR sources: A matrix-analytic approach/ Performance Evaluation. – 1992. – Vol. 16, № 1–3. – P. 5–20.
  25. **DeTurck K., DeVuyst S., Fiems D., Wittevrongel S.** Performance analysis of the IEEE 802.16e sleep mode for correlated downlink traffic,» Telecommunication Systems. – 2008. – Vol. 39, № 2. P. 145–156.
  26. **Xiao J., Zou S., Ren B., Cheng S.** An enhanced energy saving scheme in mobile broadband wireless access systems/ Proc. of the 1st International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications. – 2006. – P. 81–92.
  27. **Baek S., Son J., Choi B.** Performance analysis of sleep mode operation for IEEE 802.16m advanced WMAN/ Proc. of the IEEE International Conference on Communications Workshops. – 2009. – P. 1–4.
  28. **DeTurck K., DeVuyst S., Fiems D., Wittevrongel S., Bruneel H.** Performance of the sleep mode mechanism of the new IEEE 802.16m proposal for correlated downlink traffic/ Proc. of the 3rd Euro-NF Conference on Network Control and Optimization. – 2009. – P. 152–165.
  29. **Baugh C., Huang J.** Traffic model for 802.16 TG3 MAC/PHY simulations. IEEE 802.16 Contribution 802.16.3c-01/30r1. – March 2001.
  30. WiMAX System Evaluation Methodology, Version 2.1. – July 7, 2008.
  31. Improving Client Energy Consumption in 802.16m, C802.16m-09/107. – Jan 2009.
  32. **Крэйн М., Лемуан О.** Введение в регенеративный метод анализа моделей. – М.: Наука, 1982.
  33. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
  34. **Бергсекас Д., Галлагер Р.** Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989.
  35. ITU-T Recommendation G.114.

Получено 13.09.10

19 мая 2011

Гостиница  
Radisson-Славянская

Открытые системы  **OSP CON**  
BRINGING TOGETHER

## Российский Форум «Стратегическое управление ИТ»

### Основные темы Форума:

- Стратегическое руководство ИТ (IT Governance) как основа для эффективного удовлетворения потребностей бизнеса
- Практика управления ИТ-услугами: мировой и российский опыт
- Управление портфелями проектов в ИТ
- ИТ-активы в стратегическом управлении ИТ: методы, инструменты, практика
- Руководство ИТ-деятельностью на языке финансов
- Внешний и внутренний ИТ-аудит: когда, зачем и как?
- Риск-менеджмент в ИТ
- Эффективное управление ИТ-персоналом

### Информационные партнеры:

Медиа-партнер:

**hh.ru**  
HeadHunter

Интернет-партнер:

Специальный проект «Открытые Системы»  
**GlobalCIO**  
Мастер-классы, вебинары, семинары.  
www.globalcio.ru

HR-партнер:

**SuperJob**  
www.superjob.ru

Информационные партнеры:

**Аналитический журнал**

**SMARTCIO**

**ALT INVEST**  
cifn.ru

**COMNEWS**

**РУССКИЙ ПОЛИС**

**ФИНАНСОВАЯ ГАЗЕТА**  
FINANCIAL WEEKLY INTERNATIONAL  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФИНАНСОВЫЙ ЕЖЕНЕДЕЛЬНИК

Реклама

По вопросам участия: [kon@osp.ru](mailto:kon@osp.ru) тел. (495) 956-33-06, факс (499) 253-92-04/05, [www.ospcon.ru](http://www.ospcon.ru)