

УДК 621.396.946

## **ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СЕТЕЙ LTE: ФАКТОРЫ, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

**Реут В. Л., магистрант**

*Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Макареня С. Н.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Доклад посвящен анализу пропускной способности сетей LTE (Long Term Evolution) – ключевого показателя, определяющего эффективность передачи данных и качество обслуживания пользователей. Рассмотрены основные понятия теоретической и фактической пропускной способности, влияние параметров радиоканала, конфигурации сети, нагрузки и политики управления ресурсами.

**Цель доклада:** рассмотреть ключевые аспекты понятия пропускной способности в контексте LTE, обозначить основные факторы, влияющие на ее значение, а также проанализировать подходы к оценке пропускной способности мобильных сетей четвертого поколения.

**Ключевые слова:** LTE, пропускная способность, OFDMA, SC-FDMA, ресурсные блоки, MIMO, имитационное моделирование, полные измерения, throughput, радиointерфейс.

В последние годы наблюдается стремительный рост объема мобильного трафика, обусловленный широким распространением смартфонов, развитием мультимедийных сервисов, облачных приложений, а также увеличением числа устройств, подключенных к сети. По данным международных аналитических компаний совокупный мобильный трафик ежегодно увеличивается на десятки процентов, и значительная часть этого роста приходится на сети четвертого поколения (LTE). В данных условиях вопрос оценки и анализа пропускной способности мобильных сетей становится особенно важным как для операторов связи, так и для исследователей, занимающихся оптимизацией радиосетей и разработкой новых технологий передачи данных.

Сети LTE были разработаны как эволюционное развитие стандартов семейства 3GPP и стали основой для формирования высокоскоростной мобильной широкополосной связи. Они обеспечили существенное увеличение скорости передачи данных, снижение задержки

и повышение эффективности использования спектра по сравнению с предыдущими поколениями. Однако, несмотря на заложенный потенциал высокой производительности, фактическая пропускная способность LTE может значительно отличаться от теоретически возможной и зависит от множества факторов.

Под пропускной способностью LTE понимают максимальную скорость передачи данных, которую можно обеспечить в нисходящем или восходящем направлениях при заданных условиях работы сети. Анализ пропускной способности позволяет оценивать эффективность использования радио ресурсов, определять узкие места сети и обосновывать необходимость оптимизации параметров базовых станций.

Для иллюстрации можно привести простой пример: теоретически LTE способна обеспечивать скорость до 150 Мбит/с на прием, однако при практических измерениях абонент чаще сталкивается со значениями порядка 10–40 Мбит/с. Разрыв между теорией и практикой объясняется влиянием множества факторов – от уровня сигнала и загрузки соты до особенностей используемого оборудования и настроек сети.

Пропускная способность в сетях LTE отражает максимальное количество пользовательских данных, которое может быть передано по радиointерфейсу за единицу времени.

Формирование пропускной способности зависит от технических параметров радиointерфейса. В нисходящем канале LTE используется OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), а в восходящем – SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Их описание представлено ниже:

1. OFDMA (DL) делит полосу на множество ортогональных поднесущих, каждая из которых модулируется (QPSK, QAM16, QAM64, QAM256). Это позволяет гибко распределять ресурсы и адаптировать скорость передачи к качеству канала.

2. SC-FDMA (UL) обеспечивает передачу с низким PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), что важно для экономии энергии мобильного устройства. Принцип работы похож на OFDMA, но последовательность поднесущих кодируется как единая цепочка, что снижает требования к мощности передатчика.

Минимальной единицей распределения ресурсов является ресурсный блок (RB) – 12 поднесущих по 15 кГц каждая, рассчитанных на

один тайм-слот длительностью 0,5 мс. Количество RB зависит от ширины полосы частот (например, 6 RB при 1,4 МГц и до 100 RB при 20 МГц). Наглядно проиллюстрировано на рис. 1.

	Ширина канала, МГц					
	1.4	3	5	10	15	20
Количество ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

Рисунок 1 – Количество доступных ресурсных блоков в зависимости от ширины канала

На практическое значение пропускной способности LTE оказывает влияние совокупность технических и эксплуатационных факторов, таких как:

1. Ширина полосы частот и количество ресурсных блоков. Чем больше полоса частот, тем выше потенциальная пропускная способность, так как базовая станция может выделить больше ресурсных блоков (RB) для передачи данных. Например, при ширине 20 МГц доступно до 100 RB, что обеспечивает существенно более высокую скорость по сравнению с 1,4 или 5 МГц.

2. Уровень сигнала и качество радиоканала. Характеристики сигнала напрямую влияют на выбор модуляции и скорости кодирования. Значения RSRP (Reference Signal Received Power) отражают силу сигнала, RSRQ (Reference Signal Received Quality) – его качество, а SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) показывает отношение сигнал/помеха/шум. Чем лучше эти параметры, тем выше может быть скорость передачи данных.

3. Модуляция и скорость кодирования (MCS). Технология LTE использует адаптивный выбор схем модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme). При хорошем качестве канала (измеряется абонентским терминалом) базовой станцией применяется более плотная модуляция (например, QAM256), позволяющая передавать больше бит на символ, а при ухудшении условий сеть переходит на более надежную, но менее скоростную схему, например QPSK.

4. Нагрузка соты и распределение ресурсов между абонентами. Даже при хорошем сигнале скорость абонента может снижаться, если в соте одновременно активны многие пользователи. Базовая станция распределяет ресурсы динамически, и чем больше устройств конкурирует за канал, тем меньше ресурсных блоков выделяется каждому из них.

5. Служебные данные и накладные расходы (overhead). Часть радио ресурсов неизбежно используется для служебных данных: сигналов синхронизации, опорных сигналов и управляющей информации. На них в среднем расходуется до 25–35 % доступной пропускной способности, что снижает долю полезного трафика.

6. Межсотовые помехи и плотность развертывания сети. В городских условиях соседние соты могут работать на перекрывающихся частотах, создавая взаимные помехи. Это приводит к снижению SINR и, как следствие, к выбору менее эффективных схем модуляции и кодирования.

7. Особенности оборудования и параметры сети. Фактическая скорость зависит и от аппаратных возможностей базовой станции и пользовательских устройств, а также от настроек оператора. Ограничения скорости могут быть заданы как на уровне тарифа, так и на уровне профиля обслуживания.

Оценка пропускной способности LTE выполняется в основном с использованием трех основных подходов: теоретического анализа, имитационного моделирования и полевых измерений.

### 1. Теоретическая оценка.

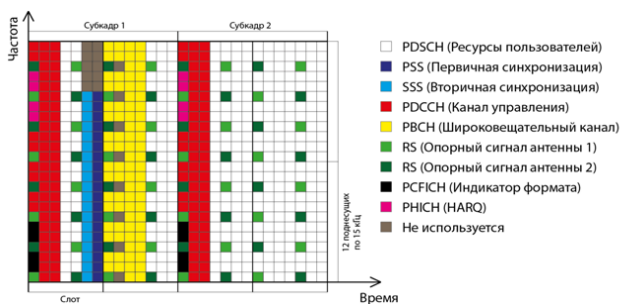


Рисунок 2 – Структура кадра LTE в режиме FDD.  
Физические каналы LTE

Для определения потенциальной скорости передачи данных, например, в нисходящем канале (downlink) LTE сначала вычисляется сколько ресурсных элементов (OFDM-символов) доступно в кадре сети.

Возьмем FDD-режим с полосой 1,4 МГц ( $N_{RB} = 6$ , согласно рис. 2) и коротким циклическим префиксом (CP). Каждый субкадр состоит

из двух слотов, внутри которых может быть в зависимости от времени распространения (радиуса соты) либо 6 при расширенном CP, либо 7 OFDM-символов или ресурсных элементов при коротком CP. Таким образом в одном субкадре, в нашем примере, на каждой поднесущей передается 14 OFDM-символов ( $N_{RE}$ ), а кадр состоит из 10 субкадров по 1 мс ( $N_{SFR} = 10$ ). Минимальная единица выделения ресурсов – ресурсный блок (RB), который содержит 12 поднесущих ( $N_{CF}$ ). Таким образом, общее число OFDM-символов в кадре:

$$N_{SFR} \cdot N_{RE} \cdot N_{CF} \cdot N_{RB},$$

$$10 \cdot 14 \cdot 12 \cdot 6 = 10\ 080.$$

Физические каналы в нисходящем направлении	Назначение	Объем затрачиваемых частотно-временных ресурсов, РЭ/кадр (ресурсный элемент)
<b>PSS – Primary Synchronization Channel</b>	Определение физического идентификатора соты	72
<b>SSS – Primary Synchronization Channel</b>	Определение номера группы идентификатора соты	72
<b>PBCH – Physical Broadcast Channel</b>	В этом канале передается информация о ширине занимаемой полосы, номер кадра, а также конфигурация PHICH	$72 \cdot 4 = 288$
<b>PDCCH – Physical Downlink Control Channel</b>	Основной канал служебной информации. По нему передается большая часть системной информации, данные о распределении ресурсов нисходящего и восходящего каналов между абонентами и т.д.	От $NSFR \cdot NRB \cdot 12$ (min)-NPCFICH-NPHICH до $NSFR \cdot NRB \cdot 12 \cdot 3$ (max)-NPCFICH-NPHICH
<b>RS – Reference Signal</b>	Пилот сигнал. При использовании MIMO каждая антенна передает свои пилот-сигналы	$NSFR \cdot NRB \cdot 4 \cdot NMIMO$
<b>PCFICH – Physical Control Format Indicator Channel</b>	Указывает, сколько OFDM-символов занимает PDCCH (от 1 до 3)	12
<b>PHICH – Physical HARQ Indicator Channel</b>	Передает информацию HARQ	12

Рисунок 3 – Назначение основных каналов управления и объем затрачиваемых на них ресурсов

Из этих символов часть занята служебными каналами (рисунок 3):

- PSS – 72 символа;
- SSS – 72 символа;

- PBCN – 288 символов;
- PDCCH, PCFICH, PHICH и часть RS – 2 160 символов ( $N_{SFR} \cdot N_{RB} \cdot 12 \cdot 3$ );
- остаток опорных сигналов RS – 348 символов (при использовании MIMO 2x2 удваивается).

Итого 2 940 символов из 10 080 занято служебными каналами, что составляет около 29 % ресурсов, а доля полезного трафика – 71 %.

После учета служебных символов, необходимо исключить еще часть ресурсов, занятых циклическим префиксом (~1/14), который не несет полезной информации. Оставшиеся ресурсные элементы умножаются на количество бит на символ (2, 4, 6 или 8 для QPSK, QAM16, QAM64, QAM256). Далее учитывается скорость кодирования – доля бит идет на избыточность для обеспечения помехоустойчивости. При использовании MIMO скорость передачи данных увеличивается пропорционально числу потоков. Эти факторы вместе определяют теоретическую пропускную способность сети.

Используя вышеприведенный метод можно получить скорости передачи данных в нисходящем канале, аналогичные приведенным на рис. 4 и 5 для некоторых схем модуляции и кодирования.

Схема модуляции и кодирования	1,4 МГц	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK 1/2	0,8	2,1	3,5	6,9	10,4	13,9
QPSK 3/4	1,2	3,1	5,2	10,4	15,6	20,9
QPSK	1,6	4,1	7,0	13,9	20,8	27,8
QAM16 1/2	1,6	4,1	7,0	13,9	20,8	27,8
QAM16 3/4	2,6	6,2	10,5	20,8	31,3	41,7
QAM16	3,2	8,2	13,9	27,7	41,7	55,6
QAM64 3/4	3,6	9,2	15,7	28,7	46,9	62,6
QAM64	4,8	12,3	20,1	41,6	62,5	83,4
QAM 64 MIMO 2x2	9,2	23,7	39,7	79,9	120,2	160,4

Рисунок 4 – Скорости передачи данных в нисходящем канале (downlink) LTE при низкой нагрузке на сеть

Схема модуляции и кодирования	1,4 МГц	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK 1/2	0,7	1,7	2,9	5,8	8,7	11,7
QPSK 3/4	1,0	2,6	4,3	8,7	13,1	17,5
QPSK	1,3	3,4	5,8	11,6	17,5	23,4
QAM16 1/2	1,3	3,4	5,8	11,6	17,5	23,4
QAM16 3/4	1,8	5,2	8,7	17,5	26,2	35,0
QAM16	2,7	6,7	11,6	23,3	35,0	46,7
QAM64 3/4	3,0	7,7	13,0	26,2	39,4	52,6
QAM64	4,0	10,3	17,3	34,9	52,5	70,1
QAM 64 MIMO 2x2	7,6	19,6	33,1	66,6	100,1	133,7

Рисунок 5 – Скорости передачи данных в нисходящем канале (downlink) LTE при высокой нагрузке на сеть

## 2. Моделирование и имитационное планирование.

Для более реалистичных оценок используют сценарии:

– Single-Downlink (Single-DL) – один абонент и один нисходящий канал, полезно для анализа MIMO и эффективности распределения ресурсов;

– Single-Cell Multi-User (SC-MU) – вся сота с множеством пользователей, анализируется внутри сотовая загрузка и планирование ресурсных блоков;

– Multi-Cell Multi-User (MC-MU) – несколько сот с множеством пользователей, учитываются межсотовые помехи, реальная загрузка и распределение ресурсов между сотами.

Моделирование позволяет оценить пропускную способность для различных сценариев использования и оптимизировать параметры сети до ее развертывания.

## 3. Полевые измерения.

Наряду с расчетными и имитационными методами проводятся drive-tests – замеры скорости передачи данных на реальных базовых станциях. Эти измерения учитывают реальные условия: интерференцию, нагрузку пользователей, качество сигнала и накладные расходы служебных каналов.

В заключении можно отметить, что полноценная оценка пропускной способности LTE требует сочетания нескольких методов, поскольку только комплексный анализ позволяет выявить реальные ограничения сети и определить пути ее оптимизации. Исследования

в этой области остаются актуальными, так как рост трафика, появление новых сервисов и увеличение количества подключенных устройств продолжают повышать требования к эффективности использования радио ресурсов даже в условиях развития 5G.

УДК 004.83

## **РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОЗДАНИИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО КОНТЕНТА**

**Гомзяков О. А., магистрант**

*Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Макареня С. Н.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В статье рассматривается текущее состояние и перспективы интеграции ИИ в медиаиндустрию, анализируются ИИ-инструменты, которые используются в процессе создания видео, графическом дизайне. Целью работы является исследование влияния ИИ на эффективность и качество производства контента.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, мультимедийный контент, ИИ-инструменты, нейросеть.

Искусственный интеллект (ИИ) – это широкая область компьютерных наук, которая занимается созданием систем, способных имитировать когнитивные функции человека, такие как обучение, рассуждение, восприятие, решение проблем и понимание языка. Проще говоря, это технология, которая позволяет компьютерам «думать» и «учиться».

За все время развития ИИ значительно и комплексно изменялся в сфере производства видео и звука. Он прошел путь от узкоспециализированных инструментов до комплексных, генеративных систем. При этом возникали этические вопросы, технологические проблемы, вопросы безопасности и социальные проблемы.

В данной статье будет рассмотрен период за последние 10 лет, когда ИИ начал стремительно развиваться и совершенствоваться.