

Е. В. ПУСТОВАЛОВ, А. М. ТЮРЛИКОВ

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО УСТРОЙСТВА

Рассматриваются различные режимы энергосбережения для мобильного абонентского устройства, основанные на его периодическом отключении. На основе известной модели входного потока проведена оценка энергопотребления устройства и средней задержки сообщений.

*Ключевые слова:* энергосбережение, мобильное устройство, режим ожидания, входной поток со всплесками.

**Введение.** На сегодняшний день наблюдается стремительный рост программно-аппаратных возможностей мобильных пользовательских устройств и, как следствие, их повышенное энергопотребление. Таким образом, важной задачей является поиск алгоритмов снижения энергопотребления и продления времени непрерывной работы мобильного устройства. Один из путей решения задачи — оптимизация работы устройства в перерывах между сеансами приема данных. Как правило, в современных мобильных устройствах периоды приема данных перемежаются с периодами ожидания. В литературе такой тип трафика называют „поток со всплесками“ [1]. Во время ожидания можно отказаться от непрерывного мониторинга канала связи, отключив приемопередатчик на определенное время. Однако поскольку приемник, как правило, не может определить длительность паузы, он должен периодически включаться на короткое время для мониторинга канала, чтобы иметь возможность оперативно получать сообщения от базовой станции. Такой режим работы назовем „режимом ожидания“. В том или ином виде режим ожидания реализован в большинстве стандартов связи третьего и четвертого поколений, таких как HSPA, WiMAX и LTE [2, 3].

При анализе режимов энергосбережения, основанных на периодическом отключении приемопередатчика, помимо величины энергопотребления необходимо учитывать требования к качеству обслуживания, которые определяются задержкой сообщения. Поступившее на базовую станцию во время режима ожидания новое сообщение не может быть принято пользователем до тех пор, пока его приемопередатчик не включится для мониторинга канала. Это приводит к следующему эффекту: чем реже приемник „просыпается“ в режиме ожидания, тем меньше энергии он потребляет, но тем больше задержка нового сообщения. Таким образом, встает оптимизационная задача: подобрать параметры режима энергосбережения так, чтобы минимизировать энергопотребление устройства при заданных ограничениях на качество обслуживания. В настоящей работе рассматривается такой показатель качества обслуживания, как средняя задержка.

Очевидно, что решение поставленной оптимизационной задачи зависит от характера трафика и алгоритма функционирования устройства в режиме ожидания. В настоящей работе анализируются энергопотребление и средняя задержка для типового режима энергосбережения с несколькими циклами ожидания, а также модели входного потока со всплесками.

**Режимы энергосбережения.** Рассмотрим простейший режим энергосбережения, проиллюстрированный на рис. 1. После окончания приема очередной порции данных запускается таймер с интервалом (тайм-аут)  $T_1$ . Если по истечении  $T_1$  не пришло новых сообщений, то устройство переходит в режим ожидания. В режиме ожидания все время функционирования разбито на циклы ожидания длиной  $L$ . Устройство выполняет мониторинг канала в течение  $B$  единиц времени в начале каждого цикла ожидания. При поступлении в цикле ожидания

на базовую станцию сообщений для пользователя данные сохраняются в буфере до начала следующего цикла, после чего устройство включается и принимает очередную порцию данных. По окончании приема данных описанная схема повторяется. Данный режим энергосбережения характеризуется набором из трех параметров ( $T_1$ ,  $L$ ,  $B$ ).

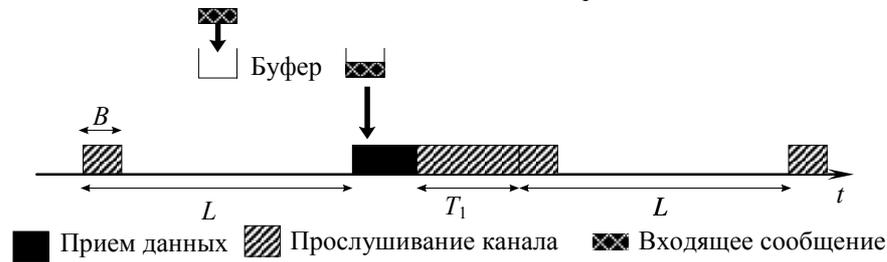


Рис. 1

Для повышения гибкости настройки параметров энергосбережения в современных стандартах мобильной связи предусмотрен так называемый режим с короткими и длинными циклами (рис. 2). По истечении времени  $T_1$  система переходит в режим ожидания с параметрами  $L_1$  и  $B_1$ . Одновременно с переходом в режим ожидания с короткими циклами запускается таймер с  $T_2$ . По истечении  $T_2$  устройство переходит в режим ожидания с длинными циклами с параметрами  $L_2$  ( $L_2 > L_1$ ) и  $B_2$  ( $B_2 \leq B_1$ ). Работа устройства в коротких и длинных циклах ожидания аналогична работе в простом режиме.

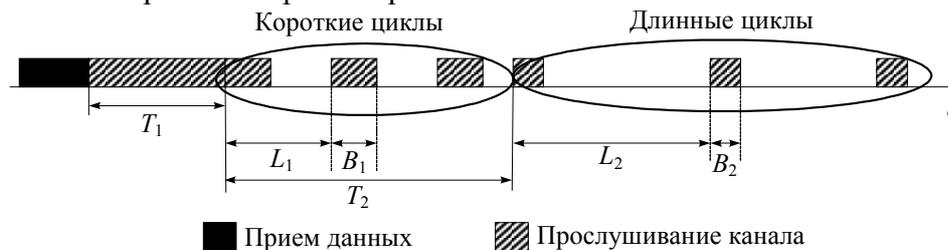


Рис. 2

Заметим, что при  $L_2 = L_1$  и  $B_2 = B_1$  режим с двумя типами циклов сводится к простому режиму энергосбережения. Кроме того, существуют другие возможные сценарии функционирования устройства в состоянии энергосбережения, однако в настоящей работе анализируется режим с короткими и длинными циклами, поскольку именно он используется в современных сетях связи третьего и четвертого поколений 3GPP HSPA и 3GPP LTE [2].

**Модель входного потока.** Для анализа описанных режимов энергосбережения необходимо задать модель трафика. Как правило, трафик реального устройства имеет сложный характер, в нем присутствует несколько потоков от различных приложений. Для упрощения анализа реальный трафик пользователя аппроксимируют одной из математических моделей, параметры которой рассчитываются на основе параметров реального трафика. Дальнейший анализ режимов энергосбережения проводится на модели входного потока со всплесками [4], которая является одной из стандартных моделей тестирования производительности систем связи, основанных на стандартах 3GPP.

Модель потока со всплесками описывается двумя параметрами: средним размером порции данных (всплеска)  $\bar{s}$  и средней интенсивностью их поступления  $\lambda$ . Размер конкретной порции данных и временной интервал между ними являются случайными величинами. Интервалы между поступлениями данных распределены по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda$ . Закон распределения размера порции данных может быть произвольным с математическим ожиданием  $\bar{s}$ , например, логнормальным. Интервал времени до прихода в систему новых данных отсчитывается от момента окончания приема предыдущей порции, таким образом, в каждый момент времени в буфере может находиться не более одной порции данных.

Скорость приема данных будем считать постоянной и равной  $R$ . Таким образом, математическое ожидание времени приема порции данных ( $\bar{t}_{rx}$ ) равно

$$\bar{t}_{rx} \triangleq E[t_{rx}] = \frac{\bar{S}}{R}.$$

**Анализ режима энергосбережения.** При работе в режиме ожидания мобильное устройство может находиться в одном из двух состояний: „off“, в котором приемопередатчик выключен, и „on“, в котором устройство выполняет мониторинг канала или принимает данные. Пусть  $\zeta_{on}$  — энергопотребление устройства в состоянии „on“, а  $\zeta_{off}$  — в состоянии „off“ ( $\zeta_{off} \ll \zeta_{on}$ ). Тогда общее среднее энергопотребление устройства равно

$$P = \eta_{on}\zeta_{on} + \eta_{off}\zeta_{off}, \quad (1)$$

где  $\eta_{on}$  и  $\eta_{off}$  — доля времени нахождения устройства в состоянии „on“ и „off“. Поскольку конкретные значения констант  $\zeta_{on}$  и  $\zeta_{off}$  устанавливает производитель оборудования, то при анализе ограничимся вычислением величин  $\eta_{on}$  и  $\eta_{off}$ .

Определим долю времени, в течение которого приемник находится в состоянии „off“, следующим образом:

$$\eta_{off} \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_{off}(T)}{T},$$

где  $T$  — общее время работы системы;  $T_{off}(T)$  — время, в течение которого абонентское устройство находится в состоянии „off“. Доля времени пребывания в состоянии „on“ может быть найдена исходя из условия нормировки

$$\eta_{on} + \eta_{off} = 1.$$

Обозначим промежуток времени: от момента начала приема текущей порции данных до момента начала приема следующей  $t_{cyc}$ . В заданном входном потоке последующая порция данных может поступить в систему только после окончания приема очередной, таким образом, поведение системы с момента начала приема нового сообщения не зависит от поведения системы в предыдущие моменты времени. Такой процесс называется регенеративным, а интервал  $t_{cyc}$  — циклом регенерации [5, 6]. Используя теорию регенеративного анализа, величину  $\eta_{off}$  можно вычислить по формуле

$$\eta_{off} = \frac{E[t_{off}]}{E[t_{cyc}]}, \quad (2)$$

где  $t_{off}$  — время нахождения устройства в состоянии „off“ в цикле регенерации.

Напомним, что в режиме ожидания абонент слушает канал только  $B$  единиц времени в течение цикла длительности  $L$ . Пусть  $t_{drx1}$  и  $t_{drx2}$  — время нахождения в режиме с короткими и длинными циклами в интервале  $t_{cyc}$ , тогда

$$t_{off} = t_{drx1} \frac{L_1 - B_1}{L_1} + t_{drx2} \frac{L_2 - B_2}{L_2},$$

а математическое ожидание

$$E[t_{off}] = E[t_{drx1}] \frac{L_1 - B_1}{L_1} + E[t_{drx2}] \frac{L_2 - B_2}{L_2}. \quad (3)$$

Покажем, как найти математические ожидания  $t_{drx1}$ ,  $t_{drx2}$  и  $t_{cyc}$ . В любом цикле регенерации возможно, что новые данные придут

1) до начала циклов ожидания (т.е. до истечения времени  $T_1$ ). Поскольку время между приходом данных имеет экспоненциальное распределение, то вероятность возникновения такого события

$$p_1 = P(t < T_1) = 1 - e^{-\lambda T_1};$$

2) в течение коротких циклов ожидания (т.е. после истечения  $T_1$ , но до истечения  $T_2$ ). Вероятность такого события

$$p_2 = P(T_1 < t < T_1 + T_2) = P(t > T_1) - P(t > T_1 + T_2) = e^{-\lambda T_1} - e^{-\lambda(T_1+T_2)};$$

3) в течение длинных циклов ожидания (т.е. по истечении  $T_2$ ). Вероятность события

$$p_3 = P(t > T_1 + T_2) = e^{-\lambda(T_1+T_2)}.$$

Найдем величину  $E[t_{d_{rx1}}]$ . В первом случае устройство не перейдет ни в один из режимов ожидания и

$$E[t_{d_{rx1}} | t < T_1] = 0.$$

В третьем случае устройство пробудет в режиме ожидания с короткими циклами в течение  $T_2$ , после чего перейдет в режим с длинными циклами и

$$E[t_{d_{rx1}} | t > T_1 + T_2] = T_2.$$

Рассмотрим подробно второй случай. Устройство находится в режиме с короткими циклами ожидания до начала приема новой порции данных, тогда

$$E[t_{d_{rx1}} | T_1 < t < T_1 + T_2] = E[t - T_1 | T_1 < t < T_1 + T_2] + E[d | T_1 < t < T_1 + T_2], \quad (4)$$

где  $d$  — время от момента поступления новых данных в систему до момента начала их приема. Параметр  $d$  далее будем называть начальной задержкой. В силу отсутствия последействия у экспоненциального распределения (отсутствие памяти) [7] имеем

$$E[t - T_1 | T_1 < t < T_1 + T] = E[t | t < T_2].$$

Обозначим через  $f(t)$  плотность экспоненциального распределения, тогда

$$E[t | t < T_2] = \int_0^{T_2} t f(t | t < T_2) dt = \int_0^{T_2} t \frac{f(t)}{P(t < T_2)} dt = \frac{\int_0^{T_2} t \lambda e^{-\lambda t} dt}{1 - e^{-\lambda T_2}} = \frac{-e^{-\lambda T_2} (T_2 + 1/\lambda) + 1/\lambda}{1 - e^{-\lambda T_2}}. \quad (5)$$

Найдем  $E[d | T_1 < t < T_1 + T_2]$ . Пусть  $k$  — случайная величина ( $0 \leq k \leq L_1$ ), определяемая моментом поступления нового сообщения в цикле регенерации длины  $L_1$ . Тогда задержка от момента поступления до момента приема равна

$$d = \begin{cases} 0, & \text{если } k \leq B_1, \\ L_1 - k, & \text{если } k > B_1. \end{cases} \quad (6)$$

Заметим: если время прихода сообщения имеет экспоненциальное распределение, то на интервале фиксированной длины это время имеет равномерное распределение, согласно свойству простейшего потока событий [7]. Таким образом, введенная выше случайная величина  $k$  имеет равномерное распределение. Опустив промежуточные выкладки, согласно (6), получим

$$\bar{d}_1 \triangleq E[d | T_1 < t < T_1 + T_2] = \frac{L_1}{2} - B_1 + \frac{B_1^2}{2L_1}. \quad (7)$$

Аналогично для случая, когда новое сообщение придет в течение длинного цикла ожидания

$$\bar{d}_2 \triangleq E[d | t > T_1 + T_2] = \frac{L_2}{2} - B_2 + \frac{B_2^2}{2L_2}.$$

Подставив (5) и (7) в (4), получим

$$E[t_{d_{rx1}} | T_1 < t < T_1 + T_2] = \frac{-e^{-\lambda T_2}(T_2 + 1/\lambda) + 1/\lambda}{1 - e^{-\lambda T_2}} + \bar{d}_1,$$

и безусловное математическое ожидание

$$E[t_{d_{rx1}}] = \left( \frac{-e^{-\lambda T_2}(T_2 + 1/\lambda) + 1/\lambda}{1 - e^{-\lambda T_2}} + \bar{d}_1 \right) (e^{-\lambda T_1} - e^{-\lambda(T_1+T_2)}) + T_2 e^{-\lambda(T_1+T_2)}. \quad (8)$$

Аналогичным образом рассчитаем

$$E[t_{d_{rx2}}] = \left( \frac{1}{\lambda} + \bar{d}_2 \right) e^{-\lambda(T_1+T_2)}. \quad (9)$$

Средняя начальная задержка находится по формуле

$$\bar{d} \triangleq E[d] = \bar{d}_1 (e^{-\lambda T_1} - e^{-\lambda(T_1+T_2)}) + \bar{d}_2 e^{-\lambda(T_1+T_2)}. \quad (10)$$

Осталось найти среднюю длительность цикла регенерации, состоящего из времени приема данных, времени до поступления новой порции данных, начальной задержки нового сообщения. Тогда математическое ожидание  $t_{\text{сyc}}$  равно

$$E[t_{\text{сyc}}] = E[t_{rx}] + E[t] + E[d] = \bar{t}_{rx} + \frac{1}{\lambda} + \bar{d}. \quad (11)$$

Подставив (8) и (9) в (3), а (3) и (11) — в (2), окончательно получим долю времени, которую устройство проводит с выключенным приемопередатчиком.

**Численные результаты.** Заметим, что функции средней начальной задержки (10) и времени в энергосберегающих режимах (8) и (9) нелинейно зависят от параметров режима ожидания ( $L_1$ ,  $B_1$ ,  $T_1$ ,  $L_2$ ,  $B_2$  и  $T_2$ ). Это приводит к тому, что в общем случае при отсутствии ограничений на эти параметры нахождение оптимальных значений может быть непростой задачей. В реальных системах связи, как правило, задан набор возможных значений данных параметров, и решение оптимизационной задачи можно свести к перебору.

Ниже приведен типовой набор параметров трафика и режимов ожидания мобильного абонентского устройства.

*Параметры трафика*

Средний размер порции данных $\bar{s}$ .....	10 КБ
Среднее время между поступлением данных $1/\lambda$ .....	2 с
Скорость приема данных $R$ .....	12,5 КБ/с

*Параметры режимов энергосбережения*

$L_1$ .....	80 / 160 / 320 мс
$B_1$ .....	10 мс
$t_1$ .....	100 / 200 / 400 / 800 мс
$L_2$ .....	640 / 1280 / 2560 / 5120 мс
$B_2$ .....	2 / 4 / 6 / 8 / 10 мс
$T_2$ .....	0,5 / 1 / 2 / 5 с

На рис. 3 приведена зависимость доли времени в состоянии „он“ от ограничения на среднюю задержку. Каждая точка на графике соответствует значению  $\eta_{\text{он}}$  при оптимальных параметрах режима ожидания, т.е. таких, для которых  $\eta_{\text{он}}$  минимально при заданном огра-

ничении на  $\bar{d}$ . Поскольку, согласно (1), энергопотребление устройства пропорционально величине  $\eta_{\text{он}}$ , точки на графике соответствуют минимальному значению энергопотребления.

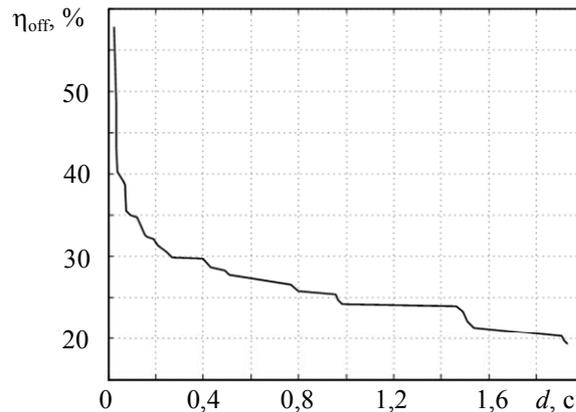


Рис. 3

**Заключение.** В работе рассмотрены типовые режимы энергосбережения мобильного пользовательского устройства, основанные на периодическом отключении приемопередатчика, а также описана методика оценки средней начальной задержки и энергопотребления. Показано, что, используя данную методику, можно подбирать оптимальные параметры режимов ожидания с учетом ограничения средней начальной задержки.

Отметим, что предложенная методика базируется на простой математической модели входного потока. Реальные потоки сложны, однако с той или иной степенью точности могут быть аппроксимированы рассмотренной моделью. Кроме того, описанный способ анализа применим и для более сложных систем с большим числом состояний. Критерием применимости методики является условие, при котором функционирование системы можно разбить на циклы регенерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kresch E., Kulkarni S. A poisson based bursty model of internet traffic // Proc. of IEEE 11th Intern. Conf. on Computer and Information Technology. 2011. P. 255—260.
2. Dahlman E., Parkvall S., Skold J., Beming P. 3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband. Elsevier Ltd., 2008. 648 p.
3. Ergen M. Mobile broadband — including WiMAX and LTE. NY: Springer, 2009. 540 p.
4. CDMA2000 evaluation methodology. Version 1.0 (Revision 0). 3GPP2, 2004.
5. Крэйн М., Лемуан О. Введение в регенеративный метод анализа моделей. М.: Наука, 1982. 104 с.
6. Анисимов А. В., Тюрликов А. М. Анализ влияния изменения характеристик потока на энергозатраты мобильной станции // ИУС. 2010. № 6(49). С. 62—69.
7. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1967. Т. 2. 752 с.

#### Сведения об авторах

- Евгений Васильевич Пустовалов** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт компьютерной безопасности вычислительных систем и сетей; научный сотрудник; E-mail: eugeny@vu.spb.ru
- Андрей Михайлович Тюрликов** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инфокоммуникационных систем; E-mail: turlikov@vu.spb.ru

Рекомендована кафедрой  
№ 51 безопасности информационных систем

Поступила в редакцию  
01.02.13 г.