
УДК 621.39

Модель соты LTE с межмашинным трафиком в виде мультисервисной системы массового обслуживания с эластичными и потоковыми заявками и марковским входящим потоком

**В. М. Вишнеvский^{*}, К. Е. Самуйлов[†],
В. А. Наумов[‡], Н. В. Яркина[†]**

^{*} *Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

[†] *Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

[‡] *Исследовательский институт инноваций, Хельсинки, Финляндия*

Интернет вещей (ИВ) имеет все шансы стать “третьей волной” в развитии Интернета и существенно поменять лицо отрасли связи как в технологическом, так и в экономическом отношении. Однако для того чтобы это стало реальностью, должна быть создана инфокоммуникационная инфраструктура, обеспечивающая функции сетевого доступа и управления миллионам, а то и миллиардам ИВ-устройств. Сети LTE займут центральное место в этой инфраструктуре при условии, что соответствующие стандарты будут доработаны для обеспечения массового межмашинного взаимодействия без ущерба для предоставления традиционных услуг абонентам. Настоящая работа посвящена построению модели распределения радиоресурсов в соте сети LTE, обслуживающей два типа трафика: телефонии и межмашинного взаимодействия. Модель построена в виде мультисервисной системы массового обслуживания с потоковыми и эластичными заявками. Ресурсы для пропуска трафика межмашинного взаимодействия выделяются диапазонами фиксированного размера, а поступление запросов на его передачу описывается с помощью марковского входящего потока (Markovian Arrival Process, MAP). В работе получены стационарное распределение вероятностей состояний системы и формулы для стационарных вероятностей потерь заявок.

Ключевые слова: Интернет вещей, сеть LTE, мультисервисная система массового обслуживания, марковский входящий поток, MAP-поток

1. Введение

В последние годы эволюция сетей сотовой подвижной связи была направлена в первую очередь на повышение скорости передачи данных и обеспечение высокого качества обслуживания (quality of service, QoS), что связано прежде всего с распространением мультимедийных и интерактивных приложений. Однако расширение межмашинных коммуникаций (machine to machine, M2M), влекущее за собой развитие Интернета вещей (ИВ; Internet of Things, IoT), предъявляет к сетям иные, во многом противоположные требования, обусловленные характеристиками трафика, генерируемого приложениями данного типа, а также ограничениями на передающие устройства (дешевизна, долгий срок службы элементов питания).

Интернет вещей — это не просто совокупность разнообразных приборов и датчиков, связанных между собой проводными и беспроводными каналами связи и подключенных к сети Интернет. Под ИВ понимают глобальную инфокоммуникационную инфраструктуру с возможностями автоматического конфигурирования, которая объединяет физические и виртуальные “вещи”, обладающие не только физическими свойствами, но и виртуальной субъектностью, и таким образом обеспечивает более тесную интеграцию реального и виртуального миров, где взаимодействие осуществляется как между людьми, так и между устройствами. Предполагается, что в

Статья поступила в редакцию 30 октября 2016 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и DST (Индия) (грант № 16-49-02021) в рамках совместного научно-исследовательского проекта Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук и CMS Колледжа Коттаям.

будущем “вещи” станут активными участниками хозяйственной, социальной и информационной деятельности, смогут взаимодействовать между собой и с окружающим миром путем обмена информацией об окружающей среде, автономного реагирования на события реального мира и влияния на них, выполняя действия или запуская процессы в том числе и без прямого участия человека [1].

Существующие и потенциальные приложения ИВ весьма разнообразны, однако по требованиям к устройствам и характеристикам трафика их разделяют на две крупные категории: массовые (также называемые massive MachineType Communications, mMTC) и критические. Данные категории и сферы применения соответствующих приложений и устройств представлены в табл. 1. Перечисленные в табл. 1 характеристики обозначают, условно говоря, границы шкалы, на которой можно разместить самые различные приложения ИВ. Исходя из известных на сегодняшний день технологий, можно предположить, что приложения массового типа будут обеспечивать существенно большее число подключений по сравнению с критическими приложениями, однако последние смогут приносить более высокий доход оператору сети связи.

Таблица 1

Основные категории приложений ИВ

Тип приложений	Массовый	Критический
Характеристики устройств и трафика	<ul style="list-style-type: none"> – низкая стоимость устройств и их эксплуатации; – низкое энергопотребление; – малый объем передаваемых данных; – чрезвычайно большое количество устройств 	<ul style="list-style-type: none"> – высочайшая надежность; – крайне низкая задержка передачи данных; – крайне высокая готовность
Примеры сфер применения	<ul style="list-style-type: none"> – «умные» здания и города; – «умное» сельское хозяйство; – коммунальное хозяйство (счетчики, освещение и т. п.); – логистика и отслеживание грузов; – носимые устройства и др. 	<ul style="list-style-type: none"> – телемедицина, включая удаленную хирургию; – безопасность дорожного движения и беспилотный транспорт; – робототехника и др.

Концепция ИВ была официально представлена отрасли Международным Союзом Электросвязи еще в 2005 г. в одноименном докладе [2], однако, для того чтобы это направление стало полноценной “третьей волной” в развитии сети Интернет (“второй волной” принято считать распространение доступа в Интернет с мобильных устройств), необходимо развертывание сетевой и информационной инфраструктуры, которая могла бы поддержать лавинообразный рост M2M-соединений и обеспечить необходимые функции управления. Весьма вероятно, что такая инфраструктура не будет однородной, по крайней мере на начальном этапе развития ИВ. Уже сегодня на место в ней претендуют как широко известные, так и новые, разработанные специально для обслуживания массового ИВ технологии и протоколы сетевого доступа, среди которых стандарты проводной связи (Ethernet, оптоволоконные сети доступа, VASnet и др.), стандарты сотовой подвижной связи (GPRS, EDGE, HSPA, LTE и LTE Advanced), технологии ячеистых (mesh) сетей (например, ZigBee), технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (low-power wide-area network, LPWAN), включая SigFox и LoRa, стандарты сетей связи через линии

электропередачи (PRIME, G3) и стандарты беспроводных локальных и городских вычислительных сетей (Wi-Fi и WiMAX) [3].

Стандарты сетей сотовой подвижной связи занимают в этом ряду особое место, поскольку обладают такими преимуществами, как широчайшая зона покрытия, устойчивое положение операторов на рынке услуг связи и поддержка производителей оборудования, возможность обслуживать широкий спектр ИВ-приложений, не ограничиваясь простейшими передающими устройствами, управление качеством обслуживания (QoS), управление доступом и безопасностью. При работе над вышедшем в середине 2016 г. релизом 13 спецификаций LTE (LTE Advanced Pro), межмашинным коммуникациям и ИВ было уделено особое внимание. За очень короткое время 3GPP подготовил вошедший в этот релиз специальный стандарт для обслуживания межмашинных соединений массового типа NB-IoT (Narrowband Internet of Things — узкополосный Интернет вещей), позволяющий оператору сети LTE использовать имеющуюся инфраструктуру для развертывания сети доступа для простейших стационарных ИВ-устройств (скорость передачи данных до 200 кбит/с) и призванный составить конкуренцию быстро распространяющимся технологиям LPWAN SigFox и LoRa. Кроме того, в арсенале 3GPP для обслуживания M2M-трафика массового типа имеются технологии EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM for IoT) и LTE Cat-M1 (также известная как enhanced Machine-Type-Communications, eMTC, или LTE-M), первая из которых предназначена для развертывания сети массового ИВ на сети GSM, тогда как вторая позволяет обслуживать M2M-устройства с максимальной скоростью передачи 1 Мбит/с и ограниченной мобильностью в сотах LTE. Важнейшую роль в обеспечении межмашинного взаимодействия играет изначально предназначенный для обслуживания основного трафика LTE стандарт 3GPP LTE Cat 1. Он применяется для подключения M2M-устройств, которым необходима полная мобильность и/или передача данных со скоростью более 1 Мбит/с. К таким устройствам относятся носимые устройства, устройства, осуществляющие передачу видео или аудио, устройства, которыми оснащен автотранспорт и др.

На данный момент не существует общепринятого подхода к обслуживанию M2M-устройств в сетях связи общего пользования, в том числе оптимального метода для распределения ограниченного количества радиоресурсов между пользователями услуг связи и большим количеством подобных устройств. Однако учитывая большой рыночный потенциал данного сегмента, операторы совместно с международными стандартизирующими организациями формулируют широкий класс задач планирования радиоресурсов для эффективного обслуживания трафика ИВ [4–9]. Общими для большинства исследований являются такие характеристики M2M-трафика, как малый размер передаваемых блоков данных и большое количество подключаемых устройств. Значительное число работ посвящено исследованию задачи предотвращения перегрузок на базовой станции беспроводной сети последующего поколения с M2M-трафиком [4, 6, 10, 11]. Результаты подобных исследований позволяют оператору принять решение использовать ту или иную схему выделения доступных частотно-временных ресурсов для передачи блоков данных от M2M-устройств [8, 12, 13]. Схема динамического распределения радиоресурсов соты сети LTE, когда для обслуживания трафика межмашинного взаимодействия выделяются фиксированные диапазоны пропускной способности, а остальные ресурсы доступны для пользователей телефонии, предложена в [14]. Здесь же в терминах математической теории телетрафика построена модель такой соты и рассмотрены ее ветвятно-временные характеристики, для того чтобы оценить эффективность предложенной схемы для обеспечения требований к качеству обслуживания. Однако в предложенной модели поступление запросов на передачу блоков данных от M2M-устройств для простоты моделируется с помощью пуассоновского входящего потока. В настоящей работе также рассматривается сота LTE с трафиком телефонии и M2M, однако, в отличие от [14], поступление запросов на передачу M2M-трафика описывается с помощью более общего марковского входящего потока (Markovian Arrival Process, MAP).

2. Постановка задачи

Будем рассматривать соту сети LTE, в которой предоставляется услуга телефонии (или любая другая услуга, требующая широкополосной передачи потоков данных), а также передаются блоки данных M2M-устройств. Перед тем как перейти к построению математической модели, сделаем ряд упрощающих предположений относительно функционирования рассматриваемой соты сети (см. рис. 1). Будем предполагать, что все пользователи услуги телефонии и M2M-устройства имеют одинаковое значение отношения сигнал/шум и не меняют своего положения относительно базовой станции. Таким образом, устанавливаемые радиоканалы будут иметь одинаковые характеристики, и скорость передачи данных будет зависеть только от количества выделенных единиц канального ресурса. Под единицей канального ресурса (ЕКР) подразумевается некая условная величина, которая соответствует минимально допустимой скорости передачи данных (например, в бит/с) для заданного количества выделенных физических ресурсных блоков. Будем считать, что пиковая пропускная способность соты составляет C ЕКР.

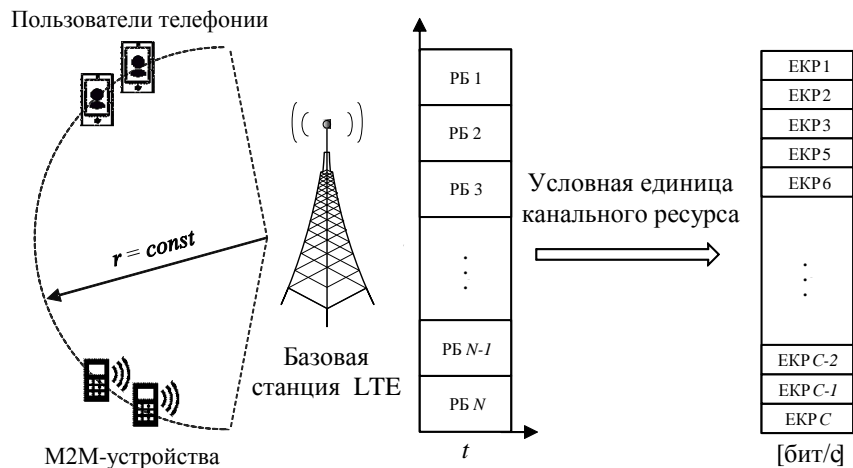


Рис. 1. Упрощающие предположения и условная единица канального ресурса

С ростом интенсивности предложенной нагрузки планировщик на базовой станции сети LTE должен определять оптимальный размер диапазона радиоресурсов, исходя из установленных оператором сети ограничений на качество обслуживания, например вероятность потерь запросов пользователей телефонии и среднее время передачи блоков данных M2M-устройств. Поскольку зачастую блоки M2M-данных имеют крайне малый размер и поступают от большого количества устройств, оказывается нецелесообразно выделять для передачи данных от одного M2M-устройства целый ресурсный блок (РБ, диапазон частот), который является минимальным ресурсным элементом, выделяемым планировщиком базовой станции LTE [15]. В [6, 10, 12] рассматривается выделение одного ресурсного блока для передачи данных от множества M2M-устройств. В частности, в исследовании [12] предложена модель обслуживания M2M-устройств с помощью искусственно (виртуально) выделенных поднесущих на доступной частотной емкости соты LTE.

Для того чтобы сети беспроводной связи последующих поколений стали эффективным механизмом обслуживания M2M-трафика необходимо разработать такие методы распределения радиоресурсов, которые обеспечат минимальное влияние на качество обслуживания традиционных абонентов, приносящих пока основной доход операторам сетей связи. Поэтому будем считать, что часть ЕКР соты доступна

только трафику телефонии и не может использоваться для передачи данных от М2М-устройств.

3. Система массового обслуживания

Функционирование такой соты LTE может быть описано в терминах теории телетрафика с помощью мультисервисной системы массового обслуживания (СМО) с потоковыми заявками, которые соответствуют вызовам телефонии, и эластичными заявками, соответствующими передаче блоков данных М2М-устройств. Пусть на СМО, состоящую из C приборов и не имеющую мест для ожидания, поступают заявки двух типов: потоковые и эластичные (рис. 2). Эластичным заявкам доступно $C_E \leq C$ приборов и они обслуживаются в соответствии с дисциплиной справедливого разделения процессора (Egalitarian Processor Sharing, EPS [16]), однако для обслуживания одной эластичной заявки в каждый момент времени требуется не менее b приборов. При этом пусть приборы для обслуживания эластичных заявок выделяются блоками по $C \geq b$ приборов. Потоковым заявкам в каждый момент времени доступны все приборы системы, не вошедшие в блоки приборов, выделенные для обслуживания эластичных заявок.

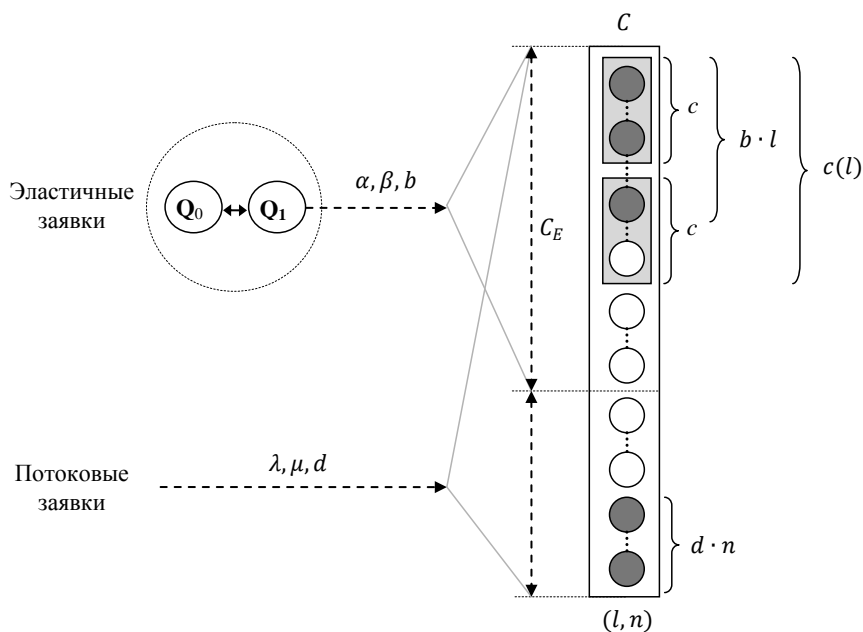


Рис. 2. СМО с потоковыми и эластичными заявками

Положим, что входящий поток эластичных заявок является МАР-поток. Поток эластичных заявок поступает на систему от источника, который может находиться в одном из K -состояний и характеризуется двумя квадратными матрицами Q_0 и Q_1 порядка K , $Q_1 \geq 0$, $Q_0 + Q_1 = Q$, где Q матрица интенсивностей переходов цепи Маркова описывающей состояния источника [17, 18]. Мы предполагаем, что матрица Q_1 отлична от нулевой, а матрица Q неприводима. Обозначим q вектор-строку стационарных вероятностей состояний источника и 1 вектор-столбец из единиц. Тогда интенсивность поступающего потока эластичных заявок дается формулой $\alpha = \mathbf{q}Q_11$. Пусть длины эластичных заявок распределены по экспоненциальному закону с параметром β . Напомним, что в системе EPS с одним прибором остаточная

длина заявки – это количество работы по ее обслуживанию с единичной скоростью, измеряемое в единицах времени [16]. При этом заявка обслуживается с переменной скоростью до тех пор, пока ее остаточная длина не станет равной нулю.

Обозначим $M = \lfloor c/b \rfloor = \max \{y \in N : y \leq \frac{c}{b}\}$ максимальное число эластичных заявок, которые могут быть одновременно обслужены одним блоком приборов. Поскольку для обслуживания эластичных заявок может быть выделено самое большое $S = \lfloor C_E/c \rfloor = \max \{y \in N : y \leq \frac{C_E}{c}\}$ таких блоков, максимальное число эластичных заявок, которые могут быть одновременно обслужены СМО, равняется $L = MS$. Если в системе находится l эластичных заявок, то общее число обслуживающих их приборов равно $c(l) = c \cdot \lceil l/M \rceil = c \cdot \min \{y \in N : y \geq l/M\}$, причем ресурс этих приборов равномерно распределяется между всеми эластичными заявками, то есть каждая из них обслуживается $\frac{c(l)}{l}$ приборами.

Пусть в системе обслуживаются l эластичных заявок. Тогда при поступлении в систему $(l + 1)$ -й эластичной заявки происходит следующее:

1. Если на момент поступления $c(l + 1) = c(l)$, то заявка принимается на обслуживание без выделения дополнительных приборов. При этом ресурс приборов перераспределяется поровну между $(l + 1)$ заявками (каждая эластичная заявка обслуживается $\frac{c(l+1)}{l+1} = \frac{c(l)}{l+1}$ приборами вместо $\frac{c(l)}{l}$; скорость обслуживания падает).
2. Если на момент поступления заявки $c(l + 1) > c(l)$, $c(l + 1) \leq C_E$ и среди доступных эластичным заявкам приборов есть c свободных приборов, заявка принимается на обслуживание с выделением дополнительно блока из c приборов. При этом скорость обслуживания всех эластичных заявок возрастет, так как они дополнительно получают свободный ресурс нового блока.
3. В противном случае (выделение блока требуется, но свободных приборов не достаточно) заявка будет потеряна.

Если эластичная заявка была принята на обслуживание, она будет находиться в системе до тех пор, пока ее остаточная длина не станет равной нулю, после чего покинет систему. Пусть в системе находятся l эластичных заявок. Тогда в момент ухода любой эластичной заявки приборы перераспределяются между оставшимися заявками этого типа следующим образом:

1. Если $c(l - 1) = c(l)$ (оставшиеся заявки нельзя «утрамбовать» в меньшее число блоков), приборы не освобождаются, а перераспределяются поровну между оставшимися эластичными заявками, скорость обслуживания которых увеличивается.
2. Если $c(l - 1) < c(l)$, то блок из c приборов высвобождается, а оставшиеся эластичные заявки занимают $c(l - 1)$ приборов, деля их ресурс поровну (скорость обслуживания падает).

Для обслуживания одной потоковой заявки требуется d приборов. Предполагается, что поступающие заявки этого типа образуют пуассоновский поток с интенсивностью λ и время занятия ими приборов распределено по экспоненциальному закону с параметром μ . Пусть в системе обслуживается l эластичных заявок и n потоковых заявок. Тогда для обслуживания потоковых заявок доступны $C - c(l)$ приборов, которые могут обслужить максимум $N(l) = \lfloor (C - c(l))/d \rfloor$ потоковых заявок. При поступлении в систему потоковая заявка будет принята на обслуживание, если на момент ее поступления свободны хотя бы d приборов. Заявка занимает d приборов на время своего обслуживания, после чего покидает систему (d приборов при этом высвобождаются). Если при поступлении потоковой заявки $n + 1 > N(l)$, значит в системе меньше чем d свободных приборов и поступившая потоковая заявка будет потеряна. Добавим, что в данных обозначениях поступившая эластичная заявка будет потеряна, если в момент ее поступления $n > N(l + 1)$.

4. Стационарное распределение вероятностей состояний СМО и ее стационарные характеристики

Обозначим $l(t)$ число обслуживаемых СМО эластичных заявок, $n(t)$ — число потоковых заявок, и $k(t)$ — состояние источника в момент времени $t \geq 0$. Тогда функционирование СМО описывает составной марковский процесс $X(t) = (l(t), n(t), k(t))$, $t \geq 0$, с пространством состояний $X = \{(l, n, k) | l \geq 0, n \geq 0, l \leq L, c(l) + nd \leq C, 1 \leq k \leq K\}$.

Матрица интенсивностей переходов \mathbf{A} этого процесса является блочной трехдиагональной:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_0 & \Lambda_0 & & & & \\ \mathbf{M}_1 & \mathbf{D}_1 & \Lambda_1 & & & \\ & \mathbf{M}_2 & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & \mathbf{D}_{L-1} & \Lambda_{L-1} & \\ & & & \mathbf{M}_L & \mathbf{D}_L & \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В этой матрице блок, находящийся на пересечении i -й блочной строки и j -го блочного столбца, сам является блочной матрицей, имеющей блочный размер $(N(i) + 1) \times (N(j) + 1)$ и составленной из квадратных матриц порядка K . Диагональные блоки матрицы \mathbf{A} имеют блочную трехдиагональную структуру:

$$\mathbf{D}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{l,0} & \lambda \mathbf{I} & & & & & \\ \mu \mathbf{I} & \mathbf{F}_{l,1} & \lambda \mathbf{I} & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & N(l+1)\mu \mathbf{I} & \mathbf{F}_{l,N(l+1)} & \lambda \mathbf{I} & & \\ & & & (N(l+1)+1)\mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{l,N(l+1)+1} & \lambda \mathbf{I} & \\ & & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & & (N(l)-1)\mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{l,N(l)-1} & \lambda \mathbf{I} \\ & & & & & & N(l)\mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{l,N(l)} \end{bmatrix}, \quad 0 \leq l < L,$$

$$\mathbf{D}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{L,0} & \lambda \mathbf{I} & & & & \\ \mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{L,1} & \lambda \mathbf{I} & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & (N(L)-1)\mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{L,N(L)-1} & \lambda \mathbf{I} & \\ & & & N(L)\mu \mathbf{I} & \mathbf{G}_{L,N(L)} & \end{bmatrix},$$

где

$$\mathbf{F}_{lj} = \mathbf{Q}_0 - (\lambda + j\mu + c(l)\beta)\mathbf{I}, \quad \mathbf{G}_{lj} = \mathbf{Q} - (\lambda + j\mu + c(l)\beta)\mathbf{I}, \quad j \neq N(l),$$

$$\mathbf{F}_{lN(l)} = \mathbf{Q}_0 - (N(l)\mu + c(l)\beta)\mathbf{I}, \quad \mathbf{G}_{lN(l)} = \mathbf{Q} - (N(l)\mu + c(l)\beta)\mathbf{I},$$

а внедиагональные блоки матрицы \mathbf{A} являются блочными диагональными прямоугольными матрицами:

$$\mathbf{M}_l = \text{diag}(c(l)\beta\mathbf{I}, \dots, c(l)\beta\mathbf{I}), \quad \Lambda_l = \text{diag}(\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_1). \quad (2)$$

Запишем стационарное распределение вероятностей процесса $X(t)$ в векторном виде, согласованном с разбиением (1) матрицы интенсивностей переходов A на блоки: $p = (p_0, p_1, \dots, p_L)$, где $p_l = (p_{l,0}, p_{l,1}, \dots, p_{l,N(L)})$, $0 \leq l \leq L$.

Учитывая специальный вид поддиагональных блоков M_l матрицы A , вектор p можно вычислить с помощью алгоритма, предложенного в [19]. Зная стационарное распределение вероятностей, легко вычислить вероятности блокировок потоковых B_{Π} и эластичных B_{Σ} заявок:

$$B_{\Pi} = \sum_{l=0}^L \mathbf{p}_{l,N(l)} \mathbf{1}, \quad B_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{n=N(l+1)+1}^{N(l)} \mathbf{p}_{l,n} \mathbf{Q}_1 \mathbf{1}.$$

Длительности обслуживания эластичных заявок имеют функцию распределения фазового типа, которая характеризуется 1) стационарным распределением \tilde{p} цепи Маркова, вложенной по моментам поступления эластичных заявок, и 2) матрицей интенсивностей переходов \tilde{A} марковского процесса, обрывающегося в момент ухода рассматриваемой эластичной заявки из системы. Поэтому зная стационарное распределение \tilde{p} и матрицу \tilde{A} , нетрудно вычислить моменты длительностей обслуживания эластичных заявок. Зная стационарное распределение p процесса $X(t)$, стационарное распределение \tilde{p} цепи Маркова, вложенной по моментам времени, образующим марковский поток событий, можно найти по известным формулам [17], а матрица \tilde{A} получается из матрицы A вычеркиванием первого блочного столбца, первой блочной строки, и умножением в формуле (2) коэффициента $c(l)$ на множитель $(1 - \frac{1}{l})$.

5. Заключение

Построенная в настоящей работе математическая модель позволяет исследовать распределение радиоресурсов в соте сети LTE, обслуживающей трафик телефонии и межмашинного взаимодействия, в предположении, что ресурсы для пропуска трафика межмашинного взаимодействия выделяются диапазонами фиксированного размера, а поступление запросов на его передачу описывается с помощью марковского входящего потока.

Литература

1. *Vermesan O. et al.* Internet of Things Strategic Research Roadmap. — 2011. — Accessed 30 Oct. 2016. http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf, accessed 30 Oct. 2016.
2. International Telecommunication Union. — 2005.
3. *Guibene W., Nolan K. E., Kelly M. Y.* Survey on Clean Slate Cellular-IoT Standard Proposals // 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology. IEEE Computer Society. — 2015. — Pp. 1596–1599.
4. *Cheng M., Lin G., Wei H.* Overload Control for Machine-Type-Communications in LTE-advanced System // IEEE Communications Magazine. — 2012. — Vol. 50(6). — Pp. 38–45.
5. Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks / C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, Y. Y. Xiao-Hu You, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, F. Hepsaydir // IEEE Communications Magazine. — 2014. — Vol. 52(2). — Pp. 122–130.
6. Influence of M2M Communication on the Physical Resource Utilization of LTE / C. Ide, B. Dusza, M. Putzke, C. Müller, C. Wietfeld // Proc. of the 11th Wireless Telecommunications Symposium (WTS 2012). London. — 2012. — Pp. 1–6.

7. *Lien S.-Y., Chen K.-C.* Massive Access Management for QoS Guarantees in 3GPP Machine-to-Machine Communications // IEEE Communications Magazine. — IEEE Communications Letters. — Vol. 15(3). — P. 2011.
8. Radio Resource Allocation in LTE-Advanced Cellular Networks with M2M Communications / K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang, M. Dohler // IEEE Communications Magazine. — 2012. — Vol. 50(7). — Pp. 184–192.
9. *Кучерявый А. Е., Футахи А., Кучерявый Е. А.* LTE и беспроводные сенсорные сети // Мобильные телекоммуникации. — 2012. — С. 38–41.
10. Analyzing the Overload of 3GPP LTE System by Diverse Classes of Connected-Mode M2M Devices / O. Dementev, O. Galinina, M. Gerasimenko, T. Tirronen, J. Torsner, S. Andreev, Y. Koucheryavy // Proc. of the IEEE World Forum on Internet of Things. — 2014. — Pp. 309–312.
11. *Бутурлин И. А., Гайдамака Ю. В., Самуилов А. К.* О задачах максимизации функции полезности для двух алгоритмов межуровневой оптимизации в сети OFDM // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. — 2012. — № 7. — С. 30–32.
12. *Beale M.* Future Challenges in Efficiently Supporting M2M in the LTE Standards // Proceedings of the 10th Wireless Communications and Networking Conference WCNCW 2012. — Paris: 2012. — Pp. 186–190.
13. *Shin S. Y., Triwicaksono D.* Radio Resource Control Scheme for Machine-to-Machine Communication in LTE Infrastructure // Proc. of the 3rd International Conference on ICT Convergence ICTC 2012. — Jeju Island, Korea: 2012. — Pp. 1–6.
14. *Бутурлин И. А., Гудкова И. А., Чукарич А. В.* Модель распределения радиоресурсов с фиксированным диапазоном для трафика межмашинного взаимодействия в сети LTE // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. — 2014. — № 8. — С. 14–18.
15. *Башарин Г. П., Штатнов С. В.* Мультисервисная модель обслуживания эластичного трафика с конечным числом источников // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. — 2010. — № 7. — С. 4–7.
16. *Яшков С. Ф.* Математические вопросы теории систем обслуживания с разделением процессора // Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика». — 1990. — Т. 29. — С. 3–82.
17. *Basharin G. P. and Naumov V. A.* Simple Matrix Description of Peaked and Smooth Traffic and its Applications // Proc. of the 3 Int. Seminar on Teletraffic Theory “Fundamentals of Teletraffic Theory”. — Moscow: VINITI, 1984. — Pp. 38–44.
18. *Наумов В. А.* Марковские модели потоков требований // Сб. «Системы массового обслуживания и информатика». — Москва: Изд-во УДН, 1987. — С. 67–73.
19. *Naumov V. A., Basharin G. P.* Lösungsmethoden für lineare algebraische Gleichungssysteme stationärer charakteristiken // Handbuch der Bedienungstheorie, I. — Berlin: Akademie-Verlag, 1983. — Pp. 387–430.

UDC 621.39

Multiservice Queuing System with Elastic and Streaming Flows and Markovian Arrival Process for Modelling LTE Cell with M2M Traffic

V. M. Vishnevsky*, K. E. Samouylov[†], V. A. Naumov[†],
N. V. Yarkina[‡]

* V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[†] RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia), Moscow, Russia

[‡] Service Innovation Research Institute (PIKE), Helsinki, Finland

Internet of Things (IoT) is thought to become the *third wave* of the Internet and to bring important changes into both technological and business aspects of telecommunications. However,

for this to happen, an infrastructure should be developed in order to provide network access and management functions to millions, if not billions of IoT-enabled devices. LTE networks could play the key role in the IoT communications landscape, provided that their capabilities are enhanced to efficiently support IoT devices and provide massive machine-to-machine connections without hampering human-to-human communications. Our paper addresses resource allocation in an LTE cell with both human-to-human and machine-to-machine connections. The cell is modeled as a multiservice queuing system with streaming and elastic jobs flows. Resources for machine-to-machine connections are allocated in batches of fixed size; requests for them arrive according to a Markovian arrival process. We obtain the stationary probability distribution of the system and formulas for request blocking probabilities.

Key words and phrases: LTE, Internet of Things, multiservice queuing system, Markovian arrival process, MAP

References

1. O. Vermesan, et al., Internet of things strategic research roadmap, accessed 30 Oct. 2016 (2011).
URL http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf
2. International Telecommunication Union (November 2005).
3. W. Guibene, K. E. Nolan, M. Y. Kelly, Survey on Clean Slate Cellular-IoT Standard Proposals, in: 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology. IEEE Computer Society, 2015, pp. 1596–1599.
4. M. Cheng, G. Lin, H. Wei, Overload Control for Machine-Type-Communications in LTE-advanced System, IEEE Communications Magazine 50(6) (2012) 38–45.
5. C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, Y. Y. Xiao-Hu You, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, F. Hepsaydir, Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks, IEEE Communications Magazine 52(2) (2014) 122–130.
6. C. Ide, B. Dusza, M. Putzke, C. Müller, C. Wietfeld, Influence of M2M Communication on the Physical Resource Utilization of LTE, in: Proc. of the 11th Wireless Telecommunications Symposium (WTS 2012). London, 2012, pp. 1–6.
7. S.-Y. Lien, K.-C. Chen, Massive Access Management for QoS Guarantees in 3GPP Machine-to-Machine Communications, IEEE Communications Magazine 15(3) (IEEE Communications Letters) 2011.
8. 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.
9. A. E. Koucheryavy, A. Futahi, E. A. Koucheryavy, LTE and Wireless Sensor Networks, Mobile Telecommunications (2012) 38–41In Russian.
10. O. Dementev, O. Galinina, M. Gerasimenko, T. Tirronen, J. Torsner, S. Andreev, Y. Koucheryavy, Analyzing the Overload of 3GPP LTE System by Diverse Classes of Connected-Mode M2M Devices, in: Proc. of the IEEE World Forum on Internet of Things, 2014, pp. 309–312.
11. I. A. Buturlin, Y. V. Gaidamaka, A. K. Samouylov, Utility Function Maximization Problems for Two Cross-Layer Optimization Algorithms in OFDM Wireless Networks, T-Comm – Telecommunications and Transport (7) (2012) 30–32, in Russian.
12. 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, 2012, pp. 186–190.
13. S. Y. Shin, D. Triwicaksono, Radio Resource Control Scheme for Machine-to-Machine Communication in LTE Infrastructure, in: Proc. of the 3rd International Conference on ICT Convergence ICTC 2012, Jeju Island, Korea, 2012, pp. 1–6.
14. I. A. Buturlin, I. A. Gudkova, A. V. Chukarin, On Radio Resource Allocation Scheme Model with Fixed Capacities for Machine Type Communications in LTE Network, T-Comm – Telecommunications and Transport (8) (2014) 14–18, in Russian.

15. G. P. Basharin, S. V. Shtatnov, Multiservice Model for Elastic Traffic with Finite Number of Sources, T-Comm – Telecommunications and Transport (7) (2010) 4–7, in Russian.
16. S. F. Yashkov, Mathematical Problems of the Theory of Processor-Sharing Queues, Review of Science and Technology (Itogi nauki i techniki), Series “Probability theory. Mathematical statistics. Technical Cybernetics” 29 (1990) 3–82, in Russian.
17. V. A. Basharin, G. P. and Naumov, Simple Matrix Description of Peaked and Smooth Traffic and its Applications, in: Proc. of the 3 Int. Seminar on Teletraffic Theory “Fundamentals of Teletraffic Theory”, VINITI, Moscow, 1984, pp. 38–44.
18. V. A. Naumov, Markovian Models of Jobs Flows, UDN Publisher, Moscow, 1987, pp. 67–73, in Russian.
19. V. A. Naoumov, G. P. Basharin, Lösungsmethoden für lineare algebraische Gleichungssysteme stationärer charakteristiken, Akademie-Verlag, Berlin, 1983, pp. 387–430.

© Вишневский В. М., Самуйлов К. Е., Наумов В. А., Яркина Н. В., 2016