

---

# Математическая теория телетрафика и сети телекоммуникаций

УДК 519.872

## Модель последовательного выделения радиоресурсов диапазонами фиксированного размера для неоднородного трафика межмашинного взаимодействия в сети LTE

И. А. Бутурлин

*Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей  
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

На сегодняшний день человека окружает множество технологических устройств (различные датчики контроля, интеллектуальные счётчики и др.), подключение которых к сети изменит традиционное представление об Интернет в целом. Подобные устройства могут осуществлять передачу данных в автоматическом режиме без участия человека, тем самым генерируя трафик межмашинного взаимодействия (англ. M2M, Machine-to-Machine), эффективное обслуживание которого в сетях связи следующего поколения является ещё нерешённой на данный момент задачей. Подключение M2M-устройств к сети предполагает появление множества новых услуг, которые будут привлекательны для пользователя и обеспечат дополнительный доход оператору сети связи. При этом возникает проблема обслуживания возрастающего множества подключённых M2M-устройств, которые передают небольшие объёмы данных. Данная задача является особенно актуальной для сетей мобильной связи LTE (Long Term Evolution), которые исторически были оптимизированы для обслуживания пользователей традиционных услуг связи (англ. H2H, Human-to-Human). Следовательно, требуется разработка новых методов обслуживания трафика нового типа на каждой фазе — от фазы установления соединения до фазы передачи данных. В статье предложена схема динамического распределения радиоресурсов соты сети LTE, когда для обслуживания неоднородного M2M-трафика ресурсы выделяются последовательно диапазонами фиксированного размера. Получено стационарное распределение вероятностей состояний модели и проведён численный анализ.

**Ключевые слова:** LTE, M2M, трафик межмашинного взаимодействия, H2H, динамическое распределение радиоресурсов, диапазон фиксированного размера, потоковый трафик, эластичный трафик.

## 1. Введение

За последние годы было разработано большое количество технологических устройств, поддерживающих различные приложения, которые предполагают передачу данных в автоматическом режиме без участия человека — так называемое межмашинное взаимодействие. Для обозначения нового типа соединений в телекоммуникационном сообществе используются два равнозначных понятия: в спецификациях консорциума 3GPP (3rd Generation Partnership Project) используется термин MTC (Machine Type Communication) [1], а в рамках работы Европейского института по стандартизации ETSI (European Telecommunications Standards Institute) термин M2M (Machine-to-Machine) [2]. В данной статье используется терминология ETSI, как наиболее часто встречающаяся в профильных публикациях. Для обозначения трафика традиционных услуг связи в сетях LTE в англоязычной литературе принято использовать термин H2H (Human-to-Human). Все, что связано с такого рода взаимодействием, будем обозначать аббревиатурой H2H, например H2H-трафик, H2H-услуга H2H-пользователь.

---

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-07-00953-а.

Автор выражает признательность и благодарность профессору Самуйлову К.Е. и доценту Гайдамака Ю.В. за оказанную помощь при подготовке статьи.

К основным задачам в беспроводных сетях относится оптимизация распределения ограниченного числа радиоресурсов между пользователями. Решением задач планирования ресурсов, назначения приоритетов доступа в зависимости от типа трафика с заданными требованиями к качеству обслуживания (QoS, Quality of Service) занимаются модули управления радиоресурсами, называемые планировщиками (англ. schedulers) [3]. Оптимизированные для обслуживания H2H-трафика традиционные схемы функционирования современных беспроводных сетей связи, к которым относятся сети LTE, уже не позволяют эффективно обслуживать новый тип соединений между большим количеством взаимодействующих технологических устройств [4]. Ввиду особенностей M2M-трафика [5–7] существующие механизмы распределения радиоресурсов между H2H-пользователями [8] становятся неэффективными и должны быть доработаны с учётом нового типа соединений. При разработке новых методов обслуживания M2M-трафика для сетей LTE необходимо учитывать следующие основные критерии эффективности [9]:

- 1) стоимость обслуживания (англ. Cost) — M2M-трафик должен обслуживаться с минимальными затратами;
- 2) скорость передачи (англ. Data rate) — минимальная скорость передачи данных должна составлять 118,4 кбит/с по нисходящему каналу и 59,2 кбит/с по восходящему;
- 3) спектральная эффективность (англ. Spectrum efficiency) — эффективность использования частотных ресурсов должна быть выше, чем в 3GPP Release 99 GSM/GPRS;
- 4) сосуществование (англ. Impacts on other devices) — обслуживание M2M-трафика не должно оказывать отрицательного влияния на качество обслуживания других устройств.

Приведённые критерии эффективности должны учитываться в том числе при разработке новых методов управления радиоресурсами (англ. Radio Resource Management) в сетях LTE. На сегодняшний день автору неизвестна общепринятая схема, которая определяла бы оптимальную стратегию динамического распределения радиоресурсов между H2H-пользователями и M2M-устройствами. Существуют отдельные исследования [10, 11], на основании которых оператор может принять решение использовать определённую схему выделения частотно-временных ресурсов для обслуживания M2M-трафика. В статье предложен метод управления радиоресурсами в сети LTE — схема выделения ресурсов последовательно диапазонами фиксированного размера.

Оставшаяся часть статьи состоит из трёх разделов. В первом разделе построена математическая модель соты сети LTE для неоднородного M2M-трафика в терминах теории телетрафика [12, 13], где ресурсы для обслуживания запросов M2M-устройств выделяются последовательно диапазонами фиксированного размера [14–17]. Для всех типов блоков данных, поступающих от M2M-устройств, установлено одинаковое ограничение на минимальную скорость передачи данных. Во втором разделе получена формула для расчёта стационарного распределения вероятностей состояний модели в мультипликативном виде. Разработан рекуррентный алгоритм расчёта распределения вероятностей системы. Заключительный раздел статьи посвящён численному анализу качества функционирования предложенной схемы распределения радиоресурсов. Проведён вычислительный эксперимент для исходных данных, близких к реальным параметрам функционирования соты сети LTE. Проанализированы результаты расчётов вероятностно-временных характеристик модели.

## 2. Построение модели соты сети

Рассматривается сота сети LTE, в которой H2H-пользователи и M2M-устройства имеют одинаковое значение отношения сигнал–шум SNR (Signal-to-Noise Ratio) и не меняют своего положения относительно базовой станции. Это означает, что все радиоканалы между базовой станцией и абонентскими устройствами

имеют одинаковые характеристики. Будем полагать в качестве пропускной способности соты сети LTE пиковую скорость передачи данных, которую обозначим  $C$  единиц канального ресурса (ЕКР), причём за единицу канального ресурса примем минимальную допустимую скорость передачи данных для M2M-трафика. Пользователям предоставляется одна H2H-услуга, например голосовая телефония или потоковое видео, а также сеть поддерживает передачу  $K$  типов блоков данных от множества M2M-устройств. Для предоставления услуги H2H-пользователям зарезервировано  $R_{H2H}$  ЕКР. Тогда  $C_{M2M} := C - R_{H2H}$  ЕКР доступно для M2M-устройств,  $C_{H2H} := C - C_{M2M}$  ЕКР – для пользователей H2H-услуги. Схема соты, обслуживающей M2M- и H2H-трафик, изображена на рис. 1.

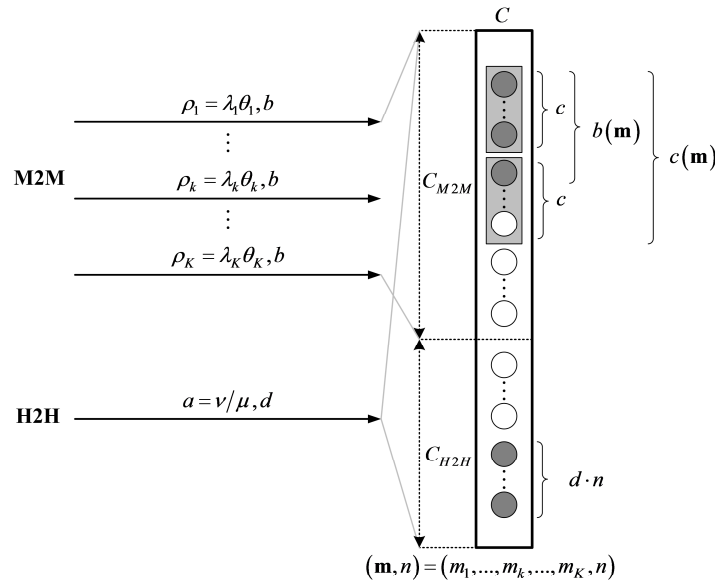


Рис. 1. Модель распределения ресурсов соты сети LTE с диапазоном фиксированного размера

Пусть для передачи блока данных любого типа от M2M-устройств требуется минимум  $b$  ЕКР. При этом для передачи текущего числа блоков данных ресурсы выделяются диапазонами фиксированного размера  $c$  ЕКР. Тогда величина  $M := \lfloor c/b \rfloor = \max \{y \in \mathbb{N} : y \leq c/b\}$  определяет максимальное число блоков данных, которые могут быть одновременно переданы на одном диапазоне ресурсов. Обозначим  $S := \lfloor C_{M2M}/c \rfloor$  максимальное число диапазонов ресурсов фиксированного размера, которые могут быть выделены в соте для обслуживания M2M-устройств. Полагаем, что входящий поток запросов M2M-устройств на передачу блоков данных  $k$ -типа является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_k$  [ $\text{с}^{-1}$ ], а длина блока распределена по экспоненциальному закону со средним  $\theta_k$  [бит]. Обозначим  $\rho_k := \lambda_k \theta_k$  соответствующую интенсивность предложенной нагрузки на передачу блоков данных  $k$ -типа,  $k = \overline{1, K}$ .

Для предоставления H2H-услуги требуется  $d$  ЕКР. Предполагается, что входящий поток запросов H2H-пользователей является пуассоновским с интенсивностью  $\nu$  [ $\text{с}^{-1}$ ], а время предоставления H2H-услуги распределено по экспоненциальному закону со средним  $1/\mu$  [с]. Обозначим  $a := \nu/\mu$  интенсивность предложенной нагрузки создаваемой пользователями H2H-услуги.

В модели при поступлении запроса на передачу блока данных  $k$ -типа,  $k = \overline{1, K}$ , от M2M-устройств возможны 3 ситуации.

1. Запрос будет принят на обслуживание, и дополнительные ресурсы не будут выделены. Ситуация возможна, когда на момент поступления запроса число передаваемых блоков таково, что уменьшение скорости их передачи (которая

- не может быть меньше, чем  $b$ ) позволит принять на обслуживание ещё один блок данных.
2. Запрос будет принят на обслуживание, и диапазон ресурсов фиксированного размера будет выделен. Ситуация возможна, когда на момент поступления запроса число передаваемых блоков таково, что уменьшение скорости их передачи (которая не может быть меньше, чем  $b$ ) не позволяет принять на обслуживание ещё один блок, и свободны  $c$  ЕКР из доступной для М2М-устройств пропускной способности  $C_{M2M}$  для выделения дополнительного диапазона.
  3. В противном случае запрос заблокирован ввиду отсутствия свободных ресурсов.

Аналогично для случая, когда поступает запрос Н2Н-пользователя, возможны две ситуации.

1. Запрос Н2Н-пользователя будет принят на обслуживание, если на момент его поступления свободны хотя бы  $d$  из  $C_{H2H}$  ЕКР.
2. В противном случае запрос будет заблокирован ввиду отсутствия свободных ресурсов.

Обозначим  $m_k(t)$  число передаваемых в момент  $t \geq 0$  блоков данных  $k$ -типа от М2М-устройств, а  $n(t)$  число пользователей, которым в момент  $t \geq 0$  предоставляется Н2Н-услуга. Тогда функционирование рассматриваемой модели соты сети LTE с трафиком межмашинного взаимодействия описывает составной случайный процесс  $\{(\mathbf{m}(t), n(t)), t > 0\} := \{(m_1(t), \dots, m_K(t), n(t)), t > 0\}$ , над пространством состояний

$$\mathcal{X} := \{\mathbf{m} \geq \mathbf{0}, n \geq 0 : n \cdot d \leq C - c(\mathbf{m}), c(\mathbf{m}) \leq C_{M2M}\}, \quad (1)$$

где  $c(m) := c \cdot \lceil b(\mathbf{m}) / M \rceil = c \cdot \min \{y \in \mathbb{N}, y \geq b(\mathbf{m}) / M\}$  — количество ЕКР, выделенное для передачи  $m_\bullet := \sum_{k=1}^K m_k$  блоков данных М2М-устройств, а  $b(\mathbf{m}) := b \cdot m_\bullet$  — минимальное число ЕКР, необходимое для передачи такого количества блоков данных. В сделанных предположениях о пуассоновском входящем потоке и экспоненциальном обслуживании случайный процесс  $(\mathbf{m}(t), n(t))$  является марковским процессом (МП).

Множества блокировок для М2М-устройств, передающих блоки данных  $k$ -типа, и множество блокировок для Н2Н-пользователей могут быть представлены следующим образом:

$$\mathcal{B}_k := \{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X} : n \cdot d > C - c(\mathbf{m} + e_k) \vee c(\mathbf{m} + e_k) > C_{M2M}\}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

$$\mathcal{B}_{H2H} := \{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X} : (n + 1)d > C - c(\mathbf{m})\}. \quad (3)$$

С учётом предположения, что для передачи блока данных М2М-устройств любого типа требуется  $b$  ЕКР, множество  $\mathcal{B}_k$  блокировок примет следующий вид:

$$\mathcal{B}_k = \{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X} : nd > C - c \lceil (m_\bullet + 1) / c \rceil \vee c \lceil (m_\bullet + 1) / c \rceil > C_{M2M}\}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4)$$

Полученное выражение (4), определяющее множество блокировок запросов на передачу блоков данных  $k$ -типа, зависит только от суммарного количества передающихся блоков данных  $m_\bullet$ . С учётом изложенного множество блокировок запросов на передачу блоков данных любого типа от М2М-устройств представимо в следующем виде:

$$\mathcal{B}_{M2M} := \{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X} : n \cdot d > C - c(m_\bullet + 1) \vee c(m_\bullet + 1) > C_{M2M}\}. \quad (5)$$

В предположении о стационарности МП  $(\mathbf{m}(t), n(t))$  существует стационарное распределение вероятностей  $p(\mathbf{m}, n)$ ,  $(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}$ ,  $(\mathbf{m}(t), n(t))$ , которое удовлетворяют следующей системе уравнений равновесия:

$$\begin{aligned}
 p(\mathbf{m}, n) \left[ \sum_{k=1}^K (\lambda_k \cdot 1 \{(\mathbf{m}, n) \notin \mathcal{B}_{M2M}\} + (c(m_{\bullet})/\theta_k) \cdot 1 \{m_k > 0\}) + \right. \\
 \left. + \nu \cdot 1 \{(\mathbf{m}, n) \notin \mathcal{B}_{H2H}\} + \mu n \right] = \sum_{k=1}^K p(\mathbf{m} - \mathbf{e}_k, n) \cdot \lambda_k \cdot 1 \{m_k > 0\} + \\
 + \sum_{k=1}^K p(\mathbf{m} + \mathbf{e}_k, n) (c(m_{\bullet} + 1)/\theta_k) \cdot 1 \{(\mathbf{m}, n) \notin \mathcal{B}_{M2M}\} + \\
 + p(\mathbf{m}, n + 1) \mu (n + 1) \cdot 1 \{n > 0\} + p(\mathbf{m}, n - 1) \cdot \nu \cdot 1 \{n > 0\}, \\
 k = \overline{1, K}, \quad (\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Из диаграммы на рис. 2 видно, что выполняется критерий Колмогорова и, следовательно, МП  $(\mathbf{m}(t), n(t))$  является обратимым случайным процессом. Тогда стационарные вероятности МП  $p(\mathbf{m}, n)$ ,  $(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}$  удовлетворяют системе уравнений частичного баланса:

$$\begin{cases} p(\mathbf{m}, n) \cdot (c(m_{\bullet})/\theta_k) = p(\mathbf{m} - \mathbf{e}_k, n) \cdot \lambda_k, & m_k > 0, k = \overline{1, K}, (\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}, \\ p(\mathbf{m}, n) \cdot \mu n = p(\mathbf{m}, n - 1) \cdot \nu, & n > 0, (\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}. \end{cases} \quad (7)$$

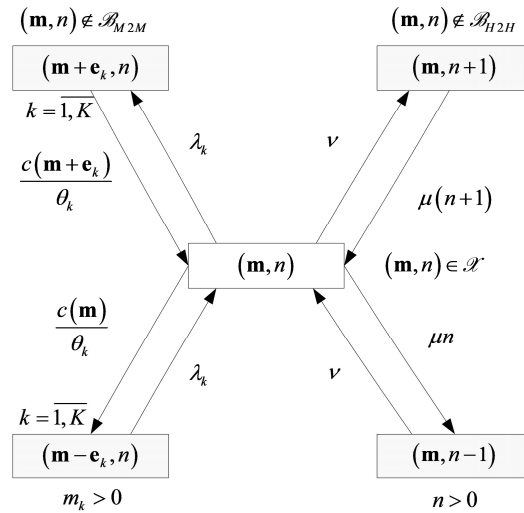


Рис. 2. Диаграмма интенсивностей переходов между  $(\mathbf{m}, n)$  и соседними состояниями при частичном балансе,  $(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}$

### 3. Анализ модели и алгоритм расчёта вероятностных характеристик

Из системы уравнений (7) стационарное распределение данного МП может быть найдено в явном виде, которое получено в следующем утверждении.

**Утверждение 1.** Стационарное распределение вероятностей состояний обратимого марковского процесса  $(\mathbf{m}(t), n(t))$  представимо в виде

$$p(\mathbf{m}, n) = G^{-1}(\mathcal{X}) c^{m_{\bullet}} \left( \prod_{i=1}^{m_{\bullet}} \lceil (b \cdot i) / M \rceil \right)^{-1} \cdot \left( \prod_{k=1}^K \rho_k^{m_k} \right) \cdot (a^n / n!), \quad (\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}, \quad (8)$$

где  $G(\mathcal{X}) = p^{-1}(\mathbf{0}, 0)$  — нормирующая константа.

Из системы уравнений (7) получено также важное следствие, которое может быть записано в виде рекуррентного алгоритма расчёта стационарного распределения  $p(\mathbf{m}, n)$ ,  $(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}$ .

### Алгоритм расчёта распределения вероятностей

**Исходные данные:**  $C, C_{H2H}, K, c, b, \nu, \mu, d; \lambda_k, \theta_k, k = 1, \bar{K}$ .

#### Шаг 1. Растёт исходных параметров

Растёт предложенной нагрузки:

$$\rho_k = \lambda_k \cdot \theta_k, \quad a := \nu / \mu.$$

$$C_{M2M} = C - R_{H2H}, \quad S = \lfloor C_{M2M} / c \rfloor, \quad M = \lfloor c / b \rfloor.$$

#### Шаг 2. Растёт ненормированных вероятностей $g(\mathbf{m}, n)$ и нормирующей константы $G(X)$

**2.1.**  $g(\mathbf{0}, 0) = 1, G(X) = 1$ .

**2.2.**  $c(m_{\bullet}) = c \cdot \lceil b(m_{\bullet}) / c \rceil, b(m_{\bullet}) = b \cdot m_{\bullet}, m_{\bullet} = 0, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor$ .

**2.3.** Вычислить:

**2.3.1.**

$$g(m_1, \dots, 0, \dots, 0, 0) = g(m_1 - 1, \dots, 0, \dots, 0, 0) (\rho_1 / c(m_1)),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, \dots, 0, \dots, 0, 0), \quad m_1 = 1, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor.$$

**2.3.2.**

$$g(m_1, m_2, \dots, 0, \dots, 0, 0) = g(m_1, m_2 - 1, \dots, 0, \dots, 0, 0) (\rho_2 / c(m_{\bullet})),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, m_2, \dots, 0, \dots, 0, 0),$$

$$m_2 = 1, \dots, \lfloor (S \cdot c - m_{\bullet} b) / b \rfloor, \quad m_{\bullet} = 0, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor.$$

...

**2.3.K.**

$$g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, 0) = g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K - 1, 0) (\rho_K / c(m_{\bullet})),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, 0),$$

$$m_K = 1, \dots, \lfloor (S \cdot c - m_{\bullet} b) / b \rfloor, \quad m_{\bullet} = 0, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor.$$

**2.4.**

$$g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n) = g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n - 1) \frac{a}{n},$$

$$n = 1, \dots, \lfloor (C - c(m_{\bullet})) / d \rfloor, \quad m_{\bullet} = 0, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor.$$

#### Шаг 3. Растёт нормированных вероятностей $p(\mathbf{m}, n)$ .

**3.1.**

$$p(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n) = g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n) / G(X),$$

$$n = 0, \dots, \lfloor (C - c(m_{\bullet})) / d \rfloor, \quad m_{\bullet} = 0, \dots, \lfloor S \cdot c / b \rfloor.$$

Зная распределение вероятностей  $p(\mathbf{m}, n)$ , можно рассчитать значения вероятностей блокировок запросов М2М-устройств  $B_{M2M} := \sum_{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{B}_{M2M}} p(\mathbf{m}, n)$  и Н2Н-пользователей  $B_{H2H} := \sum_{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{B}_{H2H}} p(\mathbf{m}, n)$ .

Важной характеристикой является величина среднего времени передачи блоков данных  $k$ -типа  $T_k$ , которая может быть вычислена по формуле:

$$T_k = \sum_{(\mathbf{m}, n) \in \mathcal{X}} m_k \cdot p(m, n) / \lambda_k (1 - B_{M2M}), \quad k = \overline{1, K}. \quad (9)$$

В следующем разделе получены результаты численного анализа вероятностно-временных характеристик модели с выделением ресурсов последовательно диапазонами фиксированного размера.

#### 4. Численный анализ

Рассматривается сота сети LTE с пиковой пропускной способностью  $C = 50$  Мбит/с, из которой для обслуживания Н2Н-пользователей зарезервировано  $C_{H2H} = 10$  Мбит/с. От М2М-устройств поступают запросы на передачу блоков данных двух типов, т.е.  $K = 2$ . Полагаем, что  $\theta_1 = 100$  кбайт и  $\lambda_1 \in [2, \dots, 98]$ , а  $\theta_2 = 200$  кбайт и  $\lambda_2 \in [1, \dots, 50]$ . В этом случае интенсивности предложенной нагрузки для двух типов блоков данных совпадают:  $\rho_1 = \rho_2$ . В результате анализа источников [9–11] за единицу канального ресурса выбрано значение  $b = 880$  кбит/с. Считаем, что для обслуживания М2М-трафика может быть выделено до двух диапазонов ( $S = 2$ ) фиксированного размера  $c = 20$  Мбит/с каждый. В качестве примера услуги, запрашиваемой Н2Н-пользователями, рассматриваем потоковое видео с минимальной допустимой скоростью передачи  $d = 3$  Мбит/с. При этом интенсивность предложенной нагрузки Н2Н-пользователей не меняется и составляет  $a = 5$ .

На рис. 3 представлены графики зависимости вероятностей блокировок запросов Н2Н-пользователей и М2М-устройств, а также среднего времени передачи блоков данных  $k$ -типа, от предложенной суммарной нагрузки М2М-устройств.

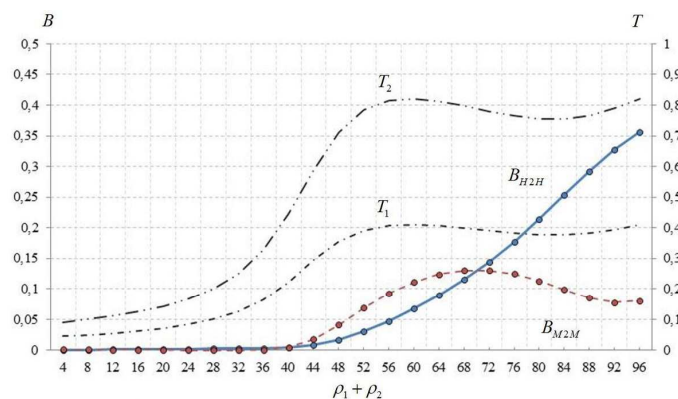


Рис. 3. Вероятности блокировок и среднее время передачи блока данных

Из графиков видно, что среднее время  $T_2$  передачи блоков данных второго типа больше времени  $T_1$ , что соответствует принципам обслуживания эластичного трафика [18, 19]. При этом кривые  $T_k$ ,  $k = \overline{1, 2}$ , имеют немонотонный характер,

связанный с предложенной схемой обслуживания М2М-устройств с выделением ресурсов последовательно диапазонами фиксированного размера.

Для объяснения наблюдаемого эффекта рассмотрим следующие вероятностно-временные характеристики модели.

1. Среднее количество выделенных диапазонов ресурсов фиксированного размера:

$$\bar{s} := \sum_{(\mathbf{m}, n) \in X} \lceil m_{\bullet} / M \rceil \cdot p(\mathbf{m}, n). \quad (10)$$

2. Среднее количество ресурсов, выделенное для передачи одного блока данных М2М-устройств:

$$\bar{b}_1 := \sum_{(\mathbf{m}, n) \in X, \mathbf{m} \neq \mathbf{0}} (c(m) / m_{\bullet}) \cdot p(\mathbf{m}, n). \quad (11)$$

Графики зависимостей указанных выше вероятностно-временных характеристик от роста предложенной суммарной нагрузки М2М-устройств представлены на рис. 4.

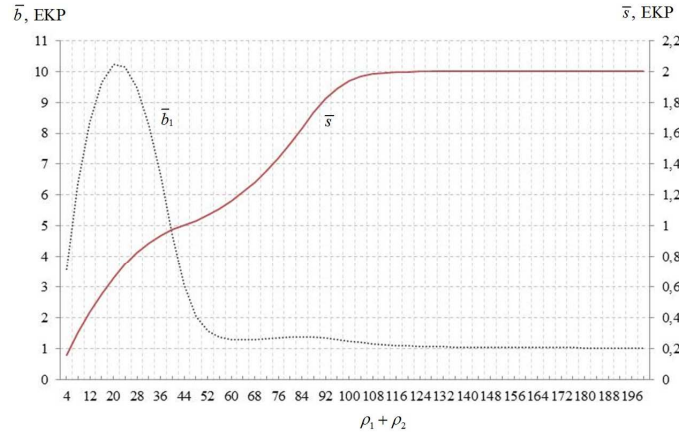


Рис. 4. Вероятностно-временные характеристики  $\bar{s}$  и  $\bar{b}_1$

Из графиков видно, что параметр  $\bar{b}$  достигает наибольшего значения при одном выделенном диапазоне ( $\bar{s} \leq 1$ ) и небольших значениях предложенной нагрузки  $\rho_1 + \rho_2 \in [24, \dots, 36]$  принимает при одном выделенном диапазоне ресурсов фиксированного размера. Таким образом, для данного интервала интенсивности предложенной нагрузки характерны минимальные значения времени передачи блока данных  $T_k$ ,  $k = \bar{1}, \bar{2}$ . С учётом дальнейшего роста предложенной нагрузки уменьшается количество ресурсов, доступных для М2М-устройств, и выделение очередного диапазона существенным образом не сокращает время передачи блоков данных.

## 5. Заключение

В статье предложена схема динамического распределения радиоресурсов между Н2Н-пользователями и М2М-устройствами с выделением ресурсов последовательно диапазонами фиксированного размера. В терминах теории телеграфика построена математическая модель соты сети LTE с одинаковым требованием к минимальной скорости передачи для всех типов блоков данных М2М-устройств. Показано, что множества блокировок запросов по времени для различных типов блоков данных совпадают. Для построенной в статье модели получена формула



для расчёта распределения вероятностей в мультипликативном виде. Разработан рекуррентный алгоритм расчёта распределения вероятностей состояний системы. Для анализа эффективности функционирования предложенной схемы распределения радиоресурсов проведён численный эксперимент, где использовались близкие к реальным исходные данные. При численном анализе среднего времени передачи блока данных М2М-устройства, количества ресурсов, выделенного для передачи одного блока данных, показано, что обслуживание М2М-устройств по принципу выделения ресурсов последовательно диапазонами фиксированного размера позволяет обеспечивать заданное среднее время передачи блоков данных. Полученные результаты для среднего времени от 0,1 с до 0,8 с примерно соответствуют данным 3GPP [6]. Таким образом, предложенная схема динамического распределения радиоресурсов может применяться в сетях LTE для поддержания заданных параметров качества обслуживания для М2М-устройств и Н2Н-пользователей, которые в настоящий момент приносят основной доход операторам связи.

С ростом интенсивности предложенной нагрузки планировщика на базовой станции сети LTE должны определять оптимальный размер диапазона ресурсов исходя из установленных оператором ограничений на качество обслуживания, например, вероятность потерь запросов Н2Н-пользователей и среднее время передачи блоков данных М2М-устройств. Задачей дальнейших исследований является нахождение оптимального размера диапазонов ресурсов, выделяемых последовательно, для чего должна быть сформулирована и решена задача оптимизации, где в качестве целевой функции может использоваться величина незадействованных ресурсов, которую следует максимизировать, а в качестве ограничений — заданные параметры качества обслуживания [17].

## Литература

1. 3GPP TR 21.905 – Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 12). — 2013. — <http://www.3gpp.org/DynaReport/21905.htm>.
2. ETSI TR 102 725 – Machine-to-Machine Communications (Definitions). — 2013. — <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/m2m>.
3. Задачи оптимального планирования межуровневого интерфейса в беспроводных сетях / Ю. В. Гайдамака, Т. В. Ефимушкина, А. К. Самуйлов, К. Е. Самуйлов // Информатика и ее применения. — 2012. — Т. 6, вып. 3. — С. 75–81.
4. M2M: from Mobile to Embedded Internet / G. Wu, S. Talwar, K. Johnsson et al. // IEEE Communications Magazine. — 2011. — Vol. 49(4). — Pp. 36–43.
5. TS 22.368 – Service Requirements for Machine-Type Communications (M2M); Stage 1 (Release 12). — 2013. — <http://www.3gpp.org/DynaReport/22368.htm>.
6. 3GPP TR 37.868 – RAN Improvements for Machine-type Communications (Release 11). — 2011. — <http://www.3gpp.org/DynaReport/37868.htm>.
7. 3GPP TR 37.869 – Study on enhancements to Machine-Type Communications (M2M) and other mobile data applications; Radio Access Network (RAN) aspects (Release 12). — 2013. — <http://www.3gpp.org/DynaReport/37869.htm>.
8. 3GPP TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 11). — 2012. — <http://www.3gpp.org/DynaReport/36300.htm>.
9. Beale M. Future Challenges in Efficiently Supporting M2M in the LTE Standards // Proceedings of the 10th Wireless Communications and Networking Conference WCNCW 2012, Paris, France. — 2012. — Pp. 186–190.
10. Shin S. Y., Triwicaksono D. Radio Resource Control Scheme for Machine-to-Machine Communication in LTE Infrastructure // Proceedings of the 3rd International Conference on ICT Convergence ICTC 2012, Jeju Is-land, Korea. — 2012. — Pp. 1–6.

11. Radio Resource Allocation in LTE-aDvanced Cellular Net-Works with M2M Communications / K. Zheng, F. Hu, W. Wang et al. // IEEE Communications Magazine. — 2012. — Vol. 50, No 7. — Pp. 184–192.
12. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика: Учебное пособие. — Москва: РУДН, 2009. — 342 с.
13. Наумов В. А., Самуйлов К. Е., Яркина Н. В. Теория телетрафика мульти-сервисных сетей: Монография. — Москва: РУДН, 2007. — 192 с.
14. Modelling and Analysing a Dynamic Resource Allocation Scheme for M2M Traffic in LTE Networks / V. Y. Borodakiy, I. A. Buturlin, I. A. Gudkova, K. E. Samouylov // Lecture Notes in Computer Science. — 2013. — Vol. 8121. — Pp. 420–426.
15. Analyzing Impacts of Coexistence Between M2M and H2H Communication on 3GPP LTE System / I. A. Gudkova, K. E. Samouylov, I. A. Buturlin et al. // Lecture Notes in Computer Science. — 2014. — Vol. 8458. — Pp. 162–174.
16. Бутурлин И. А. Алгоритм расчета вероятностно-временных характеристик модели соты сети LTE с трафиком межмашинного взаимодействия. — 2014.
17. Задача поиска оптимального размера диапазона пропускной способности соты сети LTE для M2M трафика / И. А. Бутурлин, В. О. Бегишев, С. В. Коротков, Е. В. Короткова // Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 22–25 апреля 2014 г. — 2014. — С. 17–19.
18. A New Stage in Mathematical Teletraffic Theory / G. P. Basharin, K. E. Samouylov, N. V. Yarkina, I. A. Gudkova // Automation and Remote Control. — 2009. — Vol. 70, No 12. — Pp. 1954–1964.
19. Gudkova I. A., Samouylov K. E. Modelling a Radio Admission Control Scheme for Video Telephony Service in Wireless Networks // Lecture Notes in Computer Science / Ed. by S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy. — Germany, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — Vol. 7469. — Pp. 208–215.

UDC 519.872

## On Radio Resource Allocation Scheme Model with Fixed Transmission Zone for Heterogeneous M2M Traffic in LTE Network

I. A. Buturlin

*Department of Applied Informatics and Probability Theory  
Peoples' Friendship University of Russia  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation, 117198*

Today human is surrounded by many technological devices (sensors, smartmeters, etc.) that become connected and will reshape the Internet as we know it today. These devices can transmit and receive data through wireless interfaces transmitting data independently and automatically, thereby generating M2M (Machine-to-Machine) traffic. Efficient service of M2M traffic remains a challenge for future mobile networks. Such massive connectivity offers novel attractive services and provides additional income for operators, but also raises significant challenges to manage large number of devices, typically transmitting only small data fragments. This is especially true for LTE (Long Term Evolution), which has been historically optimized for H2H users (Human-to-Human). Consequently, it is required to develop new methods for M2M traffic for each phase — from the connection establishment phase to the data transmission phase. The article proposes a scheme of dynamic radio resource allocation of LTE cell with fixed transmission zone for heterogeneous M2M traffic. The stationary probability distribution is obtained and the numerical analysis is performed.

**Key words and phrases:** LTE, M2M, Machine-to-Machine, H2H, Human-to-Human, dynamic radioresource allocation, fixed transmission zone, streaming traffic, elastic traffic.

## References

1. 3GPP TR 21.905 – Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 12) (2013). URL <http://www.3gpp.org/DynaReport/21905.htm>

2. ETSI TR 102 725 – Machine-to-Machine Communications (Definitions) (2013).  
URL <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/m2m>
3. Y. Gaidamaka, T. Efimushkina, A. Samuylov, K. Samouylov, Review of Cross-Layer Optimization Problems for Wireless Networks, *Informatics and Applications* 6(3) (2012) 75–81, in Russian.
4. G. Wu, S. Talwar, K. Johnsson, N. Himayat, K. Johnson, M2M: from Mobile to Embedded Internet, *IEEE Communications Magazine* 49(4) (2011) 36–43.
5. TS 22.368 – Service Requirements for Machine-Type Communications (M2M); Stage 1 (Release 12) (2013).  
URL <http://www.3gpp.org/DynaReport/22368.htm>
6. 3GPP TR 37.868 – RAN Improvements for Machine-type Communications (Release 11) (2011).  
URL <http://www.3gpp.org/DynaReport/37868.htm>
7. 3GPP TR 37.869 – Study on enhancements to Machine-Type Communications (M2M) and other mobile data applications; Radio Access Network (RAN) aspects (Release 12) (2013).  
URL <http://www.3gpp.org/DynaReport/37869.htm>
8. 3GPP TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 11) (2012).  
URL <http://www.3gpp.org/DynaReport/36300.htm>
9. M. Beale, Future Challenges in Efficiently Supporting M2M in the LTE Standards, in: *Proceedings of the 10th Wireless Communications and Networking Conference WCNCW 2012, Paris, France, 2012*, pp. 186–190.
10. S. Y. Shin, D. Triwicaksono, Radio Resource Control Scheme for Machine-to-Machine Communication in LTE Infrastructure, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on ICT Convergence ICTC 2012, Jeju Is-land, Korea, 2012*, pp. 1–6.
11. K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang, M. Dohler, Radio Resource Allocation in LTE-advanced Cellular Networks with M2M Communications, *IEEE Communications Magazine* 50 (7) (2012) 184–192.
12. G. P. Basharin, *Lectures on Mathematical Teletraffic Theory*, RUDN, Moscow, 2009, in Russian.
13. V. F. Naumov, K. E. Samouylov, N. V. Yarkina, *Teletraffic Theory for Multiservice Networks*, RUDN, Moscow, 2007, in Russian.
14. V. Y. Borodakiy, I. A. Buturlin, I. A. Gudkova, K. E. Samouylov, Modelling and Analysing a Dynamic Resource Allocation Scheme for M2M Traffic in LTE Networks, *Lecture Notes in Computer Science* 8121 (2013) 420–426.
15. I. A. Gudkova, K. E. Samouylov, I. A. Buturlin, et al., Analyzing Impacts of Coexistence Between M2M and H2H Communication on 3GPP LTE System, *Lecture Notes in Computer Science* 8458 (2014) 162–174.
16. Buturlin, I. A, Algorithm for Calculating Performance Measures of Radio Resource Allocation Scheme Model for Machine Type Communications in LTE Network, in: *Proceedings of ITTMM, Moscow, RUDN, 2014*, pp. 14–16, in Russian.
17. I. A. Buturlin, V. O. Begishev, S. V. Korotkov, E. V. Korotkova, The Task of Searching for the Optimum Capacity of Fixed Range for Model Radio Resource Allocation in LTE Network with Machine-Type Communications Traffic, in: *Proceedings of ITTMM, Moscow, RUDN, 2014*, pp. 17–19, in Russian.
18. G. P. Basharin, K. E. Samouylov, N. V. Yarkina, I. A. Gudkova, A New Stage in Mathematical Teletraffic Theory, *Automation and Remote Control* 70 (12) (2009) 1954–1964.
19. I. A. Gudkova, K. E. Samouylov, Modelling a Radio Admission Control Scheme for Video Telephony Service in Wireless Networks, Vol. 7469, Springer-Verlag, Germany, Heidelberg, 2012, pp. 208–215.