

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛАСТИЧНОГО ТРАФИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА СОТЫ СЕТИ LTE

Асирян Валерий Мишевич, 4 научная рота войсковой части 36360
(Главное управление Генерального штаба ВС РФ)

Аннотация. В работе рассматриваются сети четвертого поколения на основе беспроводной технологии LTE, их современное состояние и особенности построения. Описываются две математические модели обслуживания заявок при передаче эластичного трафика данных: с ограничением доступа по числу абонентов и без ограничений, которые используются для оценки требуемой скорости линии связи и ресурса соты сети LTE. Приводятся алгоритмы распределения канального ресурса для модели соты сети LTE, и устанавливаются основные соотношения между характеристиками обслуживания.

Ключевые слова: 4G, LTE, эластичный трафик, сотовая связь, качество услуг связи, распределение канального ресурса.

APPLICATION OF ELASTIC DATA TRAFFIC SERVICE MODELS FOR THE ASSESSMENT OF RESOURCE FOR OF THE LTE NETWORK MODEL CELL

Asiryan Valery Mishevich, 4 scientific company of the military unit 36360 (GU GSH)

Abstract. The paper reviews fourth-generation networks based on LTE wireless technology, its current state and construction features. Two mathematical models of requests service during the transmission of elastic data traffic are described: with limited access by number of connections and without limitations, which are used to estimate the required link speed and LTE cell resource. Algorithms of channel resource allocation for the cell model of the LTE network are given, and the basic relations between the service characteristics are established.

Keywords: 4G, LTE, elastic data traffic, cellular network, quality of communication services, distribution of channel resource.

Активное развитие различных технологий связи, как фиксированной, так и мобильной тесно связано с внедрением практически во все сферы человеческой жизни современных информационных технологий, наиболее важными из которых являются Интернет и сети подвижной сотовой связи. На сегодняшний день практически любой человек может работать, общаться, обмениваться данными, дистанционно получать образование посредством созданных технологий и, что самое главное, делать это на высокой скорости в очень хорошем качестве.

Одним из перспективных вариантов обеспечения пользователей услуг связи высокоскоростным доступом в Интернет является построение сетей сотовой подвижной связи четвертого поколения (4G). Наиболее подходящим стандартом 4G является технология беспроводного доступа LTE, которая активно внедряется и российскими операторами. Главными преимуществами технологии являются высокая скорость и устойчивость соединения, возможность предоставления более широкого спектра услуг по более низкой цене, повышение гибкости сети и использование уже существующих систем мобильной связи.

На сегодняшний день большая часть трафика данных в сетях сотовой подвижной связи обладает свойством эластичности, и важной задачей является распределение канального ресурса. Динамическое изменение скорости пересылки информации позволяет оператору повысить эффективность использования сетевой инфраструктуры, но в это же время ставит задачу теоретического обоснования принципов оптимального распределения ресурса передачи информации. Несомненным преимуществом LTE по сравнению с предыдущими технологиями является то, что в ней реализовано гибкое распределение ресурса передачи информации. Таким образом, разработка модели и алгоритмов распределения канального ресурса является актуальной задачей, которая играет ключевую роль в развитии современных сетей передачи данных.

1. Современное состояние и особенности построения сетей 4G LTE

В настоящее время одним из самых перспективных и распространенных видов мобильной связи является сотовая связь. Помимо голосовой связи, компании-операторы предоставляют достаточно широкий спектр дополнительных услуг: доступ в интернет, возможность видеозвонков и видеоконференций, определитель номера, автоответчик и многие другие виды услуг, необходимых современному человеку. На сегодняшний день лидером рынка являются 4G LTE сети, которые с каждым годом все больше и больше расширяют зону покрытия, а во многих ведущих странах охват территории достигает до 90% [1]. Согласно данным на февраль 2018 года, Россия занимает 73-е место (65,08%) в рейтинге стран по охвату территории сетями 4G LTE.

В структуре сети LTE (рис. 1) можно выделить три основные части [2]: абонентское оборудование (User Equipment – UE), сеть радиодоступа (базовые станции – eNodeB, используемые для распределения ресурса сот) и ядро сети (Evolved Packet Core: MME, SGW). Задача базовой станции состоит в выделении ресурса передачи информации абонентам сети, подключенным к соте. Радиус действия базовой станции LTE зависит от мощности излучения и теоретически не ограничен, а максимальная скорость передачи данных зависит от радиочастоты и удалённости от базовой станции. Теоретический предел для скорости в 1 Мбит/с – от 3,2 км (2600 МГц) до 19,7 км (450 МГц). Большинство российских операторов работают в диапазонах 2600 МГц, 1800 МГц и 800 МГц. Базовые станции диапазона 800 МГц способны обеспечить такую скорость на расстоянии до 13,4 км. Тем не менее, диапазон 1800 МГц – наиболее используемый в мире, поскольку он сочетает в себе и высокую емкость, и относительно большой радиус действия – 6,8 км.

Обслуживающий шлюз сети LTE – SGW (Serving Gateway) предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных, поступающих из или в подсистему базовых станций. При этом SGW имеет прямое соединение с сетями 2G и 3G оператора связи, что упрощает передачу соединения в случаях ухудшения зоны покрытия или перегрузок. В свою очередь, узел управления мобильностью сети сотовой связи стандарта LTE – MME (Mobility Management Entity) предназначен для обработки сигнализации, преимущественно связанной с управлением мобильностью абонентов в сети.

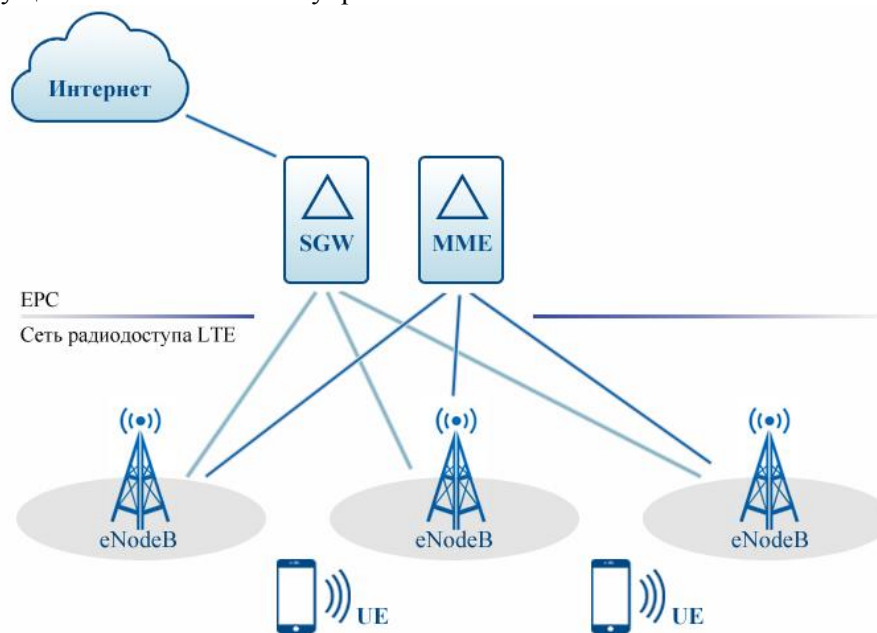


Рисунок 1. Структура сети LTE

Сеть 4G LTE позволяет обеспечить теоретическую пиковую скорость передачи данных до 326,4 Мбит/с от базовой станции к абоненту и до 172,8 Мбит/с в обратном направлении, в то время как сети второго поколения (2G) способны обеспечить пиковую скорость передачи 56-114 кбит/с, используя технологию GPRS, а с помощью EDGE – до 473,6 кбит/с, а сети третьего поколения (3G) обеспечивают скорость передачи данных до 3,6 Мбит/с [3].

Физический уровень сетей LTE основан на технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Division) [4, с. 64], которая предполагает передачу широкополосных сигналов посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих, расположенных с определенным шагом по частоте. Между тем, применение технологии OFDM в нисходящем и восходящем каналах различно (табл. 1). В нисходящем канале данная

технология используется не только для передачи сигнала, но и для организации множественного доступа – OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Технология OFDM в сочетании с модуляцией более высокого порядка (до 64QAM), большей пропускной способностью (до 20 МГц) и пространственным мультиплексированием в нисходящей линии связи (до 4x4), позволяет достичь высоких скоростей передачи данных. Применение технологии OFDM в сочетании с циклическим префиксом делает связь устойчивой к временной дисперсии параметров радиоканала, в результате на приемной стороне не требуется применение сложного эквалайзера и значительно упрощается организация нисходящего канала.

В восходящем канале применяется технология мультиплексирования с частотным разделением, с передачей на одной несущей SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). При использовании данной технологии обеспечивается меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности по сравнению с обычной модуляцией OFDM. В результате повышается энергетическая эффективность абонентских устройств и значительно упрощается их конструкция. Структура SC-FDMA-сигнала во многом аналогична технологии OFDM: также используется композитный сигнал – модуляция множества поднесущих, расположенных с определенным шагом по частоте. Принципиальное отличие заключается в том, что все поднесущие модулируются одинаково, то есть единовременно передается только один модуляционный символ (рис. 2).

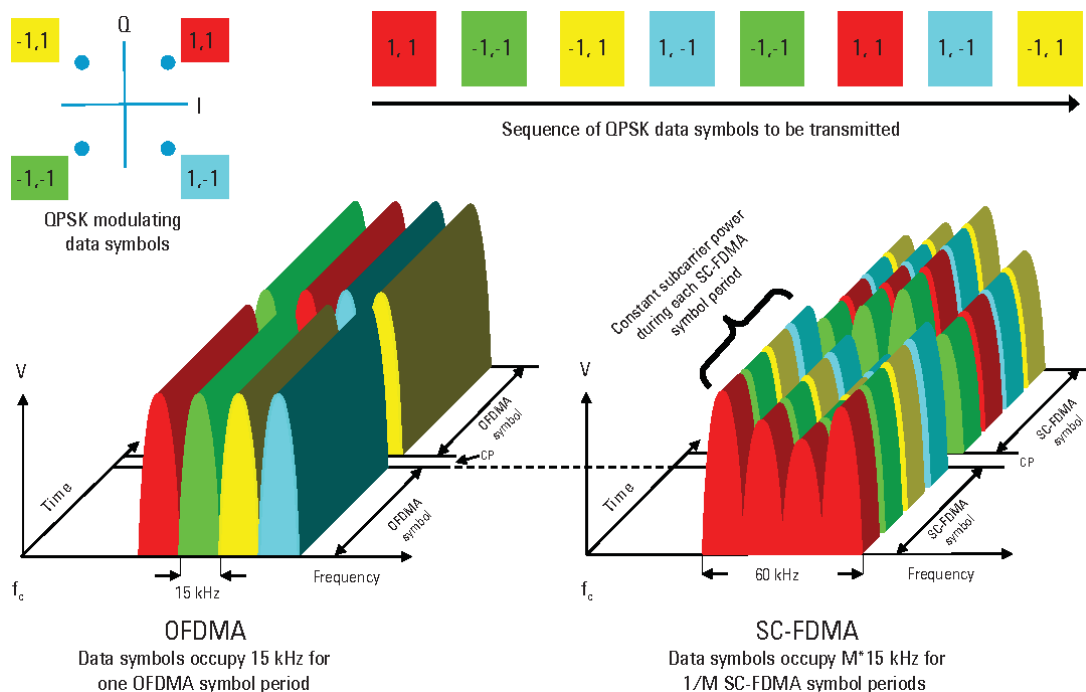


Рисунок 2. Различие между OFDMA и SC-FDMA при передаче последовательности QPSK-символов

Таблица 1. Основные характеристики технологии LTE

Характеристика		Значение
Полоса частот, МГц		1,4; 3; 5; 10; 15; 20
Метод многостанционного доступа	Нисходящий канал	OFDMA
	Восходящий канал	SC-FDMA
Символьная скорость		14000 символов/с
Информационная единица в канале		Ресурсный блок
Количество поднесущих на ресурсный блок (занимаемая ресурсным блоком полоса)		12 (180 кГц)
Стандартный шаг между поднесущими, кГц (нисходящий канал)		15
Длительность радиокадра, мс		10
Модуляция сигнала		QPSK/16QAM/64QAM

2. Особенности передачи эластичного трафика

В ходе стремительного технологического прогресса в области связи в конце двадцатого века появление сетей различных типов привело к появлению множества классов сетевого трафика. В свою очередь, эти классы имеют существенные различия в характеристиках, объеме необходимых сетевых ресурсов и требованиях к качеству обслуживания. Среди них можно выделить две наиболее крупные категории трафика: потоковый (streaming traffic, real-time traffic) и эластичный (elastic traffic, data traffic). Как известно, изначально преобладало изучение потокового трафика, порождаемого передачей речи. Между тем, в начале двухтысячных более важным и перспективным в изучении типом трафика стал именно эластичный трафик, порождаемый различными интерактивными приложениями: электронной почтой, передачей файлов и др., где требования к задержкам значительно ниже, чем в случае потокового трафика, а потому доступно изменение скорости его передачи [5, с. 19].

Для модели с ожиданием анализ трафика происходит на уровне обслуживания с ожиданием отдельных пакетов различных сервисов. В случае модели с разделением ресурса трафик рассматривается на уровне пересылки с переменной скоростью отдельных информационных потоков, относящихся к одному коммуникационному приложению. Трафик, описанный выше, появляется при серфинге в интернете, загрузке различных файлов, при использовании электронной почты и многих других интернет-приложений. Для передачи такого трафика по сети может быть выделен весь трафик, оставшийся свободным после использования трафика реального времени. Часто ресурс передачи делят поровну между всеми заявками, ожидающими обслуживания, но существуют и другие методы распределения ресурса передачи.

Динамический способ разделения канального ресурса позволяет резко повысить его эффективность. Особенно важным это является для сетей сотовой подвижной связи из-за ограниченности диапазона радиочастот, выделенных для конкретного радиоканала.

3. Модель анализируемой соты сети LTE

Как известно, с развитием технологий как фиксированной, так и мобильной связи усиливается конкуренция среди компаний-производителей телекоммуникационного оборудования и операторов связи. Объясняется это тем, что в нынешних реалиях важно не только привлекать новых абонентов, но и сохранять существующих. Немаловажную роль в этом вопросе играет качество передачи данных, поскольку объем используемого трафика постоянно растет. Обмен данными, обладающими свойством эластичности, имеет некоторые особенности, которые необходимо учитывать при проектировании сотовых сетей, настройке механизма получения заявок, а также, что является наиболее важным, распределении ресурса передачи данных.

В данной статье объектом исследования является сота сети мобильной связи стандарта LTE, представленная на рис. 3.

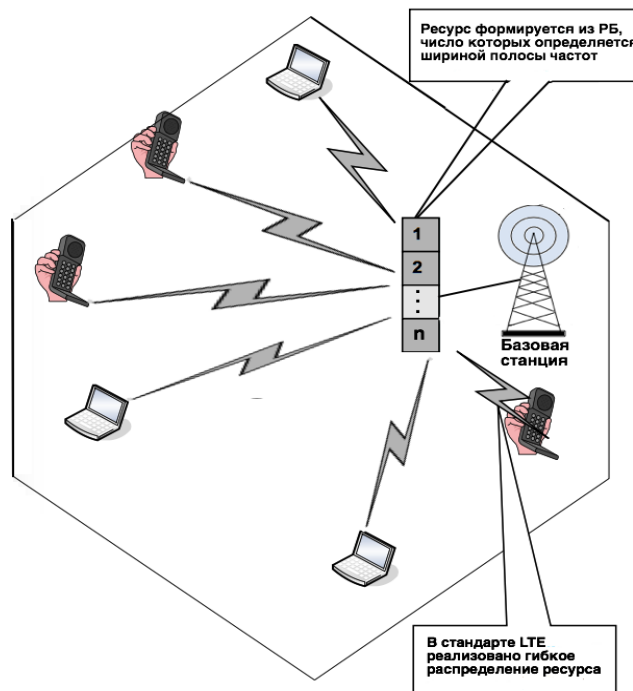


Рисунок 3. Соты сети LTE

Важнейшей особенностью сети LTE является масштабируемость занимаемого ей частотного спектра [6, с. 3]. Согласно характеристикам, представленным в таблице 1, базовая станция LTE может выделять полосы частот 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц. Наименьшим ресурсом, выделяемым пользователю сети планировщиком базовой станции в частотно-временной области, является ресурсный блок (РБ), состоящий из 12 поднесущих в частотной области и 7 OFDM-символов во временной длительностью 0,5 мс. Полоса частот для всего передаваемого РБ равна 180 кГц. При этом число ресурсных блоков варьируется в зависимости от полосы передачи конкретного примера сети LTE (табл. 2).

Таблица 2. Соотношение между шириной полосы частот сети LTE, числом поднесущих и числом ресурсных блоков

Полоса частот, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число РБ	6	15	25	50	75	100

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-, 16- и 64-позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Следовательно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит. При стандартном префиксе символьная скорость составит 14000 символов/с, что соответствует агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Например, как видно из таблицы 2, сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков, что составляет 1200 поднесущих и дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с.

Главной особенностью LTE, как и других перспективных стандартов сотовой подвижной связи, является возможность динамического перераспределения ресурса передачи информации между абонентами, находящимися на обслуживании. Это позволяет существенно ускорить передачу эластичного трафика в ситуации, когда в сети появляется свободный ресурс. В сетях сотовой подвижной связи эту функцию реализует диспетчер пакетов, анализ работы которого имеет большое практическое значение. Таким образом, актуальность темы проведенного исследования определяется необходимостью более эффективного использования ресурса систем сотовой подвижной связи с целью повышения качества обслуживания абонентов.

Для построения математической модели распределения ресурса предположим, что поступление заявок подчиняется закону Пуассона с интенсивностью λ [7, с. 673]. В процессе обслуживания заявки происходит передача цифрового файла. Предполагается, что его объем имеет экспоненциальное распределение со средним значением F , выраженным в битах. Из описанного предположения следует, что время обслуживания заявки Δt всем ресурсом линии также имеет экспоненциальное распределение со средним значением

$$\Delta t = F/C,$$

где C – скорость линии, выраженная в битах в секунду. Если значение $\Delta t \rightarrow \infty$, то исследуемый алгоритм распределения ресурса передачи сводится к модели М/М/1. Если же значение $\Delta t \rightarrow 0$, то получаем так называемую модель разделения процессора (Processor Sharing – PS), обозначаемую как М/М/1 – PS. При использовании данной процедуры разделения ресурса все имеющиеся заявки получают равные порции передаточных возможностей базовой станции. Фактически в системе нет ожидающих заявок, поскольку для всех из них выполняется передача данных с интенсивностью, обратно пропорциональной общему числу имеющихся заявок. Математическое исследование анализируемого процесса впервые было выполнено в 1967 году Л. Клейнроком [8]. Данная модель распределения ресурса допускает простое аналитическое описание, которое приводится в работе [9, с. 77].

4. Модель с ограничением доступа по числу абонентов

В случаях, когда сеть перегружена, разделение ресурса в режиме PS приводит к значительному уменьшению скорости передачи, выделяемой каждому активному пользователю. Это увеличивает время пересылки данных и отрицательно сказывается на показателях качества работы сети. Для устранения отмеченных трудностей необходимо ограничить доступ абонентов к каналу связи. В системах с динамическим распределением ресурса используются несколько механизмов, направленных на решение этой задачи. Самый простой из них – ограничение по числу одновременно обслуживаемых абонентов. Обозначим это ограничение через u . Выбор значения и определяется техническими условиями обслуживания поступающих заявок.

Приведём два примера, иллюстрирующие причины появления подобных ограничений:

- 1) из-за нехватки компонентов системы связи, участвующих в установлении соединения (например, в системах беспроводного множественного доступа с кодовым разделением каналов подобным ограничением является число используемых кодов);
- 2) из-за необходимости предоставить каждому пользователю пропускную способность не менее заданной величины C_0 .

Математическое описание модели в целом следует описанию традиционной модели M/M/1 – PS, поэтому приведём его с сокращением. Время обслуживания заявки всем ресурсом линии имеет экспоненциальное распределение со средним значением

$$\Delta t = 1/\mu,$$

выраженным в секундах. Обозначим через $i(t)$ число заявок, находящихся на обслуживании в момент времени t . Динамика изменения состояний задается марковским процессом $r(t) = i(t)$, определенном на конечном пространстве состояний $S = \{i, i = 0, 1, \dots, u\}$, где i – число заявок, находящихся в системе.

Диаграмма переходов $r(t)$ показана на рис. 4.

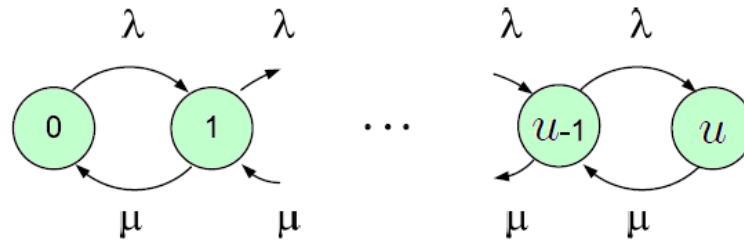


Рисунок 4. Диаграмма переходов случайного процесса $r(t)$, описывающего динамику изменений состояний модели M/M/1 – PS с ограничением доступа по числу абонентов

Интенсивность предложенного трафика определяется из соотношения $\beta = \lambda F$ и выражается в битах в секунду. Обозначим $\rho = \beta/C$ коэффициент потенциальной загрузки линии. Из диаграммы, показанной на рис. 4, получим рекурсивные формулы, связывающие значения стационарных вероятностей модели:

$$p(i)\rho = p(i+1), \quad i = 0, 1, \dots, u-1. \quad (1)$$

Заметим, что стационарный режим существует для всех $\rho > 0$. Воспользовавшись приведенным равенством (1) и условием нормировки, получим аналитические выражения для оценки $p(i)$:

$$p(i) = \begin{cases} \frac{(1-\rho)\rho^i}{1-\rho^{u+1}}, & \rho \neq 1 \\ \frac{1}{u+1}, & \rho = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Обозначим через π долю потерянных заявок. Для других параметров и характеристик обслуживания поступающих заявок сохраним те же обозначения, что были использованы для модели M/M/1 – PS с неограниченным доступом [9, с. 78]. Для начала приведем расчетные выражения для основных показателей обслуживания заявок в случае, когда $\rho \neq 1$. После несложных преобразований получаем следующие соотношения:

$$\pi = p(u) = \frac{(1-\rho)\rho^u}{1-\rho^{u+1}}, \quad (3)$$

$$L = \sum_{i=1}^u p(i)i = p(0)\rho(1 + 2\rho + 3\rho^2 + \dots + u\rho^{u-1}) = \quad (4)$$

$$= \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(u+1)\rho^{u+1}}{1-\rho^{u+1}} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(u+1)\rho^u + u\rho^{u+1}}{1-\rho^{u+1}},$$

$$W = \frac{L}{\lambda(1-\pi)} = \frac{FL}{\rho C(1-\pi)} = \frac{F}{C(1-\rho)} \frac{1 - (u+1)\rho^u + u\rho^{u+1}}{1-\rho^u}, \quad (5)$$

$$\vartheta = \frac{F}{W} = C(1-\rho) \frac{1-\rho^u}{1-(u+1)\rho^u + u\rho^{u+1}}. \quad (6)$$

Перечисленные выше характеристики (4-6) можно также выразить через значение π , для этого необходимо воспользоваться тождеством (3). В итоге получаем следующие равенства:

$$L = \frac{\rho}{1-\rho} (1-(u+1)\pi), \quad (7)$$

$$W = \frac{F}{C(1-\rho)} \frac{1-(u+1)\pi}{1-\pi}, \quad (8)$$

$$\vartheta = C(1-\rho) \frac{1-\pi}{1-(u+1)\pi}. \quad (9)$$

Установим также выражения для расчета характеристик при $\rho=1$:

$$\pi = \frac{1}{1+u}, \quad L = \frac{u}{2}, \quad W = \frac{F(u+1)}{2C}, \quad \vartheta = \frac{2C}{u+1}. \quad (10)$$

5. Постановка задачи и метод ее решения

Построенная аналитическая модель в предыдущем разделе статьи дает возможность решить важную задачу оценки требуемой скорости линии передачи эластичного трафика данных для двух моделей разделения процессора: без ограничений ⁽¹⁾ и с ограничением доступа по числу абонентов ⁽²⁾. Ресурс передачи распределен между абонентами в равной степени, при этом необходимо найти минимальное значение скорости линии C_{\min} , для которой среднее время передачи эластичного трафика W (файлов с заданными величинами среднего объема данных F и интенсивности поступления заявок λ) не будет больше заданного значения W_{norm} .

Функциональная модель системы с динамическим распределением ресурса передачи и ограничением доступа по числу абонентов показана на рисунке ниже.

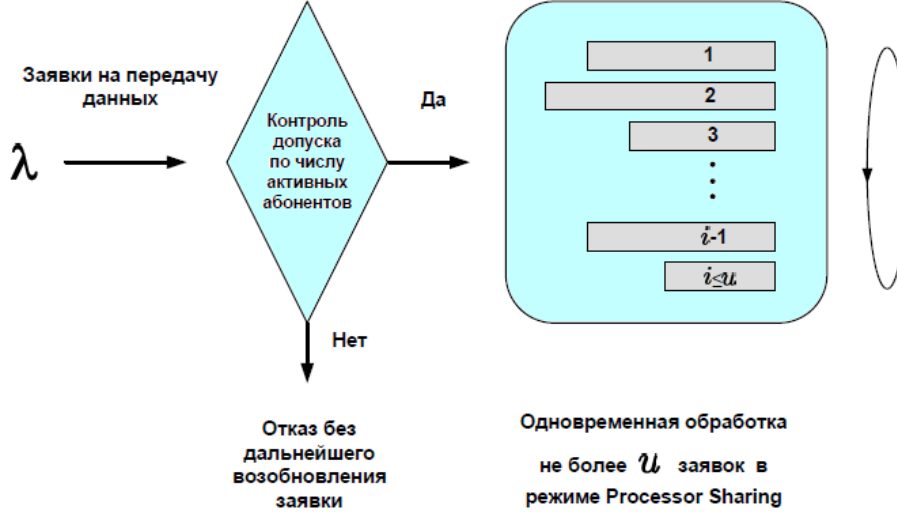


Рисунок 5. Распределение скорости линии, работающей в режиме при наличии ограничения по числу обслуживаемых абонентов

Для решения поставленной задачи относительно двух рассматриваемых моделей воспользуемся полученными формулами для оценки W и запишем их в следующем виде:

$$W^{(1)} = \frac{F}{C - \lambda F}, \quad (11)$$

$$W^{(2)} = \begin{cases} \frac{F}{C - \lambda F} \frac{1-(u+1)\pi}{1-\pi}, & \rho \neq 1 \\ \frac{F(u+1)}{2C}, & \rho = 1. \end{cases} \quad (12)$$

При этом искомое значение C_{\min} соответствует следующему значению

$$C_{\min} = \min\{C : W < W_{\text{norm}}\}. \quad (13)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере следующих значений входных параметров [10]: $F = 20$ Мбит (например, фотоснимок), $\lambda = 1$ файл/с, $u = 25$; $\pi = 0,01$, $W_{\text{norm}} = 3$ с. На основе полученных формул (11, 12) и входных параметров построим зависимости среднего времени передачи файла W от скорости линии C для двух рассматриваемых моделей (рис. 6).

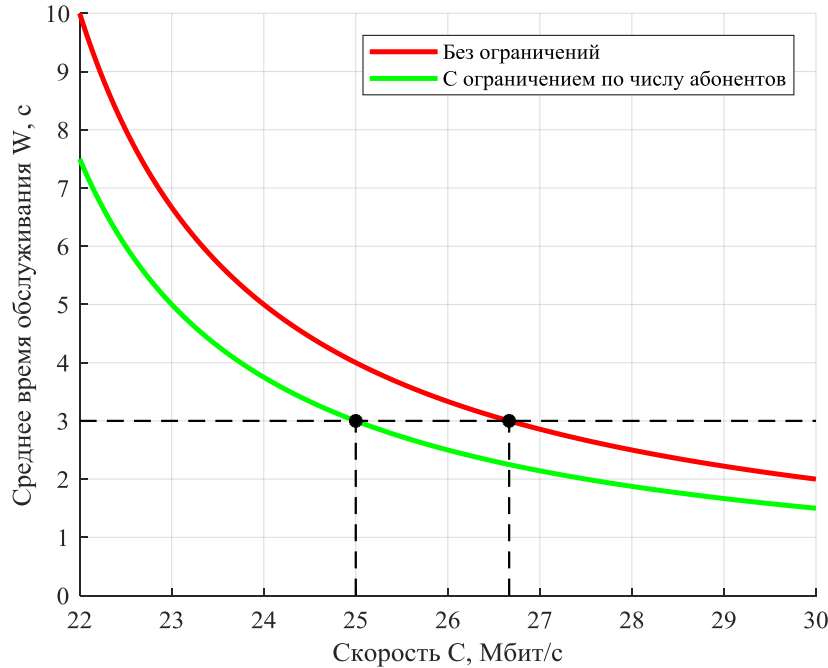


Рисунок 6. Зависимости среднего времени передачи файла W от скорости линии C

Используя полученные зависимости (рис. 6), определим минимальные значения скорости линии C_{\min} для двух рассматриваемых моделей (13). По найденным скоростям при известных минимальной и максимальной агрегатных скоростях: 33,6 Мбит/с и 100,8 Мбит/с для сигнала с шириной полосы пропускания 20 МГц определим необходимое число ресурсных блоков и диапазоны частот. Результаты расчетов удобно представить в виде соответствующей таблицы (табл. 3).

Таблица 3. Результаты расчета ресурса соты сети LTE для двух рассматриваемых моделей обслуживания

Модель	C_{\min} , Мбит/с	Число РБ	Диапазон частот, МГц
Без ограничений	26,7	27 – 80	5,4 – 16
С ограничением	25,0	25 – 75	5 – 15

Приведенный численный пример показывает возможность использования рассмотренных моделей обслуживания линии передачи эластичного трафика данных и разработанных для них алгоритмов при решении практических задач распределения канального ресурса.

Таким образом, основные результаты работы состоят в следующем:

1. Выполнен анализ особенностей построения сетей подвижной связи стандарта LTE, который дал основание для разработки методов оценки характеристик передачи эластичного трафика данных.
2. Разработаны модели динамического распределения ресурса при передаче эластичного трафика данных: без ограничений и с ограничением доступа по числу абонентов.
3. На конкретном численном примере сформированы рекомендации по использованию рассмотренных моделей и алгоритмов. При исследовании моделей описаны алгоритмы определения основных характеристик и показателей качества обслуживания и их взаимосвязь.

Литература

1. Состояние LTE (Февраль 2018) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://opensignal.com/reports/2018/02/state-of-lte>.
2. Характеристики LTE [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>.
3. LTE (долгосрочное развитие) Мобильная технология связи четвертого поколения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/>.
4. Вишневецкий В., Красилов А., Шахнович И. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. М.: Техносфера, 2009. с. 62-73.
5. Башарин Г.П., Клапоуцак С.Н., Русина Н.В. Мультисервисная модель Эрланга с потоковым трафиком и пороговой стратегией доступа для эластичного трафика // Телекоммуникации и Транспорт, № 7, 2012. с. 19-22.
6. Бабков В.Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE // Санкт-Петербург, 2012. с. – 80.
7. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения // Теория и практика инфокоммуникаций – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. с. – 868.
8. Клейнрок Л. Системы с разделением времени – теоретическая обработка // Журнал ассоциации вычислительной техники, 1967. с. 161-242.
9. Асирян В.М., Шишкин М.О., Степанов М.С. Оценка ресурса соты сети LTE при обслуживании эластичного трафика // Телекоммуникации и информационные технологии. № 1, 2018. с. 76-82.
10. Рекомендация МСЭ-Т E.800. Качество услуг электросвязи: концепции, модели, цели и планирование надежности работы. Термины и определения, связанные с качеством услуг электросвязи. 09.2008.

References

1. The state of LTE (February 2018). Available at: <https://opensignal.com/reports/2018/02/state-of-lte>.
2. LTE specifications. Available at: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>.
3. LTE (Long-Term Evolution) Fourth generation of mobile communication technology. Available at: <http://www.tadviser.ru/>.
4. Vishnevskij V., Krasilov A., Shaxnovich I. LTE cellular communication technology – almost 4G // Electronics: Science, Technology, Business. Moscow Technosphere, 2009. p. 62-73.
5. Basharin G.P., Klapoushhak S.N., Rusina N.V. Erlang multiservice model with streaming traffic and threshold access strategy for elastic data traffic // Telecommunication and transport, № 7, 2012. p. 19-22.
6. Babkov V.Y. Approaches to planning and optimizing LTE networks. Saint-Petersburg, 2012. p. -80.
7. Stepanov S.N. Teletraffic theory: concepts, models, applications // Theory and Practice of Infocommunications – Moscow: Hotline, 2015. p. -868.
8. Kleinrock L. Time shared systems – a theoretical treatment // Journal of the association for computing machinery, 1967. p. 161-242.
9. Asiryan V.M., Shishkin M.O., Stepanov M.S. Assessment of the resource cell of the LTE network during the maintenance of the elastic traffic // Telecommunications and information technologies № 1, 2018. p. 76-82.
10. International Telecommunication Union Recommendation E.800. Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and reliability planning. Terms and definitions related to the quality of telecommunication services. 09.2008.

Контактная информация

Асирян Валерий Мишевич, dmc5mod@yandex.ru, +79162453196