

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

А.Е. Рыжков, О. А. Симонина

Обеспечение качественных показателей беспроводной СВЯЗИ

Учебное пособие

СПб ГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Рецензенты

*Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом СПбГУТ*

Рыжков, А.Е., Симонина, О. А.

Обеспечение качественных показателей беспроводной связи : учебное пособие / А.Е. Рыжков, О. А. Симонина ; СПбГУТ. – СПб., 2019. – 80 с.

Написано в соответствии с программой дисциплин «Обеспечение качественных показателей беспроводной связи» и «Обеспечение показателей качества в сетях радиодоступа».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки специалитета 11.05.04 – Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи (Системы специальной спутниковой связи; Системы радиосвязи специального назначения) и бакалавриата 11.03.01 – Радиотехника (Радиосвязь и радиодоступ); 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы подвижной связи; Цифровое телерадиовещание)

© Рыжков А.Е., Симонина О.А., 2019

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2019

Оглавление

Оглавление	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СЕТЯХ СОТОВОЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ	7
1.1 Задача обеспечения качества услуг	7
1.2 Качество обслуживания в сетях 2G	10
1.3 Качество обслуживания в сетях 3G	15
1.4 Качество обслуживания в сетях LTE	19
Параметры, рассчитываемые при оценке качества сети LTE на радиоучастке	23
2. ОРГАНИЗАЦИЯ УСЛУГ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К СЕТЯМ РАДИОДОСТУПА 5 ПОКОЛЕНИЯ (5G)	29
2.1. Передача данных между объектами Интернета вещей	29
2.2. Технология LTE-M	30
2.3. Технология NB-IoT	34
2.4. Расширение сферы услуг на путях перехода к мобильным сетям 5G	46
2.5. Структура сети NR	48
3. МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ	52
3.1 Сертифицированная методика оценки качества радиотелефонной связи	52
3.2 Оценка качества связи с использованием специализированных приложений	57
4. КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТЯХ WI-FI	60
СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	71
ЛИТЕРАТУРА	75
ПРИЛОЖЕНИЕ	78

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы повышения качества услуг являются приоритетными для любого оператора связи. При этом различают понятие «качество восприятия» – то есть то, что кажется конечному пользователю, и «качество обслуживания» – набор параметров, нормы на которые необходимо соблюдать для обеспечения восприятия пользователями качества услуги как «хорошего». Закономерно, что сразу возникает несколько классов проблем. Часть из них носит сугубо технический характер: какие параметры необходимо учитывать, чему должны быть равны допустимые значения этих параметров, какие технические средства нужно использовать для соблюдения этих норм. Часть проблем лежит в области психологии и физиологии человека, управления жизненным циклом услуги, экономических показателей, организационных мер. Например, при определении лояльности пользователя к какой-либо услуге необходимо принимать во внимание не только существующие физиологические отличия людей, лингвистические особенности языка, особенности слухового и зрительного восприятия, но и психологический аспект. Работа на первой линии техподдержки порождает довольно много анекдотов про неадекватных пользователей, но при этом пользователи не только сами себя такими не считают, но и зачастую понимают, что сами виноваты в сложившейся ситуации уже после общения с оператором техподдержки. Усталость, плохое настроение, личные проблемы приводят к набору действий пользователя, приводящих к неполучению услуги связи или ухудшению ее качества. Психологическое состояние пользователя побуждает его искать помощь на стороне, например, совершать звонок в техподдержку оператора.

Отдельная интересная задача – поиск корреляции между техническими параметрами и восприятием человеком показателей качества. Отметим, что с 2010 года количество услуг связи существенно возросло и, главное, они изменились качественно. Появилось такое понятие, как «окружение» (ambient), представленное виртуальной реальностью, дополненной реальностью и интернетом вещей. Таким образом, современный человек не только потребляет мультимедийные услуги связи – передачу голоса, видео и данных, но и пользуется услугами, созданными устройствами, являющимися посредниками между некой информационной средой и физическим миром. Можно сказать, что наступила эпоха киберфизических систем.

Цель данного учебного пособия – показать возможность обеспечения качества услуг в условиях дальнейшего эволюционного развития систем и сетей беспроводной связи.

В сотовых сетях стандартов GSM, UMTS, LTE все услуги разделены на определённые классы трафика со специфицированными качественными характеристиками (QoS – Quality of Service). В сетях GSM и UMTS телефонный трафик передают с коммутацией каналов, минимизируя задержку в реальном времени. Весь остальной трафик – пакетный – передают с коммутацией пакетов. В сетях LTE (4G) доставку услуг осуществляют по сквозным каналам (bearer) с необходимыми качественными характеристиками QoS. Важнейшими параметрами QoS являются: классы трафика, приоритеты, надёжность, задержки, скорости передачи.

В сетях радиодоступа, к которым прежде всего относят сети стандартов IEEE 802.11 (коммерческое название Wi-Fi), вопросы обеспечения качества обслуживания реализованы слабо. Настройка механизмов обеспечения QoS производится прежде всего в корпоративных беспроводных сегментах, в то время как в домашних сетях реализуется политика обслуживания по умолчанию.

Однако дальнейшее развитие сетей беспроводного доступа, в том числе для реализации систем IoT (Internet of Things – Интернета вещей) и приложений дополненной и виртуальной реальности, подразумевает необходимость развития методов и механизмов обеспечения QoS во всех типах сетей радиодоступа.

Практически все международные организации уделяют внимание вопросам измерения показателей работы сети, обеспечения сквозного качества обслуживания и неуклонного повышения качества восприятия услуг в сетях электросвязи. На глобальном уровне это Международный союз электросвязи (International Telecommunications Union – ITU), а на международном региональном уровне – Европейский институт стандартизации электросвязи (European Telecommunications Standards Institute – ETSI), Ассоциация телекоммуникационной промышленности (Telecommunications Industry Association – TIA), Американский национальный институт стандартов (American National Standards Institute – ANSI) и другие международные организации. Так же, к процессу стандартизации качества предоставления услуг связи привлечены регуляторы, представители отраслевой промышленности и операторы сетей электросвязи.

В Российской Федерации, современный подход к регулированию качества услуг связи оказывает Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – Роскомнадзор, орган, являющийся подведомственным подразделением Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации,

основанный 12 мая 2008 года и в настоящее время использующий методику контроля качества сотовой связи от 04.12.2014 года.

Отметим, что нормативно-правовую поддержку в области качества обслуживания обеспечивают следующие базовые рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ), консорциума 3GPP, стандарты IEEE и руководящие документы РФ:

- ITU-T E.860 – Структура соглашения об уровне обслуживания
- ITU-T E.430 – Аспекты оценки качества обслуживания
- ITU-T Y.1514 – Параметры работы сетей для предоставления услуг связи
- Y.1540 – Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters
- Y.1540 – Network performance objectives for IP-based services
- 3GPP TS 23.107 – Концепция и архитектура QoS в сети UMTS
- 3GPP TS 29.208 – Качество услуг в сквозном соединении между пользователями сети UMTS.
- IEEE 802.11e-2005 – IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Specific requirements
- РД 45.162-2001 – Ведомственные нормы технологического проектирования. Комплексы сетей сотовой и спутниковой подвижной связи общего пользования
- РД 45.254-2002 – Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний

Для успешной работы в области технической поддержки важно обращаться к сведениям из первоисточников, внимательно изучать стандарты и руководства. Сейчас наблюдается довольно бурное развитие технологий беспроводного радиодоступа, и не всегда более ранние механизмы позволяют обеспечить требуемое качество обслуживания. Поэтому производители оборудования могут предлагать оригинальные технические решения для обеспечения QoS.

Главы 1, 3 и 4 написаны О.А. Симониной, глава 2 – А.Е. Рыжковым. Выражаем благодарность студентам СПбГУТ за вдохновение и поддержку.

1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СЕТЯХ СОВОЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

1.1 Задача обеспечения качества услуг

Задачу обеспечения качества услуг в общем виде можно сформулировать так: Передать трафик с параметрами, позволяющими восстановить информацию на приеме с минимально заметными для пользователя изменениями.

Решение этой задачи может быть разбито на следующие этапы:

1. Определить параметры, по которым может быть оценено качество услуги.
2. Определить нормы, определяющие незаметность изменений для пользователя.
3. Обеспечить соблюдение норм при передаче на сети (разработка механизмов обеспечения качества).
4. Обеспечить меры по нивелированию влияния сети на приеме.

Отметим, что обеспечение качества услуг является нетривиальной задачей, так как существует ряд факторов, усложняющих использование формального подхода, особенно в беспроводных сетях. К ним относятся:

- появление новых услуг и сервисов, для которых не определены нормы показателей качества обслуживания;
- широкое распространение беспроводных технологий, имеющих слабую поддержку QoS;
- увеличение мультимедийной составляющей трафика: видео, AR/VR.
- распространение smart-устройств и соединений M2M;
- неравномерность развития инфраструктуры операторов связи;
- компьютеризация телекоммуникационного оборудования и возрастающее влияние информационной безопасности на качество телекоммуникационных услуг.

Под услугой сотовой связи подразумевается деятельность оператора сотовой связи по приему, обработке и передаче абонентской (пользовательской) информации по сети подвижной связи. При этом важно определить основные (базовые) услуги – услуги, которые определены основным назначением службы. Для различных поколений стандартов сотовой мобильной связи основные услуги различны. Так, для GSM это телефонный вызов, а для LTE – передача данных.

Таким образом, чтобы обеспечить заданное качество услуг, необходимо определить:

- нормы показателей качества обслуживания для различных типов трафика;
- методы оценки качества услуг;
- методы управления трафиком и методы управления сетью, позволяющие достичь заданных показателей качества (KPI).

Процесс оказания услуг сети подвижной связи включает в себя три этапа:

- Инициализация – процедура предоставления доступа к сети оператора при попытке установления радиотелефонного соединения абонентом;
- Оказание услуги – оказание оператором как и основных, так и дополнительных услуг;
- Завершение оказания услуг – разъединение соединения.

При определении политики управления важно разделять зоны ответственности. Так, под понятием сквозного качества обслуживания (QoS e2e) учитывается только зона ответственности Оператора. При оценке качества услуги необходимо учитывать влияние конечных узлов (рисунок 1.1). Для оценки качества услуг используют как субъективные, так и объективные методы [1]. Заметим, что для оценки речи и видео в целом используются принципиально различные методы, но многие из них опираются на расчет среднеквадратичного отклонения какого-либо параметра от заданных норм – SNR.

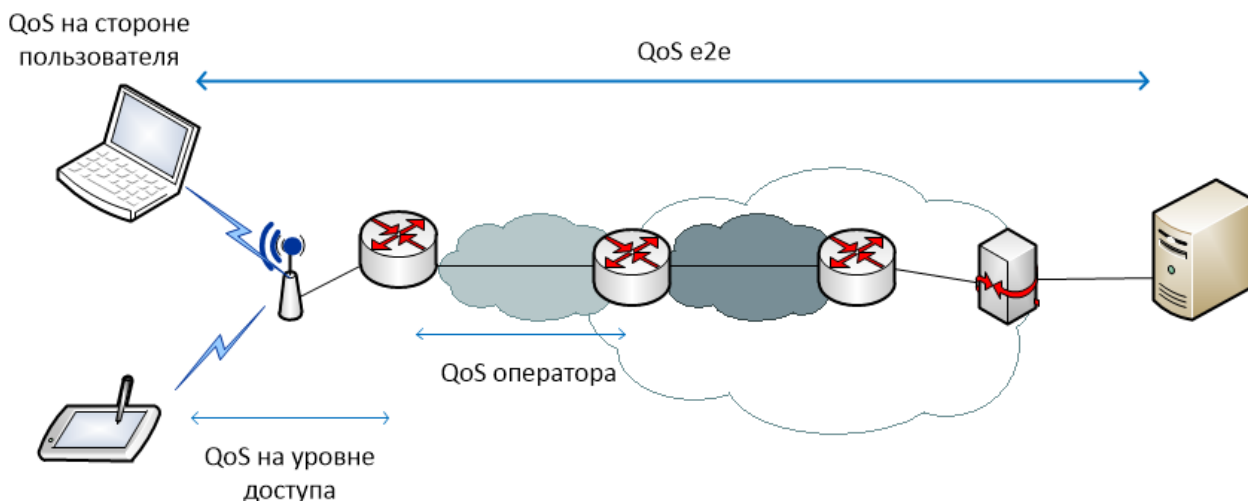


Рисунок 1.1 – Зоны ответственности при обеспечении QoS

Для сетей сотовой мобильной связи можно использовать модель для расчетов параметров QoS по уровням, которая состоит из следующих этапов (рисунок 1.2):

1. Доступность сети, которая определяет QoS с точки зрения сети и поставщика услуг.
2. Параметры QoS: сеть доступа, являющаяся основным требованием для все аспектов и для все параметров QoS.
3. Предоставление услуг: доступность услуги, полнота услуги и непрерывность услуги.
4. Набор услуг: услуги, которые могут быть предоставлены абоненту.



Рисунок 1.2 - Модель расчета параметров QoS по уровням

Доступность сети – вероятность того, что абоненту будут предоставлены услуги сотовой связи:

$$R-NA = \frac{N_{\text{подкл}}}{N},$$

где R-NA (Radio Network Availability) – доступность радиосети, $N_{\text{подкл}}$ – количество успешных попыток подключения к сети, N – все попытки подключения.

При вычислении доступности показатели рассчитываются отдельно для сети с коммутацией каналов и сети с коммутацией пакетов, так как используемая сеть Оператора может состоять не только из сетей одного типа. В случае использования сети отличной от требуемой вводится параметр, означающий отсутствие сети.

Сеть доступа разделяется на две составляющие:

- сеть доступа с коммутацией каналов. Характеризуется показателем NA-CS (Network Accessibility Circuit Switched) – вероятность того, что абоненту будут предоставлены услуги сотовой сети с коммутацией каналов:

$$NA-CS = \frac{N_{\text{усп}}}{N}.$$

- сеть доступа с коммутацией пакетов. Характеризуется показателем NA-PS (Network Accessibility Packet Switched) – вероятность того, что абонент получит услуги мобильно сети с коммутацией пакетов.

$$NA-PS = \frac{N_{\text{усп}} + N_{\text{усп GPRS}}}{N},$$

где N – количество всех измерительных выборок, $N_{\text{усп}}$ – количество успешных измерительных выборок (мобильный аппарат получает достаточный уровень

сигнала), $N_{\text{усп GPRS}}$ – количество успешных GPRS-выборок (есть возможность GPRS-соединения).

Для каждого поколения сотовой мобильной связи заданы отдельные критерии качества и нормы на них, напрямую связанные с набором предоставляемых услуг и особенностями технологии.

1.2 Качество обслуживания в сетях 2G

Критерии качества обслуживания и параметры QoS в сетях 2G определены базовой услугой GSM – передачей речи по сети с коммутацией каналов. К критериям качества относятся доступность, полноценность и непрерывность услуги (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Показатели качества услуги телефонии в сети 2G

Критерий качества	Показатель качества
Доступность	Доступ к услуге
	Время установления соединения
Полноценность	Качество передачи речи
Непрерывность	Доля успешных вызовов

В сетях 2G предусмотрены классы качества обслуживания исходя из параметров: задержка (значения 1,2,3,4), надежность (значения 1,2,3), приоритет обслуживания (значения 1,2,3) и пропускная способность (значения «пиковая», «средняя»).

Задержка – это время, необходимое для передачи данных между мобильными телефонами. Состоит из задержки запроса, задержки распределения радиоресурсов и задержки в сети GSM/GPRS, но при передаче во внешние сети не учитывается. Нормы на задержку в сети GSM приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Классы задержки и требования в величине задержки

Класс задержки	Требования к величине задержки, с			
	Размер пакета до 128 бит		Размер пакета до 1024 бит	
	средняя	95%	средняя	95%
1	< 0,5	< 1,5	< 2,0	< 7,0
2	< 5,0	< 25,0	< 15,0	< 75,0
3	< 50,0	< 250,0	< 75,0	< 375,0
4	Не гарантировано	Не гарантировано	Не гарантировано	Не гарантировано

Расчет показателей качества основной услуги в сети с коммутацией каналов происходит в следующих необходимых условиях:

- Попытка считается успешной, если соединение подтверждается.
- Начало попытки вызова определяется нажатием кнопки «Вызов».
- При нажатии кнопки «Вызов» абонент должен находиться в зоне действия сети.

- Если соединение не было установлено, то такой вызов не учитывается в ходе проведения тестирования.

Для речевого трафика производится расчет следующих параметров:

SA-T (Service Accessibility Telephony), доступ к услуге – вероятность того, что абонент получить доступ к сотовой сети:

$$SA-T = \frac{N_{усп}}{N},$$

где $N_{усп}$ - количество успешных попыток вызова, N – все попытки вызова.

ST-T (Setup Time Telephony), время установления соединения – интервал времени между нажатием кнопки «Вызов» и получением сигнала подтверждения установления соединения:

$$ST-T = t_2 - t_1,$$

где t_1 – момент времени, когда вызывающий абонент отправляет номер вызываемого пользователя, а t_2 – момент времени, когда установление соединения произошло.

SpQ (Speech Quality), качество передачи речи – определяется полнотой услуг. Проверка качества передачи речи осуществляется с использованием субъективного метода оценки качества речи MOS. Оценка проводится в обе стороны, то есть для абонента А и абонента В отдельно.

В GSM используется принцип прерывистой передачи DTX. Структура 25-кадрового мультикадра полноскоростного канала трафика приведена на рисунке 1.3. Продолжительность мультикадра 120 мс. Конкретному абоненту выделяют один таймслот (TS), в рассматриваемом примере это TS3. В одном временном интервале можно передавать полноскоростной информационный канал телефонии TCH/FR со скоростью 12,2 (13) кбит/с. В 24-х кадрах (0-11 и 13-24) размещены информационные пакеты (T), в 12-м кадре передают параметры канала управления SACCH (A). Последний 25-й кадр – свободный (idle).

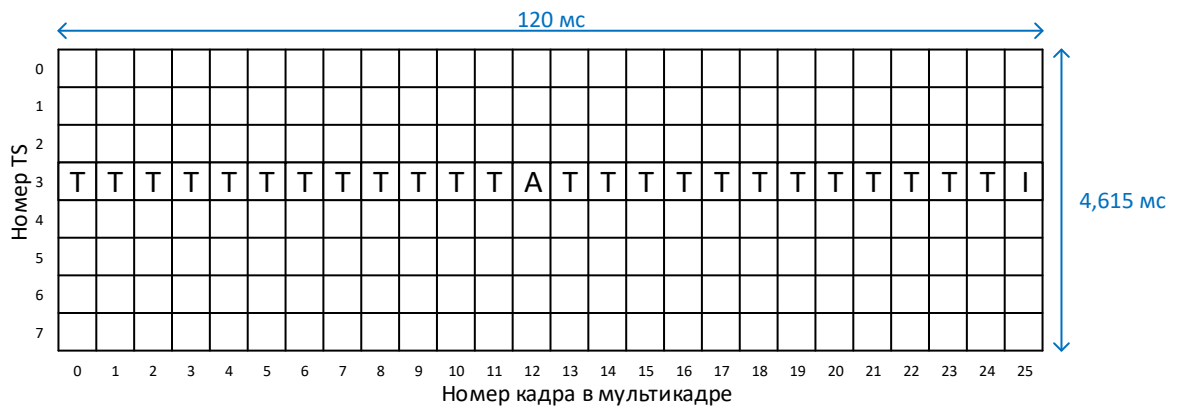


Рисунок 1.3 — Структура 26-кадрового мультикадра

По каналу SACCH в линии «вниз» передаются команды управления по изменению мощности передатчика и времени упреждения, а в линии «вверх» – результаты телеметрии. Одно сообщение SACCH содержит 184 бита данных. После избыточного кодирования на выходе получено 456 канальных бит, которые перемежают и размещают в четырех кадрах. Полный пакет канала SACCH передают за 4 мультикадра, то есть за 480 мс.

Во всех цифровых стандартах сотовой связи используют технологию прерывания передачи DTX по выделенному каналу: во время пауз передачи речи передатчики соответствующих базовых и абонентских станций молчат, что улучшает помеховую обстановку и увеличивает срок действия аккумуляторной батареи мобильной станции.

Для реализации DTX при телефонии используют детектор активности речи VAD [3], задача которого состоит в определении активной фазы речи и передаче во время пауз короткого пакета «комфортного шума» для обеспечения естественности восприятия передаваемого сигнала. Для каждого сегмента речи длительностью 20 мс производится фильтрация входного сигнала в 9 фильтрах и измеряются уровни сигналов на их выходах, определяется наличие основного тона. Блок обнаружения частоты основного тона также обеспечивает индикацию отдельных тонов. Анализатор комплексного сигнала позволяет обнаружить сложные сигналы, например, музыкальные фрагменты.

Таким образом, во время паузы абонент слышит усреднённый фоновый шум, называемый «комфортным шумом». Для его генерации берут данные из следующих подряд 8 сегментов входного сигнала общей длительности 160 мс. Анализируя этот фрагмент шума, VAD формирует блок SID. Эти блоки во время пауз в речи передают каждые 480 мс в 4-х последовательных кадрах, остальное время соответствующий передатчик в данном TS молчит.

Однако стоит отметить, что использование механизма VAD может понижать качество речи до 30%, особенно если абонент находится в зашумленном помещении и на улице.

При оценке качества в GSM используются и параметры, отражающие качество непосредственно радиоканала: BER, RxQual, FER, отношение сигнал/шум и степень управления мощностью оператором. Важным параметром при оценке качества речи является BER (Bit Error Rate) – частота появления ошибочных битов. Значение BER зависит от числа ошибочных битов на приёме перед процессом декодирования. Число ошибочных битов накапливается в течении всего мультикадра и образует суммарную величину BER, которую необходимо разделить на общее число бит в мультикадре и сравнить с величиной RxQual (0...7), обозначающей качество принимаемого сигнала.

Существуют две оценки для величины BER: Full и Sub. Оценка Full основана на измерениях всех кадров SACCH-мультикадра, то есть при использовании технологии прерывания передачи речи величина Full будет некорректной для данного мультикадра. В результате будет получено

завышенная оценка BER, так как она содержит измерения битовых ошибок в те периоды времени, когда передача не велась. Оценка Sub основана на измерениях в кадрах, обязательных для передачи в мультикадре во время пауз в речевом сигнале, содержащих сообщение мультикадра и блок, передающий сообщение SID.

Измерение параметра RxQual позволяет оценить качество принимаемого сигнала в обслуживаемой соте (таблица 1.3). Качество принимаемого сигнала оценивают на основании среднего коэффициента ошибок BER за 0,5 секунд. Усреднённые значения BER квантуют и кодируют в виде значений параметра RxQual. Данный параметр так же имеет 2 значения Sub и Full.

Таблица 1.3 — Значения параметра RxQual

Значение RxQual	Значение BER, %	Принимаемое значение BER, %
0	Менее 0,2	0,14
1	0,2-0,4	0,28
2	0,4-0,8	0,57
3	0,8-1,6	1,13
4	1,6-3,2	2,26
5	3,2-6,4	4,53
6	6,4-12,8	9,05
7	Более 12,8	18,1

Коэффициент потерянных блоков FER (Frame Erasure Rate) – количество числа блоков данных, содержащих ошибки, которые не были исправлены, в процентах (%). Измерения FER производятся на основе оценки правильности принятых блоков, каждый из которых содержит избыточный проверочный код, что позволяет MS определить, принят блок с ошибками или нет.

FER Sub учитывает только один SACCH и SID блоки. Таким образом, что при расчёте FER sub используют только 2 кадра:

$$FER_{sub} = \frac{N_{\text{некорректных блоков}}}{2} \cdot 100\%.$$

FER Full просматривает 25 блоков в 4 последовательных мультикадрах: 24 TCH + 1 SACCH.

$$FER_{full} = \frac{N_{\text{некорректных блоков}}}{25} \cdot 100\%.$$

Параметр Rxlev (Received Signal Level) показывает уровень принимаемого сигнала от обслуживаемой соты. Измерение проводится для каждого физического канала, занятого соединением. Значения уровня снимаются в дБм (таблица 1.4).

Величина отношения сигнал/шум (C/I) представляет собой отношение уровня сигнала обслуживаемой соты на входе приёмника мобильной станции к уровню помех. Величину оценивают в диапазоне от –5 до 25 дБ. В направлении передачи от БС к абонентскому устройству. Так как каждый

речевой канал не является постоянно активным, измерения сигнал\шум имеет смысл производятся только в кадрах во время активной фазы речи.

Таблица 1.4 — Значение RxLev.

Значение RxLev	Уровень принимаемого сигнала, дБм
0	Менее -110
1	-110...-109
...	...
62	-49...-48
63	Менее -48

Величина MS Power Control Level характеризует степень управления мощностью оператором и принимает величины от 0 до 8.

Обмен данными GPRS осуществляется с помощью PDP-контекста, который является связью между точкой доступа АТ (Access Point) и шлюзом GGSN для передачи трафика в обоих направлениях. Для расчета показателей качества используются коэффициенты потерь, носящих явный характер. При этом задаются три класса приоритета: высокий, нормальный (средний) и низкий.

Основные нарушения качества передачи данных в GPRS (таблица 1.5):

- потеря пакетов;
- при потере пакетов - повторная передача;
- при приеме пакетов - нарушение их порядка;
- нарушение внутренней структуры данных в пакете.

Таблица 1.5 – Классы надежности и требования к потерям данных для реализации параметров QoS в технологии GPRS

Класс надежности	Требования к потерям данных, вероятность			
	Потери пакетов	Повторной передачи	Нарушения порядка приема	Нарушения структуры
1	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
2	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-4}
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}

Пропускная способность – это количество информации, переданной в единицу времени, определяется на выходе MS. Вероятность поддержки сетью пиковой пропускной способности в течении долгого периода времени очень мала, поэтому средняя пропускная способность определяет среднюю скорость передачи данных.

Расчет показателей качества услуги передачи данных в сети с GPRS производится при следующих необходимых условиях:

- начало попытки доступа к передаче данных – передача устройством абонента соответствующей команды с запросом
- попытка считается успешной, если от сервера передачи данных пришел ответ.

- соединение можно считать завершенным, если сеанс передачи данных намеренно завершён пользователем.

Для пакетного трафика производится расчет следующих параметров:

SA-PSD (Service Accessibility Rate - Packet Switched Data) – вероятность того, что устройство передачи данных получит доступ к мобильной услуге передачи данных по сети коммутации пакетов:

$$SA-PSD = \frac{N_{усп}}{N},$$

где $N_{усп}$ - количество успешных попыток соединения, N – все попытки соединения.

ST-PSD (Set-up Time - Packet Switched Data), время установления соединения - временной интервал между началом передачи соответствующей команды и получением ответа от сервера:

$$ST-PSD = t_2 - t_1,$$

где t_1 – момент времени, когда абонентское устройство посылает команду-запрос, t_2 – момент времени, когда пришел ответ от сервера.

CR-PSD (Completion Rate Packed Switched Data), число выполненных вызовов при передаче данных – вероятность события, когда любая из попыток передачи данных не прерывается из-за любой причины:

$$CR-PSD = \frac{N_{прд}}{N_{усп}},$$

где $N_{прд}$ - количество непрерывных передачи и/или прерванных по инициативе конечного пользователя, $N_{усп}$ – количество успешных попыток передач.

1.3 Качество обслуживания в сетях 3G

В сетях 3G вводится более тонкое разделение трафика, так как это первая полностью мультисервисная сеть сотовой мобильной связи. В сети UMTS предусмотрены типы трафика: речевой, потоковый, интерактивный и фоновый (таблица 1.6 и 1.7).

Таблица 1.6 – Классы трафика в сетях 3G

Характеристики	Классы трафика			
	Речевой	Потоковый	Интерактивный	Фоновый
Задержка	< 150 мс	< 1 с	постоянная	постоянная
Надежность	< 0,02	< 0,01	10^{-6}	10^{-6}
Приоритет	1	2	3	4
Приложения	Передача речи, видеотелефония, видеоигры	Мультимедийный поток (аудио и видео)	Просмотр web-страниц	Фоновая загрузка, E-mail

Речевой класс трафика предусматривает передачу информации в реальном времени, где главным ограничением является допустимая задержка трафика в сети. Фактически как в сетях GSM, так и UMTS речевой (телефонный) трафик передают с коммутацией каналов, что обеспечивает малые задержки. Остальной трафик передают с коммутацией пакетов.

Таблица 1.7 – Требования к типам данных по классам трафика

Класс трафика	Тип данных	Скорость передачи, кбит/с	Характеристики трафика	
			Односторонняя задержка, мс	Потери, %
Речевой	Речь	4-64	150	3
	Видео	32-384	150	1
	игры	1	250	0
Потоковый	Аудио	16-128	600	1
	Видео	32-384	600	1
	данные	32-384	700	0
Интерактивный	Голос. сообщ.	4-32	600	3
	web	32-384	2 с	0
Фоновый	загрузка	32-384	Не норм.	0

В реальной сети данные передаются с различной длиной транспортного блока в зависимости от значения индикатора CQI (Channel Quality Indicator), которое сообщает UE базовой станции. Консорциумом 3GPP [6] разработана таблица соответствий значений индикатора CQI и размера транспортного блока (таблица 1.8).

Таблица 1.8 — Значения CQI в UMTS

Индекс CQI	Размер транспортного блока	Модуляция
0	N/A	
1	130	4-ФМ
2	170	4-ФМ
3	232	4-ФМ
4	320	4-ФМ
5	370	4-ФМ
6	404	4-ФМ
7	048	4-ФМ
8	792	4-ФМ
9	928	4-ФМ
10	1204	4-ФМ
11	1488	4-ФМ
12	1744	4-ФМ
13	2288	4-ФМ
14	2592	4-ФМ
15	3328	4-ФМ
18	3570	16-КАМ
17	4200	16-КАМ
18	4072	16-КАМ
19	5290	16-КАМ
20	5890	16-КАМ
21	0508	16-КАМ
22	7184	16-КАМ
23	9730	16-КАМ
24	11432	16-КАМ

Индекс CQI	Размер транспортного блока	Модуляция
25	14424	16-КАМ
26	15770	64-КАМ
27	21708	64-КАМ
28	20504	64-КАМ
29	32204	64-КАМ
30	38570	64-КАМ

В зависимости от категории UE используются различные схемы модуляции и **ММО** [5] (таблица 1.9).

Таблица 1.9 — Категории оборудования в UMTS и типы модуляции

Категория UE	Модуляция без использования ММО	Модуляция с использованием ММО	Модуляция при работе с Dual-Cell	Модуляция с эмулированием Dual Cell и с ММО
1 – 10	4-ФМ 16-КАМ			
11, 12	4-ФМ			
13, 14	4-ФМ 16-КАМ 64КАМ			
15, 16	4-ФМ 16-КАМ			
17, 18	4-ФМ 16-КАМ 64 QAM			
		4-ФМ 16-КАМ		
19, 20	4-ФМ 16-КАМ 64КАМ			
21, 22			4-ФМ 16-КАМ	
23, 24			4-ФМ 16-КАМ 64 QAM	
25, 26				4-ФМ 16-КАМ
27, 28				4-ФМ 16-КАМ 64 QAM

Например, если UE принадлежит категории 14, то применяется схема 64-КАМ, но не применяется система ММО. Категория оборудования также влияет на выборку CQI и размер транспортных блоков. Диапазон CQI находится в пределах от 0 до 30: чем выше число, тем выше качество канала. Например, если UE посылает значение CQI равное 15, то от сети ожидается передача данных с размером транспортного блока 3328 бит /символ, что эквивалентно около 1,6 Мбит/с. Если UE посылает значение CQI равное 30, то от сети ожидается передача данных с размером транспортного блока 38576 бит/символ, что эквивалентно примерно 19 Мбит/с. Однако, размер транспортного блока при максимальном значении CQI не может дать

максимальной пропускной способности, рассчитанной теоретически. Случай, когда UE передает значение $CQI = 30$, встречается крайне редко. Тем не менее, многие производители и разработчики UE хотят увидеть, что их устройство действительно может достичь максимальной пропускной способности. В таком случае, используются специальные сетевые симуляторы, которые позволяют установить максимальный размер транспортного блока для каждой категории UE [4].

На радиointерфейсе для характеристики мощности принимаемого сигнала используют параметры RSSI, RSCP, E_c/N_o , управление мощностью.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – характеризует мощность суммарного широкополосного сигнала. RSSI не используется в качестве показателя контроля покрытия, так как несколько слабых сот могут дать в результате высокий RSSI, однако одна наиболее сильная сота может отсутствовать. Для оценки покрытия используется параметр RSCP (Received Signal Code Power), определяющий мощность полученного пилотного сигнала после сжатия его полосы.

Для оценки качества покрытия также используется параметр E_c/N_o . E_c/N_o , который является отношением RSCP к RSSI. Также, как и RSCP, он может использоваться для определения соты с наилучшим уровнем пилотного сигнала.

Целью процесса управления мощностью является поддержание необходимого качества сигнала задействуя минимальные ресурсы сети. Управление мощностью используется для обеспечения доступа к сети как можно большего количества пользователей и минимизации интерференции. Каждый UE, получив доступ к сети, генерирует сигнал, который, с точки зрения BTS, увеличивает интерференцию в системе. В то же время абонентская емкость системы обратно пропорциональна интерференции в сети: чем меньше помех в системе, тем больше она может обслужить абонентов. Процесс управления мощностью быстро реагирует на изменение уровней сигнала и помех.

Проблема заключается в следующем: UE могут перемещаться по соте, при этом UE, которая больше отдалена от BTS, будет излучать большую мощность, чем UE, которая располагается поблизости с BTS. BTS для корректной обработки сигналов от каждого абонента должна получать на входе одинаковую мощность от всех UE. При этом каждая UE и каждая BTS должны использовать наименьшую возможную мощность.

В UTRAN используют три петли управления мощностью. Внешняя разомкнутая петля управления мощностью (Open Loop Power Control) необходима для выхода UE в сеть. Когда UE подключается к сети, станция должна рассчитать мощность, с которой будет передавать преамбулу и информационное сообщение по каналу PRACH. Если эта мощность оказалась недостаточной и UE не получила подтверждения по каналу AICH, то станция повторно передает преамбулу, увеличивая мощность. Для управления мощностью в процессе передачи, когда UE в активном состоянии, используют

замкнутые петли управления мощностью (Closed Loop Power Control), внутреннюю и внешнюю.

Внутренняя петля действует между BS и UE, что позволяет поддерживать отношение сигнал/помеха (SIR - Signal to Interference Ratio) на уровне некоторого опорного значения (target SIR). Target SIR регулируется независимо для каждого RRC-соединения, а расчет основан на оценке качества соединения. Target SIR рассчитывается в контроллере, так как оценка качества сигнала происходит в контроллере после обработки сигналов многолучевого распространения. Управление мощностью передатчиков UE и BS по внутренней петле происходит с частотой 1500 Гц с использованием 1 и 2 дБ шагов. Работают также две внешние замкнутые петли управления мощностью: между RNC и BS и между RNC и UE. Задачи этих петель состоят в регулировке опорных значений SIR с тем, чтобы обеспечить требуемые BER и BLER, которые определяют при помощи CRC (Check Redundancy Code), размещенного в каждом кадре. Эта регулировка происходит с частотой 10-100 Гц. При хэндоверах UE всегда выполняет команды той BS, которая требует снижать мощность ее передатчика. Что касается BS, то RNC устанавливает границы возможных изменений мощности отдельных каналов передачи.

1.4 Качество обслуживания в сетях LTE

Сеть LTE относится к сетям с коммутацией пакетов, поэтому механизмы обеспечения QoS в ней во многом заимствованы из сетей ATM и IP. Прежде всего, это можно заметить по типам услуг, предоставляемым сетью LTE. Услуги разделены на 9 классов, каждому классу назначен свой идентификатор QCI QoS Class Identifier, а основными нормируемыми параметрами являются задержки и потери (таблица 1.10).

Таблица 1.10 – Критерии качества обслуживания в сетях 4G

QCI*	Тип ресурса	Приоритет	Задержка	Потери	Тип услуги
1	Гарантированная скорость передачи (GBR)	2	100 мс	10^{-2}	Телефония
2		4	150 мс	10^{-3}	Видеотелефония и стримминг
3		3	50 мс	10^{-3}	Игры в реальном времени
4		5	300 мс	10^{-6}	Видео с буферизацией
5	Негарантированная скорость передачи (Non-GBR)	1	100 мс	10^{-6}	Сигнализация IMS
6		6	300 мс	10^{-6}	Видео с буферизацией Vip TCP-услуги
7		7	100 мс	10^{-3}	Аудио и видео в реальном времени, интерактивные игры
8		8	300 мс	10^{-6}	Видео с буферизацией
9		9			TCP-услуги

Отдельно отметим, что сети LTE обладают такой функцией, как самоорганизация (SON – Self Organized Network), что очень важно с точки зрения обеспечения качественных показателей (рисунок 1.4). Самоорганизующаяся сеть автоматически оптимизируется посредством самоконфигурации (self-configuration), самооптимизации (self-optimization) и самоисцеления (self-healing). Самоконфигурация включает в себя режим plug-and-play, предназначенный для быстрого определения и конфигурирования сетевых элементов, уменьшающий затраты и упрощающий процесс установки. Самооптимизация включает в себя автоматическую оптимизацию, основанную на данных мониторинга и измерениях в сети мобильной связи, полученных от различных сетевых узлов и абонентского оборудования. Самовосстановление позволяет организовать быстрое обнаружение проблем и нивелирование их влияния на качество обслуживания абонентов, избегая вмешательства технического персонала, что значительно снижает затраты на техническое обслуживание [3]. Особенности SON сведены в таблицу 1.11.

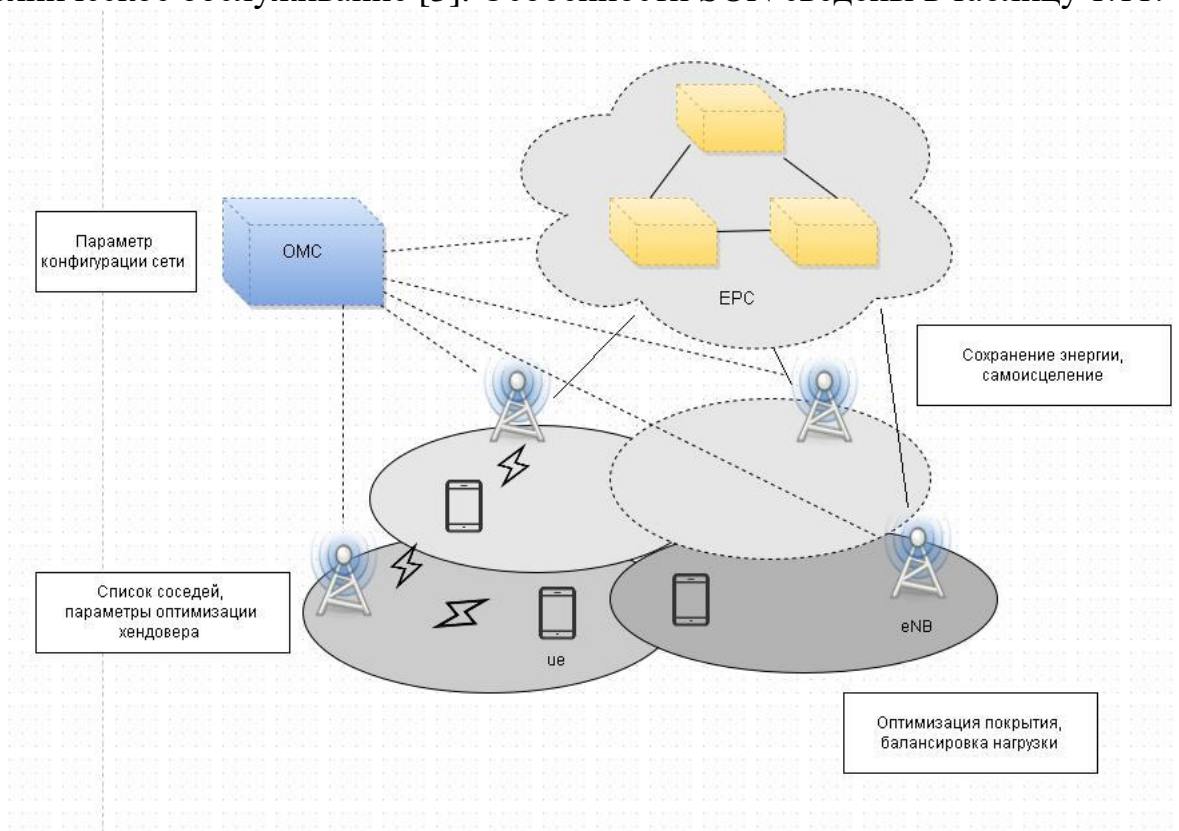


Рисунок 1.4 – Функции SON

Таким образом, можно разделить функции поддержки заданных значений KPI на два уровня: на радиоучастке и в коммутационной части сети. При этом отдельно оператор оценивает качество услуг, наследуя принципы оценки из сетей младших поколений, такие как количество отказов в установлении соединения и количество обрывов соединений.

Таблица 1.11 – Функции SON

Функция	Релиз 8	Релиз 9	Релиз 10
Самоконфигурация	<ul style="list-style-type: none"> Автоматическая конфигурация PCI ANR Самоконфигурация узлов БС Автоматическое управление программным обеспечением 	<ul style="list-style-type: none"> Автоматическая конфигурация PCI ANR Автоматическая самоконфигурация узлов БС Программное обеспечение для управления Inter-RAT ANR Функция автоматической настройки радио 	
Самооптимизация		<ul style="list-style-type: none"> Оптимизация покрытия и пропускной способности сети. Балансировка мобильной нагрузки Оптимизация мобильной надежности Оптимизация RACH 	<ul style="list-style-type: none"> Оптимизации по покрытию и емкости (трансмиссионные, новые функции, такие как ретрансляция) Балансировка мобильной нагрузки Оптимизация мобильной надежности (трансмиссионные, новые функции, такие как ретрансляция) Оптимизация RACH Снижение помех Координация внутрисотовой интерференции Экономия энергии Контроль и оптимизация узлов ретрансляции
Самостоятельное		Выключение сот, которые вышли из строя	Самовосстановление

Оценка качества радиосети LTE

Для оценки качества работы сети используются следующие параметры:

- % отказов в установлении RRC соединения: суммируются все счетчики для всех сот региона, рассчитанные во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Отказы в установлении RRC соединения} = \\ & = 100 - 100 * (L.RRC.ConnReq.Succ.Emc + L.RRC.ConnReq.Succ.HighPri + \\ & L.RRC.ConnReq.Succ.Mt + L.RRC.ConnReq.Succ.MoData + L.RRC.ConnReq.Succ.DelayTol) / \\ & / (L.RRC.ConnReq.Att.Emc + L.RRC.ConnReq.Att.HighPri + L.RRC.ConnReq.Att.Mt + \\ & + L.RRC.ConnReq.Att.MoData + L.RRC.ConnReq.Att.DelayTol), \% \end{aligned}$$

- % отказов в установлении eRAB соединения PS: суммируются все счетчики для всех сот региона, рассчитанные во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Отказы в установлении eRAB соединения PS} = \\ & = 100 - 100 * [L.E-RAB.SuccEst] / [L.E-RAB.AttEst], \% \end{aligned}$$

- % отказов в установлении eRAB соединения PS с разделением по PLMN: суммируются все счетчики для всех сот региона, рассчитанные во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Отказы в установлении eRAB соединения PS с разделением по PLMN} = \\ & = 100 - 100 * [L.E-RAB.SuccEst.PLMN] / [L.E-RAB.AttEst.PLMN], \% \end{aligned}$$

- % обрывов eRAB соединения PS Drop Rate: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{eRAB Drop Rate} = \\ & = 100 * [L.E-RAB.AbnormRel + L.E-RAB.AbnormRel.MME] / [L.E-RAB.AbnormRel + \\ & L.E-RAB.AbnormRel.MME + L.E-RAB.NormRel], \% \end{aligned}$$

- % обрывов eRAB соединения PS Drop Rate с разделением по PLMN: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{eRAB Drop Rate с разделением по PLMN} = \\ & = 100 * [L.E-RAB.AbnormRel.PLMN + L.E-RAB.AbnormRel.MME.PLMN] / \\ & / [L.E-RAB.AbnormRel.PLMN + L.E-RAB.AbnormRel.MME.PLMN + L.E- \\ & RAB.NormRel.PLMN], \% \end{aligned}$$

- % успешности процедуры CSFB: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Успешность процедуры CSFB} = 100 * (L.RRCRedirection.E2W.CSFB + \\ & L.RRCRedirection.E2G.CSFB + L.IRATHO.E2W.CSFB.ExecSuccOut + \\ & + L.IRATHO.E2G.CSFB.ExecSuccOut) / L.CSFB.PrepareAtt, \% \end{aligned}$$

- % успешности процедуры CSFB с разделением по PLMN: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Успешность процедуры CSFB с разделением по PLMN} = \\ & = 100 * (L.RRCRedirection.E2W.CSFB.PLMN + L.RRCRedirection.E2G.CSFB.PLMN + \\ & + L.IRATHO.E2W.CSFB.ExecSuccOut.PLMN + L.IRATHO.E2G.CSFB.ExecSuccOut.PLMN) // \\ & L.CSFB.PrepAtt.PLMN, \% \end{aligned}$$

- суммарный трафик за отчетный период в сети LTE: суммируется пакетный трафик UL и DL, который рассчитывается по следующим формулам:

$$ULTrafficVolume = L.Thrp.bits.UL / 8 / 1024 / 1024, \text{ Mbyte}$$

$$DLTrafficVolume = L.Thrp.bits.DL / 8 / 1024 / 1024, \text{ Mbyte}$$

- суммарный трафик за отчетный период в сети LTE с разделением по PLMN: суммируется пакетный трафик UL и DL, который рассчитывается по следующим формулам:

$$ULTrafficVolume_PLMN = L.Thrp.bits.UL.PLMN / 8 / 1024 / 1024, \text{ MByte}$$

$$DLTrafficVolume_PLMN = L.Thrp.bits.DL.PLMN / 8 / 1024 / 1024, \text{ Mbyte}$$

- % Call Setup Success Rate: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода:

$$\begin{aligned} & RRCConnectionSuccessService = \\ & = L.RRC.ConnReq.Succ.Emc + L.RRC.ConnReq.Succ.HighPri + L.RRC.ConnReq.Succ.Mt + \\ & + L.RRC.ConnReq.Succ.MoData + L.RRC.ConnReq.Succ.DelayTol, \% \end{aligned}$$

- успешность процедуры внутрисистемного хэндовера: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода, затем подставляются в формулу:

$$\begin{aligned} & \text{Intra-LTE HO Success Rate} = 100 * (((L.HHO.IntraeNB.IntraFreq.PrepAttOut + \\ & + L.HHO.IntraeNB.InterFreq.PrepAttOut + L.HHO.IntereNB.IntraFreq.PrepAttOut + \\ & + L.HHO.IntereNB.InterFreq.PrepAttOut) - (L.HHO.Prep.FailOut.MME + \\ & + L.HHO.Prep.FailOut.NoReply + L.HHO.Prep.FailOut.PrepFailure + \\ & + L.HHO.Prep.FailOut.HOCancel)) / (L.HHO.IntraeNB.IntraFreq.PrepAttOut + \\ & + L.HHO.IntraeNB.InterFreq.PrepAttOut + L.HHO.IntereNB.IntraFreq.PrepAttOut + \\ & + L.HHO.IntereNB.InterFreq.PrepAttOut)) * ((L.HHO.IntereNB.InterFreq.ExecSuccOut + \\ & + L.HHO.IntereNB.IntraFreq.ExecSuccOut + L.HHO.IntraeNB.InterFreq.ExecSuccOut + \\ & + L.HHO.IntraeNB.IntraFreq.ExecSuccOut) / (L.HHO.IntereNB.InterFreq.ExecAttOut + \\ & + L.HHO.IntereNB.IntraFreq.ExecAttOut + L.HHO.IntraeNB.InterFreq.ExecAttOut + \\ & + L.HHO.IntraeNB.IntraFreq.ExecAttOut)) \end{aligned}$$

Параметры, рассчитываемые при оценке качества сети LTE на радиоучастке

Средняя скорость на абонента в Downlink. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI). Для каждой соты рассчитывается средняя скорость на абонента *DLAverageThroughput* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Средняя скорость на абонента в Downlink с разделением по PLMN. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI). Для каждой

соты рассчитывается средняя скорость на абонента *DLAverageThroughput_PLMN* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Среднее количество абонентов на 1 соту. Для каждой соты рассчитывается среднее количество пользователей *AvgUserNumber* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Среднее количество абонентов на 1 соту с разделением по PLMN. Для каждой соты рассчитывается среднее количество пользователей *AvgUserNumber_PLMN* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Среднее количество абонентов, передающие данные в Downlink на 1 соту. Для каждой соты рассчитывается среднее количество пользователей *AvgUserDLData* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Среднее количество абонентов, передающих данные в Uplink на 1 соту. Для каждой соты рассчитывается среднее количество пользователей *AvgUserULData* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Средняя скорость на абонента в Uplink. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI). Для каждой соты рассчитывается средняя скорость на абонента *ULAverageThroughput* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Средняя скорость на абонента в Uplink с разделением по PLMN. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI). Для каждой соты рассчитывается средняя скорость на абонента *ULAverageThroughput_PLMN* во 2 ЧНН пакетного трафика (UL+DL) отчетного периода. Полученные значения усредняются по всем сотам на территории субъекта федерации.

Нормализованная скорость передачи данных в направлении Downlink на 1 соту LTE. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI), расчет скорости производится в ЧНН по количеству одновременно подключенных активных пользователей (*L.Traffic.User.DLData.Avg*) по следующей методике. Для каждой работающей соты субъекта РФ за ЧНН отчетного периода определяются *Avg_DL_Sector_Thpt* и *DLTrafficVolume* – средняя скорость передачи данных на соте и объем трафика. Нормализованная скорость передачи данных в субъекте РФ определяется следующим образом:

- для каждой соты за ЧНН определяется:

$$Avg_DL_Sector_Thpt \times DLTrafficVolume;$$

- полученные значения суммируются по всем сотам;
- полученная сумма делится на суммарный трафик.

В результате получено:

$$Norm_Avg_DL_Sector_Thpt_{\text{субъекта РФ}} = \frac{\sum_1^N (Avg_DL_Sector_Thpt_{\text{соты}i} \times DLTrafficVolume_{\text{соты}i})}{\sum_1^N DLTrafficVolume_{\text{соты}i}}$$

Нормализованная скорость передачи данных в направлении Uplink на 1 соту LTE. Показатель рассчитывается без разбиения на классы услуг (QCI), расчет скорости производится в ЧНН по количеству одновременно подключенных активных пользователей ($L.Traffic.User.ULData.Avg$). Методика расчета совпадает с методикой расчета нормализованной скорости в направлении DL. Тогда получим:

$$Norm_Avg_UL_Sector_Thpt_{\text{субъекта РФ}} = \frac{\sum_1^N (Avg_UL_Sector_Thpt_{\text{соты}i} \times ULTrafficVolume_{\text{соты}i})}{\sum_1^N ULTrafficVolume_{\text{соты}i}}$$

Утилизация ресурсных блоков: для каждой соты за каждый час рассчитывается утилизация в UL и DL за отчетный период:

$$RB_UR_DL = 100 * RB_Used_DL / RB_Available_DL,$$

$$RB_UR_UL = 100 * RB_Used_UL / RB_Available_UL,$$

где показатели RB_Used_DL , RB_Used_UL , $RB_Available_DL$ и $RB_Available_UL$ рассчитываются, а из полученных значений выбираются вторые максимумы.

Утилизация ресурсных блоков за отчетный период для соты определяется по формуле:

$$RB_UR = \max(RB_UR_DL, RB_UR_UL).$$

% Call Setup Success Rate: суммируются все счетчики для всех сот региона за каждые сутки отчетного периода. Call Setup Success Rate показывает успешность установления вызовов для всех сервисов, включая сервис VoIP. Этот показатель рассчитывается на базе показателей RRC Setup Success Rate (Service), S1 Signaling Connection Setup Success Rate и E-RAB Setup Success Rate (All). В результате итоговая формула имеет вид:

$$CSSR_{\text{субъекта РФ}} = 100 \times \frac{\sum_1^N RRCconnectionSuccessService_{\text{соты}i}}{\sum_1^N RRCconnectionAttemptService_{\text{соты}i}} \times \frac{\sum_1^N S1S1GCconnectionEstablishSuccess_{\text{соты}i}}{\sum_1^N S1S1GCconnectionEstablishAttempt_{\text{соты}i}} \times \frac{\sum_1^N ERABSetupSuccess_{\text{соты}i}}{\sum_1^N ERABSetupAttempt_{\text{соты}i}}$$

Допустимые значения, отражающие качество сети LTE на радиоучастке, показаны в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Допустимые значения показателей, рассчитываемых при оценке качества сети LTE

№	Название KPI	Допустимые значения для сети
1	Отказы в установлении RRC соединения, %	≤ 2 %
2	Отказы в установлении eRAB соединения PS, %	≤ 5 %
3	Отказы в установлении eRAB соединения PS с разделением по PLMN, %	≤ 5 %
4	Обрывы eRAB PS, %	≤ 5 %
5	Обрывы eRAB PS с разделением по PLMN, %	≤ 5 %
6	Успешность процедуры CSFB, %	≥ 98 %
7	Успешность процедуры CSFB с разделением по PLMN, %	≥ 98 %
8	Утилизация ресурсных блоков, %	≤ 80 %
9	Нормализованная скорость передачи данных в направлении Downlink на 1 сектор 4G	N/A
10	Нормализованная скорость передачи данных в направлении Uplink на 1 сектор 4G	N/A
11	Call Setup Success Rate	≥ 95 %
12	Intra-LTE HO Success Rate	≥ 90 %

Оценка параметров качества коммутационной части сети LTE

Для оценки качества работы сети LTE используются следующие параметры:

- Успешность процедуры Attach.
- Успешность процедуры TAU в пределах одного MME.
- Успешность процедуры S1 Paging.
- Успешность процедуры S1 Handover в пределах одного MME.
- Успешность процедуры E-RAB Setup.
- Успешность процедуры Bearer Activation (Default + Dedicated).
- Успешность процедуры Dedicated Bearer Activation.
- Пиковая загрузка UGW по трафику DL+UL. высчитывается второй ЧНН по максимальному значению пользовательского трафика DL+UL (кбит/с) и подставляются в формулу 8 Приложения. Пользовательский трафик рассчитывается на SGi интерфейсе по формуле 12 Приложения.
- Утилизация IP пулов для каждого APN.

- Успешность PDP активации.

Формулы расчета параметров качества по данным базовых станций приведены в Приложении. Базовые станции отсылают статистику, после чего формируется отчет по авариям. Допустимые значения, отражающие качество сети LTE в коммутационной части, показаны в таблице 1.13. Пример отчета приведен в таблице 1.14, в которой цветом показаны значения, не соответствующие нормам

Таблица 1.13 – Допустимые значения показателей в коммутационной части LTE

№	Название KPI	Допустимое значение KPI для сети менее 10 000 абонентов	Допустимое значение KPI для сети более 10 000 абонентов
1	Успешность процедуры Attach	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
2	Успешность процедуры S1 Paging	$\geq 80\%$	$\geq 85\%$
3	Успешность процедуры E-RAB Setup	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
4	Успешность процедуры Bearer Activation (Default + Dedicated)	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
5	Успешность процедуры активации PDP контекстов	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
6	Успешность процедуры X2 Handover в пределах одного MME	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
7	Успешность процедуры S1 Handover в пределах одного MME	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
8	Успешность процедуры TAU в пределах одного MME	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
9	Успешность процедуры Authentication	$\geq 90\%$	$\geq 95\%$
10	Утилизация IP пулов для каждого APN	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$
11	Утилизация лицензий лицензий Attached Users (S1 интерфейс)	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$

Таблица 1.14 – Пример отчета по авариям LTE

Площадка	Название сектора	eRAB_setup_SR, дней	eRAB_setup_SR	RRC_setup_SR, дней	RRC_setup_SR	eRAB_DCR, дней	eRAB_DCR	Norm_Avg_DL_Sector_thpt, дней	CSFB_SR, дней	CSFB_SR	Кол-во попыток CSFB SR за
X	X3	2	59,13	0	82,82	2	21,91	0	2	55,81	43
Y	Y1	0		0		0		0	1	14,77	88
Z	Z3	0		0		0		0	1	80,95	21

Как видно из приведенного отчета, параметр eRAB_setup_SR базовой станции X равен 59.13%, но, как известно, допустимое значение KPI лежит в интервале между 90 и 95%. Параметр eRAB_DCR eNB X принимает значение 21.91%, однако допустимым является число меньше или равное 5 %. Значение успешности процедуры CSFB у всех трех БС должно быть равно или больше 98%, что, как видно, не соответствует полученным значениям. Таким образом, все базовые станции, требуют вмешательства службы эксплуатации.

Заметим, что оценки качественных показателей на сети оператора не однозначно определяют качество услуг, получаемых абонентами. Поэтому необходимы методики оценки качества на стороне пользователя. Данный вопрос рассмотрен в главе 3.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ УСЛУГ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К СЕТЯМ РАДИОДОСТУПА 5 ПОКОЛЕНИЯ (5G)

2.1. Передача данных между объектами Интернета вещей

Сотовые сети и сети радиодоступа, появившиеся в 80-90е годы прошлого века, изначально были ориентированы на передачу телефонного трафика. В начале 21 века к услуге телефонии были добавлены услуги беспроводного Интернета, включая передачу разнообразного видеотрафика. Межмашинное взаимодействие (Machine-to-Machine, M2M) – общее название технологий, обеспечивающих передачу данных между удаленными объектами без участия человека в процессе коммуникаций. M2M позволяет объединять удаленные объекты и системы для автоматизации бизнес-процессов с использованием проводных и беспроводных соединений.

Области применения M2M очень быстро расширяются. Сегодня M2M используют для контроля и управления движением объектов (автопарки, железнодорожные перевозки, любые перемещающиеся объекты), в системах безопасности (от датчиков сигнализации до «умных офисов» и «умных домов»), в промышленности (дистанционный сбор информации со счетчиков и датчиков, дистанционное управление объектами и прочее) [1]. Быстро развиваются и направления потребительской электроники: навигаторы, персональные трекеры, устройства для чтения электронных книг и т.д. Появились разработки с использованием технологии M2M в здравоохранении.

Формально Интернет вещей (IoT – Internet of Things) – это передача данных между объектами (M2M) в формате интернет-сообщений. В реальности под Интернетом вещей понимают глобальную инфокоммуникационную инфраструктуру с возможностями автоматического конфигурирования, которая объединяет «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 [2]. Предполагается большой рост числа устройств, каждый год на несколько миллиардов. В будущем «вещи» станут активными участниками хозяйственной, социальной и информационной деятельности, смогут взаимодействовать между собой и с внешним миром путем обмена информацией об окружающей среде, автономного реагирования на события и влияния на них, выполняя действия или запуская процессы без прямого участия человека.

В процессе развития методов обработки больших объемов данных значительно улучшились технологии сбора информации из распределённых источников. Начиная с низкоуровневых систем для проводных сенсорных сетей, на основе этих технологий работают широкомасштабные

стандартизированные беспроводные сети для разных категорий датчиков. Наиболее успешными примерами систем, предназначенных для передачи данных с низким объемом трафика, являются GSM/GPRS, LoRaWAN, SIGFOX, EC-GSM-IoT (Extended Coverage-GSM-IoT). Однако наибольший интерес представляют 2 стандарта, созданные на базе стандарта LTE: LTE-M и стандарт беспроводного узкополосного Интернета вещей NB-IoT (Narrow Band IoT). В последние годы им посвящена масса публикаций, из которых отметим монографию 2018г [3]

2.2. Технология LTE-M

Технология LTE-M (MTC – Machine-Type Communications или BL/CE Bandwidth reduced Low complexity for Coverage Enhancement) предназначена для организации услуг мобильного Интернета вещей в существующих или специально развёртываемых сетях LTE. Передачу ведут в узкополосных радиоканалах шириной в 1,4 МГц (Narrowband), которые специфицированы в стандарте [4]. Если такие каналы организуют автономно, то сеть радиодоступа функционирует в полном соответствии со стандартом LTE¹. Если для мобильного Интернета выделяют узкополосные каналы в действующих сетях LTE с более широкой полосой (3, 5, 10, 15 или 20 МГц), то требуются небольшие изменения в программном обеспечении подсистемы базовых станций.

При выделении узкополосных каналов внутри широкой полосы (3 и более мегагерц) узкополосные каналы формируют симметрично относительно центральной частоты радиоканала. Общее число узкополосных каналов N_{NB} определяется целой частью отношения

$$N_{NB} = \left\lfloor \frac{N_{RB}}{6} \right\rfloor, \quad (2.1)$$

где N_{RB} – общее число ресурсных блоков (РБ) в полосе радиоканала. В частотной области каждый узкополосный канал состоит из 6 последовательных РБ. Все каналы пронумерованы от $n_{NB} = 0$ до $n_{NB} = N_{NB} - 1$. В таблице 2.1 приведены значения n_{NB} в зависимости от ширины радиоканала, а также указаны номера РБ, не используемых при формировании узкополосных радиоканалов.

Большая часть каналов, используемых в сетях LTE-M, соответствует каналам обычных (широкополосных) сетей LTE. Для передачи трафика вниз используют канал PDSCH, вверх – каналы PUSCH и PUCCH, при подключении к сети абонентские терминалы UE принимают сигналы

¹ Характеристики стандарта LTE, соответствующие релизу 11 спецификаций, рассмотрены в [5]. Изменения, введённые в стандарт в релизах 12 – 13, технологии двойного соединения, мультимедийного вещания, прямого соединения (SideLink), а также технологии взаимодействия сетей LTE и Wi-Fi, представлены в [6].

синхронизации PSS и SSS и вещательный канал управления PBCH, при запросах на доступ к сети работает канал PRACH. Но есть и отличия, когда узкополосные каналы выделяют в более широкой полосе радиоканала (3; 5 и более мегагерц). В этом случае невозможно использовать стандартный канал управления вниз PDCCH, поскольку он занимает первые 1-3 OFDM-символа субкадра во всей полосе радиоканала. Вместо него управляющую информацию DCI передают по специальному каналу MPDCCH (MTC Downlink Control Channel), структура которого повторяет структуру канала управления EPDCCH, описанного в [4, § 9.2]. Канал MPDCCH размещают в выделенном для LTE-M узкополосном радиоканале.

Таблица 2.1 – Организация узкополосных каналов в LTE-M

Ширина полосы, МГц	1,4	3	5	10	15	20
N_{RB}	6	15	25	50	75	100
n_{NB}	0	0; 1	0 – 3	0 – 7	0 – 11	0 – 15
Номера RB, не используемых при формировании каналов	-	0; 7; 14	12	0; 49	0; 37; 74	0; 1; 98; 99

Для сетей LTE-M разработаны специальные терминалы категорий Cat-M1 и Cat-M2, которые отличаются от обычных терминалов широкополосной LTE следующими характеристиками:

- низкая стоимость;
- более надёжное покрытие;
- увеличенный срок службы аккумуляторной батареи.

Терминалы LTE-M гораздо дешевле широкополосных абонентских устройств LTE за счёт снижения избыточной функциональности, обеспечивая передачу и приём небольших объёмов данных. Первоначально для LTE-M были разработаны терминалы категории Cat-0, рассчитанные на передачу вниз и вверх сообщений размером не более 1000 бит. Однако практически сразу с выпуском UE Cat-0 появились станции Cat-M1 с существенно улучшенными характеристиками. Если UE Cat-0 может работать во всех специфицированных полосах, от 1,4 до 20 МГц, то терминал Cat-M1 работает только в полосе 1,4 МГц, имеет одну антенну, не поддерживает технологии агрегации частотных полос, MIMO. Это позволило существенно упростить сами станции и снизить их стоимость, что исключительно важно в условиях массового использования.

Главным методом улучшения покрытия (CE – Coverage Enhancement) является повторная передача сообщений. По организации повторных передач станции Cat-M1 делят на 2 класса: mode A позволяет организовывать до 32 повторений передаваемого сообщения, mode B – до 2048 повторов. Разумеется, сужение полосы позволяет при той же мощности передатчика увеличить дальность связи. Для терминалов Cat-M1 в релизе 14 установлены 2 уровня номинальной мощности передатчиков: 20 и 23 дБм [7].

Для эффективного использования источников питания станции Cat-M1 могут работать в более длительном, чем широкополосные терминалы, спящем режиме (extended TRX), а, кроме того, поддерживают режим сбережения мощности аккумуляторной батареи PSM (Power Saving Mode) [8]. При работе в PSM станция периодически отключается (переходит в состояние HIBERNATE), но при этом остаётся зарегистрированной в сети. Время пребывания в состоянии HIBERNATE определяется периодичностью выполнения процедуры TAU за вычетом времени, когда UE включён и доступен для обмена информацией (рисунок 2.1). При выходе из состояния HIBERNATE станции не требуется выполнять процедуру доступа к сети, что существенно снижает объем сигнализации и приводит к экономии энергии аккумулятора. При нахождении станции в состоянии HIBERNATE она недоступна для входящего трафика, однако сам терминал в любой момент может активизироваться и начать передавать трафик вверх.

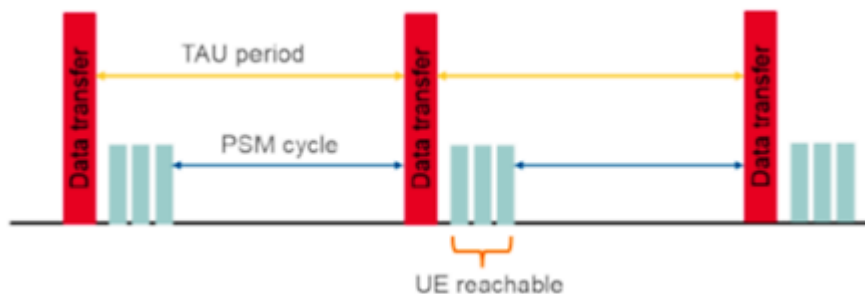


Рисунок 2.1 – Временная диаграмма работы UE в режиме PSM

Максимальный размер пакета (транспортного блока) при передаче вниз составляет 1000 бит, при передаче вверх в релизе 13 также 1000 бит, но в релизе 14 он опционально увеличен до 2984 бит при расширении полосы радиоканала. Передача одного транспортного блока в LTE-M, как и в широкополосной LTE, занимает один субкадр. При передаче вниз и вверх используют модуляционно-кодирующие схемы (MCS) с модуляцией 4-ФМ и 16-QAM. Размеры передаваемых пакетов в битах по каналам PDSCH (вниз) и PUSCH (вверх) в зависимости от вида модуляции, модуляционно-кодирующих схем и числа выделенных для передачи в канале ресурсных блоков (РБ) приведены в таблицах 2.2 и 2.3 [8; 9]. Как следует из таблиц 2.2 и 2.3, при работе UE в mode B используют только модуляцию 4-ФМ.

Сообщения IoT в LTE-M можно передавать как обычный Интернет-трафик в пользовательской плоскости (UP – User Plane), но есть и другой вариант передачи, в виде псевдо-сигнальных сообщений в плоскости управления (CP – Control Plane), который рассмотрен далее в §2.3, посвященной технологии NB-IoT. При обмене сообщениями IoT станции Cat-M1 могут работать как в дуплексном режиме, так и в режиме полудуплекса. Кроме услуг IoT, терминалы Cat-M1 поддерживают передачу телефонии (VoLTE) и SMS.

Таблица 2.2 – Транспортные блоки при передаче вниз

MCS индекс	Модуля- ция	CE mode A, число РБ						CE mode B, число РБ	
		1	2	3	4	5	6	4	6
0	4-ФМ	16	32	56	88	120	152	88	152
1	4-ФМ	24	56	88	144	176	208	144	208
2	4-ФМ	32	72	144	176	208	256	176	256
3	4-ФМ	40	104	176	208	256	328	208	328
4	4-ФМ	56	120	208	256	328	408	256	408
5	4-ФМ	72	144	224	328	424	504	328	504
6	4-ФМ	328	176	256	392	504	600	392	600
7	4-ФМ	104	224	328	472	584	712	472	712
8	4-ФМ	120	256	392	536	680	808	536	808
9	4-ФМ	136	296	456	616	776	936	616	936
10	16-КАМ	136	296	456	616	776	936		
11	16-КАМ	144	328	504	680	872			
12	16-КАМ	176	376	584	776	1000			
13	16-КАМ	208	440	680	904				
14	16-КАМ	224	488	744	1000				
15	16-КАМ	256	552	840					

Таблица 2.3 – Транспортные блоки при передаче вверх

MCS индекс	Модуля- ция	CE mode A, число РБ						CE mode B, число РБ	
		1	2	3	4	5	6	3	6
0	4-ФМ	16	32	56	88	120	152	56	152
1	4-ФМ	24	56	88	144	176	208	88	208
2	4-ФМ	32	72	144	176	208	256	144	256
3	4-ФМ	40	104	176	208	256	328	176	328
4	4-ФМ	56	120	208	256	328	408	208	408
5	4-ФМ	72	144	224	328	424	504	224	504
6	4-ФМ	328	176	256	392	504	600	256	600
7	4-ФМ	104	224	328	472	584	712	328	712
8	4-ФМ	120	256	392	536	680	808	392	808
9	4-ФМ	136	296	456	616	776	936	456	936
10	4-ФМ	144	328	504	680	872		504	
11	16-КАМ	144	328	504	680	872			
12	16-КАМ	176	376	584	776	1000			
13	16-КАМ	208	440	680	904				
14	16-КАМ	224	488	744	1000				
15	16-КАМ	256	552	840					

Развитие технологии LTE-M привело к появлению в релизах 14-15 спецификаций LTE нового терминала Cat-M2, который может работать в расширенной полосе частот до 5 МГц. В станциях Cat-M2 максимальный размер транспортного блока вниз составляет 4008 бит, вверх – 6968 бит.

2.3. Технология NB-IoT

Технология узкополосного беспроводного интернета вещей NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) специфицирована в Rel.13, 14 спецификаций стандарта LTE (E-UTRA). В сравнении с ранее предложенной в LTE технологией интернета вещей LTE-M с полосой радиоканала 1,4 МГц полоса канала в NB-IoT составляет 180(200) кГц, что соответствует полосе, занимаемой одним ресурсным блоком в широкополосных сетях LTE и совпадает с полосой радиоканала стандарта GSM. Появление этой технологии открывает новые возможности для реализации узкополосного беспроводного доступа в сетях IoT с выходом на всемирную пакетную сеть LTE. Характеристики сетей NB-IoT на уровне спецификаций LTE релиза 15.0 рассмотрены в [10].

Хотя в основу физического уровня стандарта NB-IoT положены базовые принципы широкополосного стандарта LTE (технологии OFDM при передаче вниз и SC-FDMA при передаче вверх с сохранением многих параметров радиоинтерфейса), в NB-IoT изменена структура каналов физического уровня, их временные и спектральные характеристики. Особенно это относится к каналам передачи вверх, где наряду с “классической” сеткой поднесущих в 15 кГц используют сетку с расстоянием между поднесущими в 3,75 кГц. Принципиальные изменения произошли в механизме передачи транспортных блоков. Передача одного пакета (транспортного блока) может растягиваться на несколько субкадров, а частичное использование канального ресурса при передаче вверх позволяет одновременно обслуживать в этом направлении несколько устройств.

Сужение полосы радиоканала NB-IoT до 180 (200) кГц потребовало серьезных изменений на физическом уровне в сравнении с классическими сетями LTE с шириной полосы 1,4 – 20 МГц. Прежде всего, это относится к передаче синхронизирующих сигналов, каналу передачи системной информации, запросам на доступ к сети, поскольку эти сигналы и каналы в LTE занимают полосу в 1,4 МГц.

Возможны следующие варианты реализации сетей NB-IoT (рисунок 2.2):

- работа внутри выделенной оператору LTE рабочей полосы;
- работа внутри защитного интервала между выделенными полосами рабочих частот;
- одиночный режим работы в стандартном частотном канале 200 кГц внутри диапазона частот сети GSM.

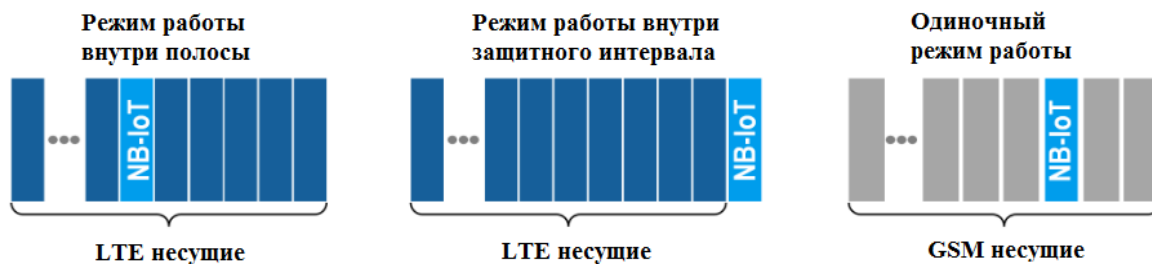


Рисунок 2.2 – Выделение каналов для NB-IoT

В сетях NB-IoT предусмотрены 2 варианта передачи трафика (рисунок 2.3). В стандартном варианте сообщения трафика формируют в виде Интернет-дейтаграмм и передают в пользовательской плоскости через шлюзы S-GW и PDN-GW. В другом варианте трафик следует как псевдо-команды сигнализации NAS (Non-Access Stratum), формируемые MME. Такой вариант предназначен прежде всего для передачи небольших по объёму сообщений, которые следуют не в IP-формате через специальный шлюз SCEF (Service Capability Exposure Function). Но псевдо-команды MME можно использовать и для Интернет-трафика, который в этом случае идёт по трассе IoT RAN – MME – S-GW – PDN-GW. Рассмотренные траектории передачи трафика IoT специфицированы как CIoT EPS Optimization в [11; 12].

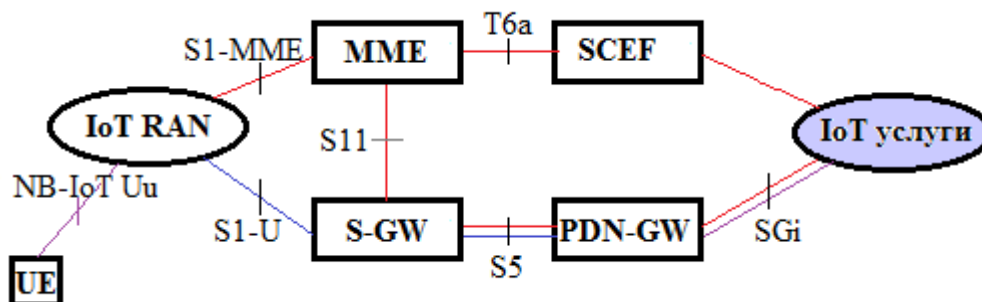


Рисунок 2.3 – Варианты передачи трафика в NB-IoT

Диапазоны частот для NB-IoT в соответствии с [13, Rel.15.2] приведены в таблице 2.4. Передача трафика идет в режиме полудуплекса. Терминал UE, находящийся в активном состоянии, либо принимает трафик, либо его передаёт.

При передаче вниз на физическом уровне NB-IoT определены каналы:

- передачи данных NPDSCH – Narrowband Physical Downlink Shared Channel;
- управления NPDCCH – Narrowband Physical Downlink Shared Channel;
- передачи системной информации NPBSCH – Narrowband Physical Broadcast Channel;
- два сигнала синхронизации: первичный NPSS и вторичный NSSS.

Таблица 2.4 – Диапазоны частот для NB-IoT

Номер диапазона	Частоты передачи вверх (↑) UE → eNB (МГц)	Частоты передачи вниз (↓) eNB → UE (МГц)
	F↑ _{мин} – F↑ _{макс}	F↓ _{мин} – F↓ _{макс}
1	1920 – 1980	2110 – 2170
2	1850 – 1910	1930 – 1990
3	1710 – 1785	1805 – 1880
4	1710 – 1755	2110 – 2155
5	824 – 849	869 – 894
8	880 – 915	925 – 960
11	1427,9 – 1447,9	1475,9 – 1495,9
12	699 – 716	729 – 746
13	777 – 787	746 – 756
14	788 – 798	758 – 768
17	704 – 716	734 – 746
18	815 – 830	860 – 875
19	830 – 845	875 – 890
20	832 – 862	791 – 821
21	1447,9 – 1462,9	1495,9 – 1510,9
25	1850 – 1915	1930 – 1995
26	814 – 849	859 – 894
28	703 – 748	758 – 803
31	452,5 – 457,5	462,5 – 467,5
66	1710 – 1780	2110 – 2200
70	1695 – 1710	1995 – 2020
71	663 – 698	617 – 652
72	451 – 456	461 – 466
74	1427 – 1470	1475 – 1518
85	698 – 716	728 – 746

Структура кадра вниз LTE сохраняется. Кадр длительностью 10мс состоит из 10 субкадров по 1 мс, каждый субкадр – из двух слотов по 0,5мс. Канальный ресурс выделяют на ресурсный блок (РБ), где, как и в стандартной технологии LTE, в полосе 180 кГц передача идет на 12 поднесущих с разносом между частотами 15 кГц. Во временной области в каждом слоте передают 7 OFDM-символов (14 в субкадре). Распределение каналов по субкадрам при передаче вниз показано на рисунке 2.4. Каждый кадр начинается передачей канала NPBSCH, который занимает нулевой субкадр. В каждом 5-м субкадре передают сигнал NPSS, а в последнем субкадре каждого четного кадра – сигнал NSSS. В оставшихся свободных субкадрах размещают каналы NPDSCH или NPDCCH.

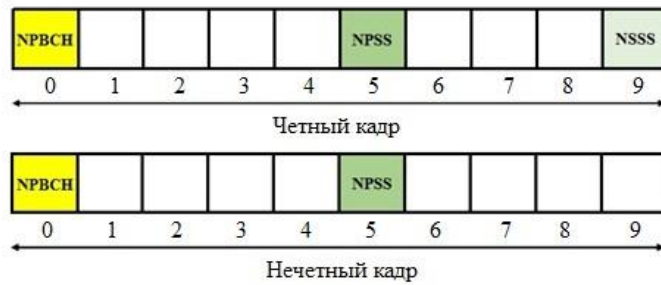


Рисунок 2.4 – Выделение канального ресурса для NB-IoT

Базовая станция в сетях NB-IoT может работать с одной или двумя антеннами (антенные порты R2000 и R2001). Через эти порты передают специальные для NB-IoT опорные сигналы (рисунок 2.5а). Если канальный ресурс для NB-IoT выделен в полосе действующей сети LTE, то в РБ передают также опорные сигналы широкополосной сети R0, R1, а при размещении символов канала NPDSCH резервируют 1–3 OFDM-символа слева для передачи канала управления PDCCH широкополосной сети (2 OFDM-символа на рисунке 2.5б).

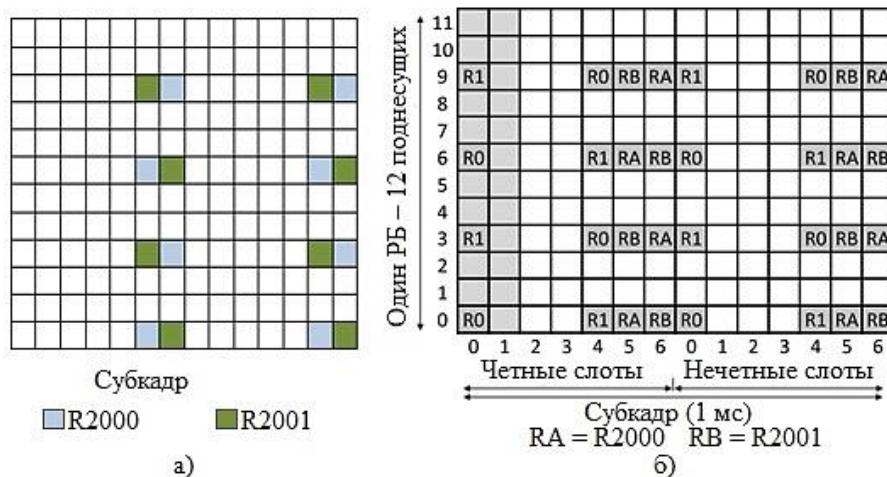


Рисунок 2.5 – Структуры РБ при передаче трафика вниз в NB-IoT

И первичный NPSS, и вторичный NSSS синхронизирующие сигналы построены на основе ZC-последовательностей. Positioning of the NPSS signal in the subframe is shown in Figure 2.6. It occupies the area limited by OFDM symbols $l = 3 - 13$ and subcarriers $n = 0 - 10$, a total of 121 resource elements. Three OFDM symbols on the left remain empty, which allows placing in them the PDCCH channel when allocating the channel resource for NB-IoT within the working band of the wideband LTE channel. Black color in Figure 5 shows the reference signals of the wideband LTE. In these resource elements, the NPSS signal symbols are transmitted.

The NSSS signal is transmitted in an analogous manner, with the only difference being that it occupies the area with $l = 3 - 13$ and subcarriers $n = 0 - 11$, that is, 132 resource elements.

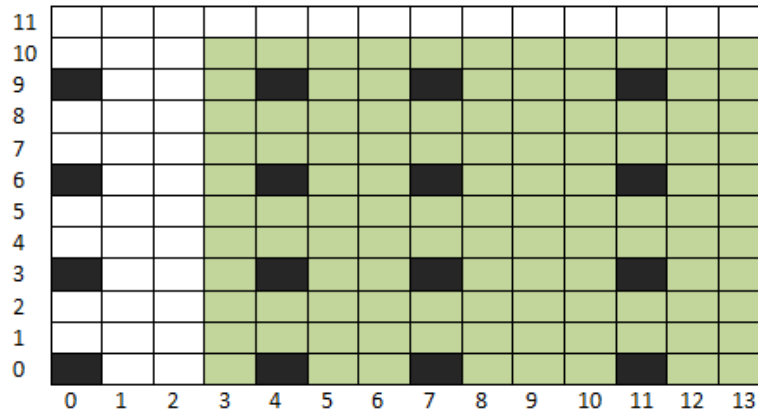


Рисунок 2.6 – Структура субкадра с каналом NPSS

Сигнал NPSS генерируют в виде ZC-последовательности длиной в 11 символов с корневым индексом $u = 5$:

$$d_l(n) = S(l) \cdot e^{-j \frac{\pi u n(n+1)}{11}}, \quad n = 0, 1, \dots, 10 \quad (2.2)$$

Эту последовательность повторяют 11 раз в OFDM-символах $l = 3 - 13$ с коэффициентами $S(l)$, приведенными в таблице 2.5 [4].

Таблица 2.5 – Коэффициенты $S(l)$

l	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$S(l)$	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1

Расположение отсчётов сигналов $d_3(n)$ и $d_7(n)$ с коэффициентами $S(l)$ равными +1 и -1 показано на рисунке 2.7. Приём сигнала NPSS позволяет UE определить границы кадра. В отличие от сигнала PSS в LTE сигнал NPSS не содержит информации об идентификаторе соты N_{ID}^{Cell} . Эту информацию UE получает из сигнала NSSS.

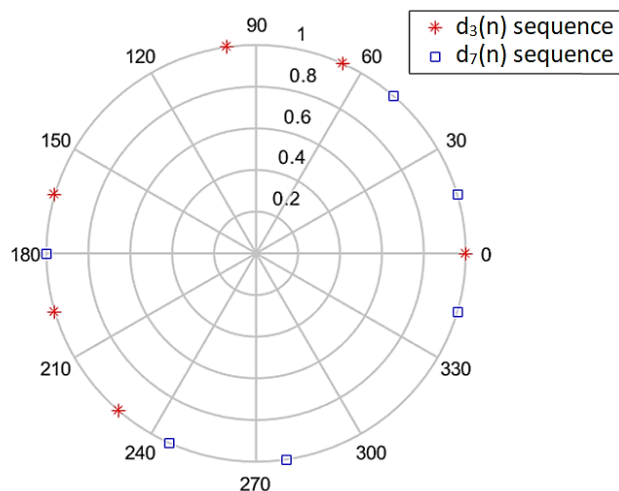


Рисунок 2.7 – $d_l(n)$ -последовательности сигнала NPSS

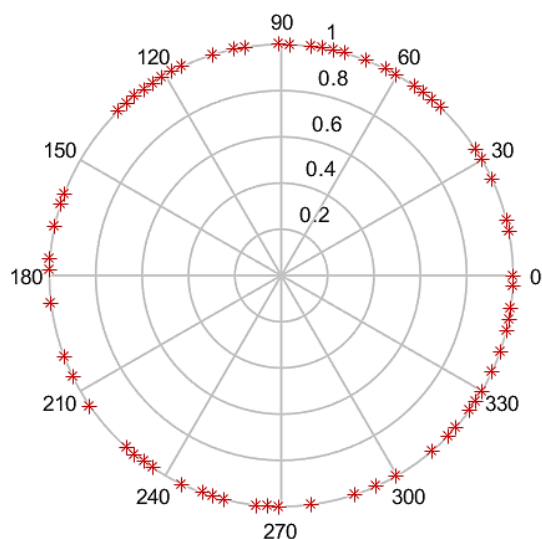


Рисунок 2.8 – $d(n)$ -последовательность сигнала NSSS

Рассмотрим передачу данных по каналу NPDSCH. В [4; 9] специфицированы возможные варианты передач транспортных блоков вниз. Максимальный размер транспортного блока определяется категорией мобильного терминала. К настоящему моменту специфицировано 2 категории терминалов для NB-IoT: NB1 и NB2. Их характеристики приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Характеристики терминалов NB-IoT

Категория	NB1	NB2
Релиз	Rel.13	Rel.14
Максимальный размер транспортного блока вниз, бит	680	2536
Максимальный размер транспортного блока вверх, бит	1000	2536
Максимальный размер буфера на уровне L2, байт	4000	8000

При передаче вниз в канале NPDSCH используют модуляцию 4-ФМ. При этом в отличие от широкополосных сетей LTE, где транспортный блок размещают в одном субкадре, в NB-IoT его передача может растягиваться на несколько последовательных субкадров, от 1 до 10. В таблице 2.8 представлены размеры транспортных блоков в битах при передаче вниз в зависимости от модуляционно-кодирующих схем I_{MCS} и числа занимаемых при передаче субкадров N_{SF} . При этом надо иметь в виду, что для терминалов категории NB1 максимальный размер транспортного блока составляет 680 бит.

Передача трафика вниз может идти как с подтверждением, так и без подтверждения принятых блоков. Для обеспечения необходимой надёжности возможна повторная передача информационных блоков. Предусмотрено 15 вариантов повторов передачи блока по каналу NPDSCH: 2, 4, 8, 16... 2048 раз.

Таблица 2.8 – Форматы передач трафика вниз

I_{MCS}	N_{SF}							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1032
7	104	224	328	472	584	680	968	1224
8	120	256	392	536	680	808	1096	1352
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

Более серьёзные нововведения в NB-IoT относятся к организации физических каналов вверх. В полосе 180 кГц используют 2 варианта формирования ресурсной сетки поднесущих. В первом, как и в широкополосных сетях LTE, временной слот длительностью 0,5 мс содержит 12 поднесущих с разносом по частоте $\Delta F=15$ кГц и 7 ресурсных элементов (РЭ) на каждой поднесущей. Во втором варианте в полосе 180 кГц размещают 48 поднесущих с сеткой частот $\Delta F=3,75$ кГц и с 7 РЭ ($l = 0...6$) на одной поднесущей (рисунок 2.9). Длительность слота составляет 2мс. В обоих вариантах при передаче вверх используют технологию SC-FDMA.

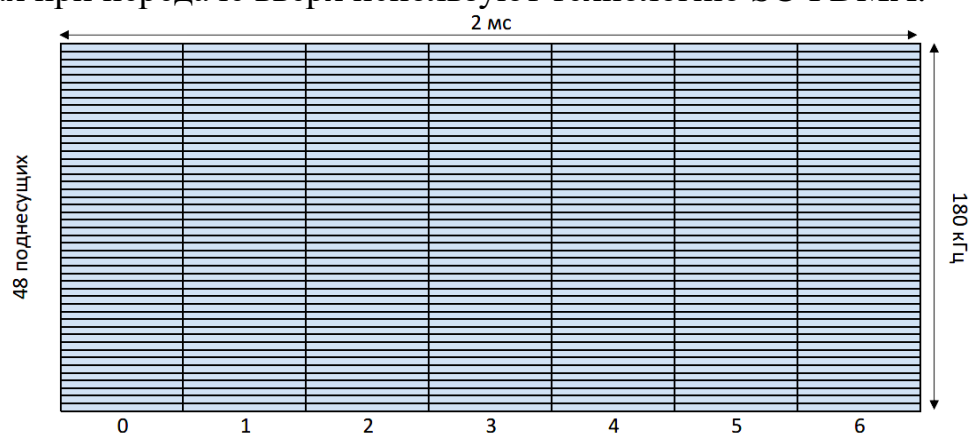


Рисунок 2.9 – Структура слота с 48 поднесущими

При передаче вверх на физическом уровне NB-IoT определены каналы:

- передачи данных NPUSCH – Narrowband Physical Uplink Shared Channel;
- доступа к сети NPRACH – Narrowband Physical Random Access Channel.

По каналу NPRACH UE посылает преамбулу запроса на доступ к сети. Трафик вверх передают по каналу NPUSCH. В отличие от передачи вниз при передаче вверх можно использовать часть поднесущих частот радиоканала. Для передачи вверх введено понятие ресурсной единицы RE (Resource Unit). При этом специфицировано 2 формата передачи вверх: *формат 1* и *формат 2* (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Варианты формирования ресурсных единиц

Форматы передачи	Ширина поднесущей,	Число поднесущих	Число слотов в РЕ	Длительность РЕ, мс
Формат 1	3,75	1	16	32
	15	1	16	8
		3	8	4
		6	4	2
		12	2	1
Формат 2	3,75	1	4	8
	15	1	4	2

Формат 2 используют только для передачи управляющей информации. РЕ формируют на *одной поднесущей* длиной в 4 слота. При $\Delta F = 3,75$ кГц длительность РЕ составляет 8 мс, а в первых трёх РЕ каждого слота размещают опорные сигналы демодуляции ($l = 0, 1, 2$ на рисунке 2.9). При $\Delta F = 15$ кГц передача РЕ занимает 2мс, под опорные сигналы демодуляции занимают 2, 3 и 4 РЕ каждого слота. В каналах NPUSCH в формате 2 применяют модуляцию 2-ФМ.

При передаче в формате 1 в случае $\Delta F = 3,75$ кГц РЕ составляет одна поднесущая и 16 слотов со временем передачи 8 мс. Опорный сигнал демодуляции размещают в РЕ $l = 4$ на рисунке 8. При передаче используют модуляцию $(\pi/2)$ 2-ФМ.

При работе с сеткой $\Delta F = 15$ кГц в таблице 6 специфицированы 4 варианта формирования РЕ. Фактически это означает, что при использовании последних трех вариантов передают одно и то же число символов, растягивая передачу во времени. При выборе РЕ с одной поднесущей число символов в РЕ снижается вдвое. Во всех вариантах РЕ расположение опорных сигналов демодуляции в слотах соответствует принятому в широкополосных сетях LTE ($l = 3$).

Модуляция при использовании РЕ из одной поднесущей может быть $(\pi/2)$ 2-ФМ или $(\pi/4)$ 4-ФМ. Во всех других вариантах при работе с $\Delta F = 15$ кГц модуляция 4-ФМ.

Модуляционно-кодирующие схемы при передаче вверх такие же, как и при передаче вниз, но максимальный объем транспортного блока увеличен до 1000 бит для станций NB1 и составляет 2536 бит для станций NB2 (таблица 2.10). Передача одного транспортного блока может занимать от одного до 10 РЕ. Максимальный размер транспортного блока для станций NB1 составляет 1000 бит. Максимальная скорость передачи данных вверх соответствует максимальной скорости при передаче вниз. Для повышения надежности связи предусмотрена повторная передача блоков, где число повторов может составлять от 2 до 128.

Сравнивая таблицы 2.8 и 2.10, легко заметить, что они заполнены одинаковыми числами. Однако между этими таблицами существует принципиальная разница. Если в таблице 2.8 в строках время передачи транспортного блока вниз определяется в 1мс субкадрах, то в таблице 2.10 в

строках время указано в ресурсных единицах, длительность которых зависит от выделенного числа поднесущих вверх.

Таблица 2.10 – Форматы передач трафика вверх

I_{MCS}	N_{RU}							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1000
7	104	224	328	472	584	712	1000	1224
8	120	256	392	536	680	808	1096	1384
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1000	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	1000	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

Для сетей NB-IoT разработана совершенно новая преамбула запроса на доступ к сети, передаваемая по каналу NRACH. Преамбула построена в виде конструкции, состоящей из 4 *символьных групп*, формируемых на разных поднесущих в сетке из 48 поднесущих. При этом 48 поднесущих разбиты на 4 подгруппы с номерами поднесущих {0 – 11}, {12 – 23}, {24 – 35}, и {36 – 47} соответственно. Все символьные группы в одном цикле преамбулы передают на разных поднесущих, но *только в пределах одной подгруппы*. На рисунке 2.10 показаны 3 цикла повторно передаваемой преамбулы, где каждая символьная группа представлена синим прямоугольником. Сама символьная группа состоит из 5 символов сетки из 48 поднесущих (длительность символа 266,66 мкс) и циклического префикса длиной 66,7 или 266,7 мкс. Следовательно, передача одной символьной группы составляет 1,4 или 1,6 мс, а одного цикла преамбулы – 5,6 или 6,4 мс. В зависимости от уровня покрытия, сота может дать указание UE повторно передавать 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 циклов преамбулы.

Алгоритм выбора подгруппы поднесущих для формирования преамбулы и поднесущих в подгруппе приведен в [4, subclause 10.1.6]. Его можно пояснить следующим образом. Выбор подгруппы поднесущих производит UE на основе информации, полученной от eNB. Поднесущую для передачи первой символьной группы n_{SF1} в первом цикле передачи внутри подгруппы UE выбирает случайно. На рисунке 2.10 $n_{SC1} = 21$. Далее в каждом цикле преамбулы следуют жесткие правила смены поднесущих частот. Номер поднесущей для передачи второй символьной группы $n_{SC2} = n_{SC1} \pm 1$. Знак “+” используют в том случае, если n_{SC1} был чётным и знак “–”, если n_{SC1} был нечётным. Номер поднесущей для передачи третьей символьной группы $n_{SC3} = n_{SC2} \pm 6$. Знак “+” используют, если n_{SC2} находился в нижней половине подгруппы, а знак “–”, если в верхней. Наконец, номер поднесущей для

передачи четвёртой символьной группы определяют по правилу выбора номера поднесущей для второй символьной группы: $n_{SC4} = n_{SC3} \pm 1$. При передаче повторных циклов преамбулы номер поднесущей для передачи первой символьной группы в каждом новом цикле определяется номерами поднесущих предыдущего цикла и идентификатором N_{ID}^{Cell}

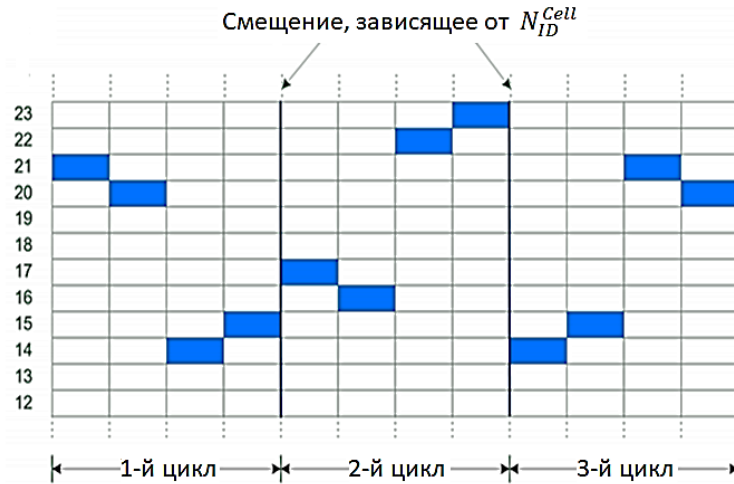


Рисунок 2.10 – Структура преамбулы в сети NB-IoT в подгруппе {12 – 24}

При организации сетей NB-IoT, естественно, требуется обеспечить такие качественные характеристики, как пропускную способность, надёжность, задержки.

Пропускную способность сети NB-IoT целесообразно оценивать числом передаваемых пакетов за единицу времени (1 секунду). В [10] приведены расчёты максимальной пропускной способности канала NB-IoT вниз при использовании распределения Парето с ограничениями для определения статистических параметров трафика IoT. Максимальная длина дейтаграммы принята равной 1500 байт. Минимальная длина информационной части сообщения может составлять 1 байт. Однако при передаче пакетов по радиоканалу к ней необходимо добавить объем сжатых IP/TCP(UDP) заголовков (3 байта) и минимальную суммарную длину заголовков подуровней PDCP, RLC, MAC (3 байта). С учётом этого минимальная величина математического ожидания длины пакета в радиоканале $M[x]$ составляет 9 байт (72 бита)². Результаты расчётов пропускной способности вниз для однократной передачи сообщения N_{mes} , двукратной передачи N_{mes}^{rep2} и четырёхкратной передачи N_{mes}^{rep4} при $M[x] = 366$ бит и 72 бита сведены в таблицу 2.11.

² Сообщения, передаваемые в виде псевдо-сигнального трафика Non Access Stratum, не обрабатываются на подуровне PDCP, но к ним, кроме заголовков подуровней RLC и MAC, будет присоединено поле проверки целостности длиной в 32 бита.

Таблица 2.11 – Максимальная пропускная способность канала NB-IoT вниз

$M[x]$, бит	360				72		
	I_{MCS}	11	6	4	2	5	2
N_{SF}	2	4	6	10	1	2	4
ρ	0,5						
N_{mes}	122	61	40	24	245	122	61
N_{mes}^{rep2}	61	30	20	12	122	61	30
N_{mes}^{rep4}	30	15	10	6	61	30	15
ρ	0,7						
N_{mes}	183	91	61	36	366	183	91
N_{mes}^{rep2}	91	45	30	18	183	91	45
N_{mes}^{rep4}	45	22	15	9	91	45	22

Таблица 2.11 рассчитана при двух значениях загрузки канала: $\rho = 0,5$ и $0,7$. В соответствии с рисунком 2.4 25% времени отведено на передачу синхронизирующих сигналов и канала управления NPBSCH. На передачу канала NPDCCH, под который выделяют отдельные субкадры, отведено 30% времени передачи трафика вниз. Номера модуляционно-кодирующих схем I_{MCS} и число субкадров N_{SF} , занимаемых передачей одного пакета, выбраны в соответствии с таблицей 2.8.

Для передачи трафика вверх существует множество различных сценариев в зависимости от того, сколько поднесущих выделено в РЕ и какую модуляционно-кодирующую схему используют. При оценке пропускной способности канала вверх необходимо учитывать время, отводимое на передачу преамбул запросов на доступ к сети. При загрузке канала $\rho = 0,7$ и размещении одного пакета в одном РЕ можно передавать до 500-600 одиночных пакетов трафика в секунду.

Надёжность передачи в сетях NB-IoT обеспечивается:

- HARQ с повторной передачей неприятых пакетов;
- многократной передачей сообщений трафика и сигнализации.

Задержка в доставке трафика определяется:

- выбором формата передачи (минимальное время передачи 1мс);
- задержкой начала передачи после получения сообщения по каналу NPDCCH;
- нагрузкой сети (ожиданием в очереди).

Необходимо также учитывать задержки, обусловленные процедурой запросов на доступ UE к сети и подключения к ней.

2.4. Расширение сферы услуг на путях перехода к мобильным сетям 5G

Устройства мобильной связи стали неотъемлемой частью повседневной жизни. При этом сферы их использования быстро расширяются, а число устройств в сетях Интернета вещей растёт с непредсказуемой скоростью. Существующие стационарные сети радиодоступа физически не в состоянии поддерживать такое количество устройств и возникает необходимость в построении новых сетей, ориентированных на организацию услуг определённого типа. В [14] проанализирована статистика устройств разных классов, обеспечивающих услуги радиодоступа в США в 2016г. Устройства широкополосного доступа прежде всего востребованы в информационных и связных сетях, на производстве, в образовании. Наибольшее число устройств Интернета вещей используют на производстве; в горнодобывающей промышленности; в торговле (оптовой и розничной); на транспорте, включая организацию перевозок и хранение; в системах обслуживания жилых помещений (зданий); в сельском хозяйстве.

Устройства, обеспечивающие жизнедеятельность различных систем (mission critical services), необходимы в системах общественной безопасности, в системах экстренной связи и сигнализации, в медицине, в финансовой деятельности, на транспорте. При этом качественные показатели (QoS) услуг разных классов сильно отличаются друг от друга. По большому счёту 3 целевых параметра определяют требования к сетям 5 поколения: пиковые скорости более 10 Гбит/с в сетях широкополосного видео, плотность устройств радиодоступа межмашинного обмена более 1 миллиона на 1 км² и задержки менее 1 мс для сверхнадёжных межмашинных соединений.

Сети 5G должны поддерживать приложения в виде виртуальной реальности (Virtual Reality) и дополненной реальности (Augmented Reality). В [14] приведены примеры их реализации при трансляции Зимних Олимпийских Игр из Южной Кореи в 2018г. Передача изображений более, чем со 100 камер на ледовом стадионе позволяли создать виртуальную реальность нахождения на льду, а появление на экране при трансляции лыжных гонок информации о скорости движения и биометрии спортсмена (частоте пульса) давало эффект дополненной реальности. При использовании на производстве сетей Интернета вещей 5G будет организовано взаимодействие как между машинами и оператором, так и между отдельными машинами. При этом человек (оператор) не удаляется с производства, а наоборот, работая с данными из Интернета вещей в режиме дополненной реальности, получает возможность непосредственного управления производственным циклом.

Первые спецификации нового стандарта 5G NR (New Radio) были выпущены в декабре 2017 г. в рамках релиза 15 спецификаций. Характеристики услуг стандарта NR приведены в таблице 2.12 [15].

Таблица 2.12 –Классификация услуг и их характеристики в сетях 5G

5QI	Тип	Приоритет	Доп. задержка, мс	Доп. потери блоков	Макс. длина пак., байт	Услуги	
B	GBR, критичные к задержкам	11	5	10^{-5}	160	Дистанционное управление	
C		12	10	10^{-6}	320	Интеллектуальные транспортные системы	
D		13	20	10^{-5}	640		
1	GBR	20	100	10^{-2}	–	Телефония в реальном времени	
2		40	150	10^{-3}	–	Видеотелефония	
3		30	50	10^{-3}	–	Игры в реальном времени, сообщения V2X, управление электросетями, мониторинг	
4		50	300	10^{-6}	–	Видео с буферизацией	
65		7	75	10^{-2}	–	Приоритетная связь в сетях общественной безопасности (МСРТТ)	
66		20	100	10^{-2}	–	Неприоритетная связь в профессиональной мобильной связи	
75		25	50	10^{-2}	–	Сообщения V2X	
E		18	10	10^{-4}	255	Автоматизация управления	
F		19	10	10^{-4}	1358	Автоматизация процессов	
5		Non-GBR	10	100	10^{-6}		Сигнализация (IMS)
6			60	300	10^{-6}		Видео с буферизацией, TSP/IP услуги для приоритетных
7	70		100	10^{-3}		Аудио, видео в реальном времени, интерактивные игры	
8	80		300	10^{-6}		Видео с буферизацией, TSP/IP услуги	
9	90						
69	5		60	10^{-6}		Сигнализация МСРТТ	
70	55		200	10^{-6}		МСРТТ данные	
79	65		50	10^{-2}		Сообщения V2X	
G	66		10	10^{-6}		Мобильное вещание в 5G с малой задержкой	

В сетях NR сохранены классы услуг, специфицированные в LTE. В таблице 2.12 их 5QI (5G Quality of Service Indicator) обозначены цифрами. Эти услуги, в свою очередь, разбиты на 2 подкласса: услуги с 5QI = 1...9 были специфицированы в первом релизе 8 стандарта LTE и ориентированы, прежде всего, на широкополосный радиодоступ. К ним в релизах 13-14 были добавлены услуги с двойной нумерацией 5QI: MCPTT (Mission critical push-to-talk), введённые для сетей общественной безопасности, и V2X (Vehicular-to-everything) для сетей управления движущимися объектами.

В 2018г. в США начато развёртывание новой системы общественной безопасности с использованием MCPTT. Речь идёт о сети FirstNet (First Responders Network) для сотрудников “оперативного реагирования” (first responders) – полицейских, пожарных, работников скорой помощи, соединения с которыми имеют высший приоритет и не могут быть прерваны [16].

Сеть FirstNet обеспечивает услуги MCPTT, телефонию, видео, передачу данных и текстов, услуги мобильного вещания и позиционирования. Её развёртывают в диапазоне 14 LTE (700 МГц), причём абонентские терминалы могут иметь двойное подключение, поддерживая вместе с каналом FirstNet в диапазоне 14 канал коммерческой сети LTE в другом диапазоне. Особое внимание в сети FirstNet уделяется надёжности связи. Сеть должна быть доступна с вероятностью 99,99%. На восстановление обрывов связи отводится не более 2 часов. Надёжной должна быть и абонентская аппаратура, способная переносить удары, вибрацию, работать в интервале температур -40...+85°C. Первые выпущенные для работы в сети FirstNet станции относятся к категориям 4 и 1 аппаратуры LTE и обеспечивают передачу данных вниз до скоростей 150 и 10 Мбит/с соответственно [6].

Введённые в NR новые услуги в дополнение к услугам сетей LTE помечены в 5QI таблицы 2.12 буквами: В...G. Эти услуги отличаются прежде всего минимальными в сравнении с другими услугами задержками, высоким приоритетом с ограничением длин передаваемых сообщений для услуг с гарантированной скоростью передачи (GBR – Guaranteed Bit Rate). Несомненно, услуги с буквенными идентификаторами предназначены для сетей Интернета вещей.

2.5. Структура сети NR

Если архитектура сетей 3G+ и 4G базируется на формировании **сквозных каналов**, то в сетях 5G организуют **прямые соединения** в виде структурно независимых сетей, ориентированных на реализацию конкретных услуг. Поэтому базовая архитектура NR (New Radio) специфицирована в виде соединений функциональных узлов (рисунок 2.11) [15]. Она состоит из подсистемы радиодоступа (R)AN и ядра сети (NR Core). В пользовательской плоскости обеспечивается прямое соединение между (абонентским)

терминалом UE и сетью данных DN (на рисунке 2.11 показано жирной линией).

Ядро сети составляют функциональные узлы, которые сеть 5G организует в соответствии с запрошенными услугами. Якорные функции в визитной сети выполняет UPF (User Plane Function), а функции доступа, регистрации и мобильности AMF (Access and Mobility Management Function). Фактически при организации и обслуживании прямых соединений сеть 5G декомпозируют для отдельных услуг или групп услуг на отдельные **слои**. Каждый слой функционально представляет собой самостоятельную сеть со своими специфическими характеристиками, возможностями и услугами. Возможность реализации слоистых структур обуславливает компьютеризация и виртуализация практически всех функциональных узлов 5G с широким использованием облачных структур. Организация слоя требует гибкого и быстрого выделения вычислительных ресурсов, памяти, а также адаптивного управления ресурсом радиоканалов.

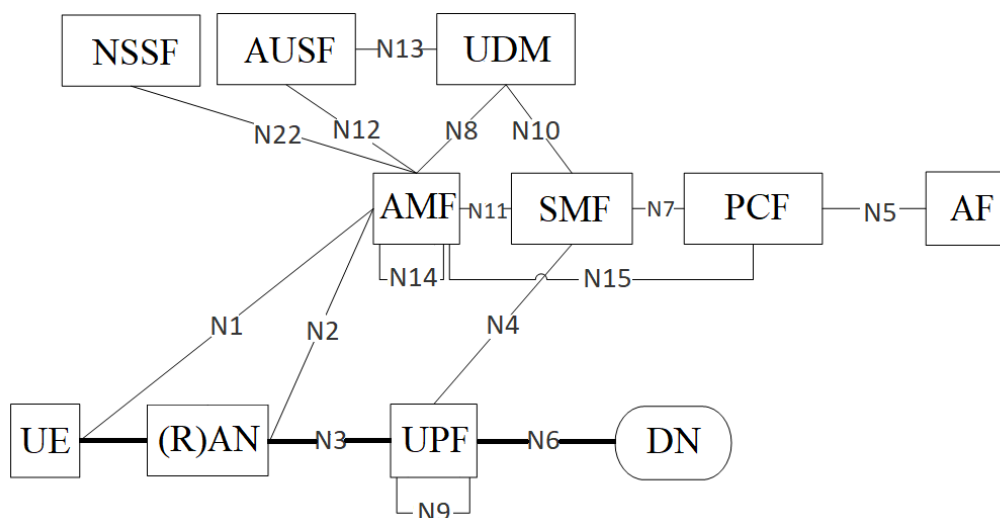


Рисунок 2.11 – Архитектура NR

Сетевой слой (Network slice) представляет собой комбинацию, включающую в себя требуемую конфигурацию сетевых функций и приложений с использованием облачной инфраструктуры, обеспечивающую специфические требования пользователей (бизнес-услуг). Различают вертикальные и горизонтальные слои. На рисунке 2.12 в сети 5G представлены 4 вертикальных слоя для 4 различных услуг: два слоя предназначены для обслуживания двух разных групп абонентов со смартфонами, один для сетей общественной безопасности и ещё один для сетей M2M [17].

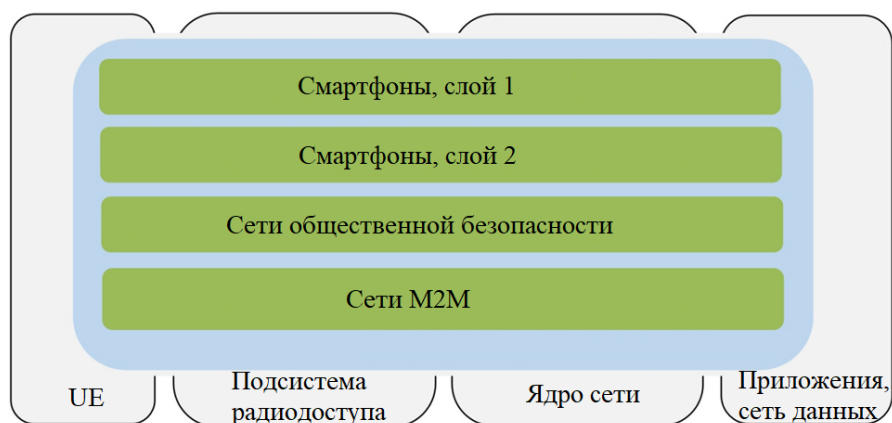


Рисунок 2.12 – Пример слоистой структуры

На рисунке 2.13 показана организация слоев в ядре сети и в подсистеме абонентского доступа. Отметим, что наряду с радиодоступом в сетях 5G NR возможны фиксированные кабельные соединения с абонентами.

Выбор слоя и соответственно необходимых функциональных элементов обеспечивает NSSF (Network Slice Selection Function). В [15] стандартизированы 3 слоя с установленным QoS для следующих услуг:

- мобильное вещание в 5G eMBB (Enhanced Mobile Broadcast),
- сверхнадёжная связь с малыми задержками URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications),
- массивная (разветвлённая) сеть Интернета вещей MIoT (Massive Internet of Things).

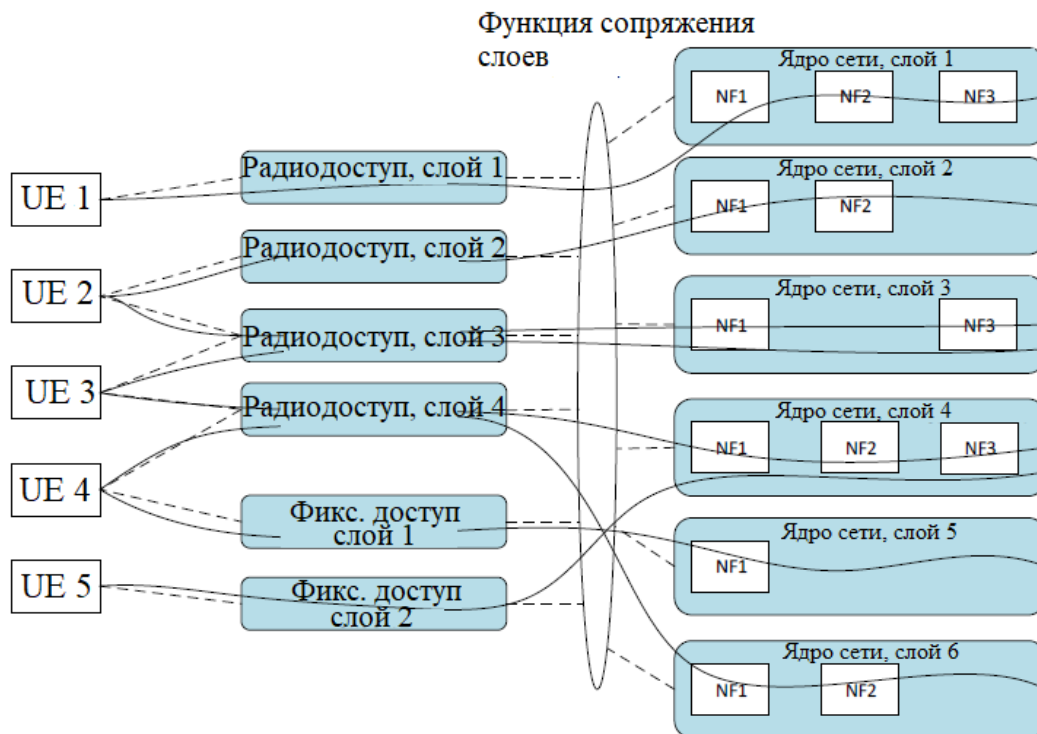


Рисунок 2.13 – Организация слоистой структуры

Обобщенная вертикально-горизонтальная слоистая структура представлена на рисунке 2.14. Вертикальные слои (столбцы) соответствуют услугам разных классов, горизонтальные — совместному использованию и разделению ресурсов на соответствующих протокольных уровнях [18].

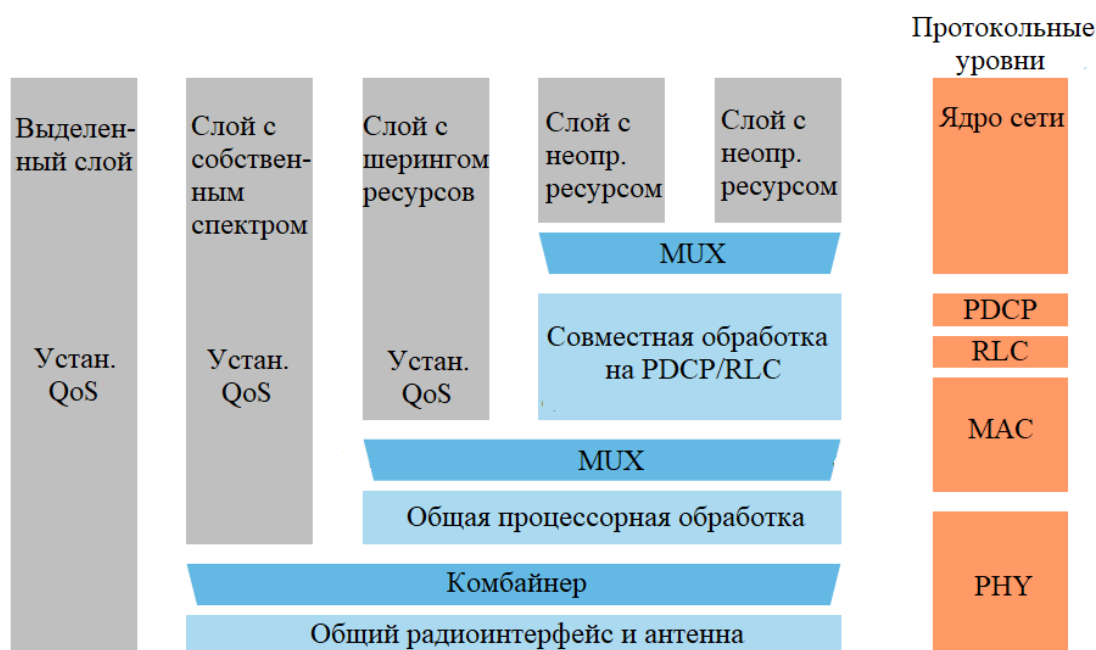


Рисунок 2.14 – Вертикально-горизонтальная слоистая структура

В сравнении с сетями 3G-4G в сетях 5G расширено понятие шеринга (sharing), который распространяется на совместное использование и динамическое распределение сетевых ресурсов как в подсистеме радиодоступа, так и в ядре сети.

3. МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

3.1 Сертифицированная методика оценки качества радиотелефонной связи

Несмотря на работу службы технической эксплуатации и средства мониторинга сети мобильной связи непосредственно в сети оператора, крайне важно производить оценку качества на стороне пользователя. Для этого разработаны параметры оценки качества услуги, отличающиеся от оцениваемых службой эксплуатации, более ориентированные на качество восприятия. Методика оценки качества услуг подвижной радиотелефонной связи [2] разработана с целью унификации правил и требований при проведении мероприятий по оценке качества услуг подвижной радиотелефонной связи, что позволяет участникам отрасли (операторам, абонентам, аналитическим агентствам, надзорным органам, администрациям субъектов Российской Федерации и пр.) получить объективную информацию для оценки качества услуг связи и возможности выбора поставщика услуг. Методика устанавливает требования к проведению оценочных испытаний и последующей обработке для вычисления значений показателей качества услуг связи в сетях подвижной радиотелефонной связи стандартов GSM 900/1800, UMTS 900/2100 и LTE на территории Российской Федерации, а также с целью получения объективной информации по радиопокрытию сетей связи на маршруте измерения. Также, стоит отметить, что в настоящую Методику могут быть внесены изменения исходя из внедрения новых технологий связи.

Методика подробно описывает перечень услуг связи, для которых измеряются показатели качества, а именно: услуги подвижной радиотелефонной связи в части голосового соединения и передачи SMS сообщений и услуги по передаче данных за исключением передачи данных для целей передачи голосовой информации. При этом задается ряд требований, которые необходимо соблюдать при проведении оценки качества обслуживания.

- Общие требования к проведению оценочных измерений заключаются в сборе экспериментальных статистических данных при проведении измерений, имитирующих использование услуг абонентами, для последующей их постобработки для оценки фактических значений показателей качества услуг связи и сравнения полученных оценок между собой.
- Требования к объему наблюдений контрольных вызовов определяются по максимальному значению необходимого числа наблюдений, рассчитанному для каждого показателя качества.
- Требования к планированию маршрутов определяют, что перед выполнением оценочных измерений показателей качества в движении

- должен быть заранее составлен маршрут движения измерительного комплекса в соответствии с объемом работ и требованиями методики.
- Общие требования к проведению оценочных измерений показателей качества услуг подвижной радиотелефонной связи при голосовом соединении, определяют, что контрольные вызовы должны выполняться поочередно для исходящего и входящего вызова.
 - Общие требования к проведению оценочных измерений показателей качества услуг подвижной радиотелефонной связи при передаче SMS сообщений утверждают длину текстового сообщения и ряд других факторов влияющий на качество проводимого эксперимента.
 - Общие требования к проведению оценочных измерений показателей качества услуг связи по передаче данных, за исключением услуг связи передаче данных для целей передачи голосовой информации предоставляют список циклов измерения при передаче данных в движении.
 - Общие требования к измерительному оборудованию выделяют ряд важнейших факторов, влияющих на эксперимент проводимый с комплексом устройств.

Параметр качества услуги сети мобильной связи представляет собой количественную оценку характеристики услуги, полученную в результате измерений и/или опросов пользователей, с помощью которых оценивается показатель качества услуг. Документ, позволяющий подробно рассмотреть параметры качества, представлен на официальном сайте Роскомнадзора: «Программа и методики. Проведения контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи, включая MVNO» [9].

В пункте документа 4.2. «Объем и содержание контроля» приведен перечень параметров качества услуги подвижной радиотелефонной связи, который определяется правилами оказания услуги связи, лицензионными условиями в пределах, указанных в них территорий и с использованием нумерации, присвоенной в порядке, установленном федеральным органом исполнительной власти в области связи, регламентируется ГОСТ Р 53632-2009 [10]. Их разделяют на основные технические параметры качества оказания услуг подвижной связи и параметры, характеризующие уровень обслуживания абонентов (пользователей). К основным техническим параметрам качества оказания услуг подвижной связи относятся:

1. Доля неуспешных попыток вызовов при установлении соединений от общего количества вызовов, в процентах, чьи требования к граничным значениям равны 5, согласно таблице 1 Приказа №113 от 27.09.2007

2. Качество передачи речи (MOS), баллы по пятибалльной шкале, чьи требования к граничным значениям равны не менее 3.5, согласно приказам №44 от 21.04.2008, №47 от 24.04.2008, №1 от 12.01.2009.

3. Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи, в процентах, чьи требования к граничным значениям равны 5, согласно таблице 2 п.п. 5.3 РД 45.254-2002.

4. Среднее время установления телефонного соединения (время доступа к услуге), измеряемая в секундах, чьи требования к граничным значениям равны 8, согласно таблице 2 п.п. 5.3 РД 45.254-2002.

5. Доля неуспешных попыток передачи SMS из-конца-в-конец, в процентах, чьи требования к граничным значениям равны 5.

6. Доля неуспешных попыток передачи MMS из-конца-в-конец, в процентах, чьи требования к граничным значениям равны 5.

Рассмотрим оценку качества мобильной связи. Анализ проходит следующим образом: проводится измерительный сеанс, длительностью от двух до шести часов. Измерения проводятся за счёт использования мобильных измерительных комплексов, которые включают в себя мобильное устройство, анализатор и интерфейс. Перед замером, оператор связи должен предоставить две незаблокированных сим-карты, которые в свою очередь вставляются в мобильный измерительный комплекс. Данное оборудование помещается в специализированные автомобили и начинается драйв-тест.

Драйв-тест представляет собой процедуру, во время которой, по заданному маршруту проезжает специализированный автомобиль. Маршрут должен быть составлен так, чтобы он проходил через все районы, не имел тоннелей и тупиков. По мере движения данного автомобиля, мобильный измерительный комплекс, находящийся внутри автомобиля, посредством интерфейса и мобильного устройства осуществляет звонки на другой мобильный измерительный комплекс или на измерительное оборудование. Длительность одного звонка не превышает 10 секунд. Анализатор в мобильном измерительном комплексе регистрирует входящие или исходящие звонки, регистрирует количество разорванных и успешных соединений, оценивает качество передачи речи по пятибалльной шкале MOS, долю вызовов, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи, среднее время установления соединения, а также долю неуспешных передач SMS и MMS. Используя собранные данные, формируется статистика, основываясь на которой, делается вывод о соответствии или несоответствии качества услуг государственным стандартам.

Процедура оценки качества происходит следующим образом: устанавливаются два зонда (рисунок 3.1) на стороне оператора и на оконечной стороне пользователя. Для виртуальных сетей зонд ставится на сервере доступа. После инициации сеанса зонды начинают передавать друг другу тестовый трафик, который представляет собой последовательность более чем из 100 тыс. пакетов одинакового размера. Анализирующие модули на зондах регистрируют количество потерянных пакетов, среднюю скорость передачи, задержку и дрожание задержки. Замер длится от одного дня до недели.

К параметрам, характеризующим уровень обслуживания абонентов (пользователей) относятся:

1. Максимальное время доступа к службе технической поддержки, измеряемое в минутах, чьи требования к граничным значениям равны 15.

Метод проверки заключается в контрольной сессии доступа к службе технической поддержки.

2. Максимальное время доступа к системе информационно-справочного обслуживания, измеряемое в минутах, чьи требования к граничным значениям равны 1. Метод проверки заключается в контрольной сессии доступа к системе информационно-справочного обслуживания.

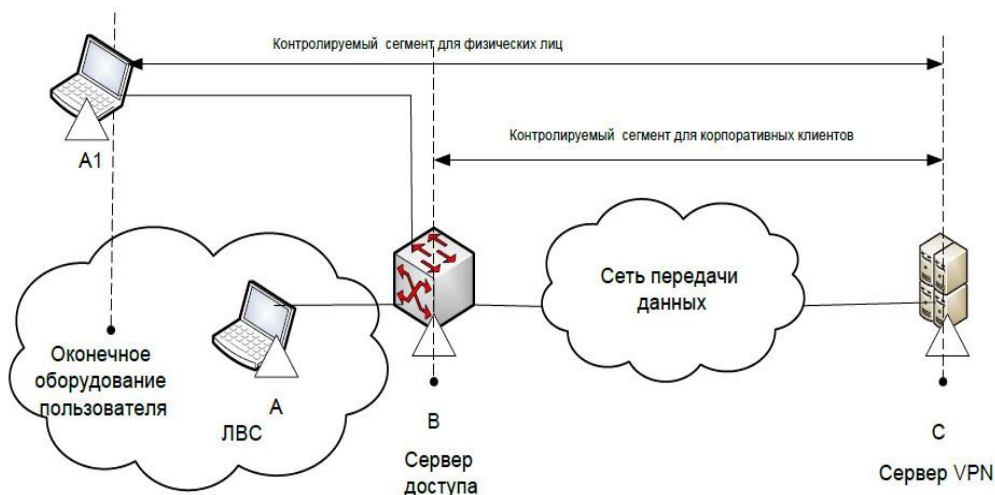


Рисунок 3.1 – Методика оценки качества услуг по передаче данных

Проверки также бывают плановые и внеплановые, а необходимые трудозатраты или время проверки происходят в количестве не более трёх человеко-дней.

Важно отметить требования к составу оборудования. Оборудование тестирования (мониторинга) параметров услуг подвижной радиотелефонной связи (РКОТ) представляет собой радиоизмерительный комплекс с централизованной системой хранения и обработки результатов тестирования, предназначенный для проведения оценочных испытаний и последующей обработки для вычисления значений показателей качества услуг связи в сетях подвижной радиотелефонной связи стандартов GSM, UMTS, LTE. При проведении оценочных измерений при тестировании голосовых услуг и услуг передачи данных необходимы следующие компоненты:

1. Возимое радиоконтрольное оборудование: устанавливаемые в автомобиле удаленные модули тестирования (ВУМТ) или модули RTU (Remote Test Unit) – для постоянного мониторинга качества предоставляемых услуг, которое включает в себя: голосовой модем; модем для передачи данных; GPS антенна; LAN роутер, 5 портов; сканер сетей сотовой связи; сканер сетей; адаптер питания 110\220 В; блок бесперебойного питания; внешняя GPS антенна; внешняя антенна; делитель мощности; комплект батарей 11200 мА/ч; специальное программное обеспечение РКОТ.
2. Носимое радиоконтрольное оборудование: переносимые удаленные модули тестирования (НУМТ) или модули TPR (Test Mobile System Pocket

Remote) для проведения контроля показателей качества голосовых сервисов и сервисов передачи данных внутри зданий и в пешеходных зонах, включающее в себя: модули тестирования НУМТ – для проведения контроля показателей качества голосовых сервисов и сервисов передачи данных внутри зданий и в пешеходных зонах; управляющий планшет – для локальной настройки и управления модулями тестирования ТРР.

3. Локальный модуль для настройки и контроля тестовых устройств ВУМТ;
4. Локальный модуль для настройки и контроля тестовых устройств НУМТ;
5. Серверное оборудование:
 - сервер аппаратного обеспечения бенчмаркинга и тестирования (мониторинга) параметров услуг подвижной связи, а также хранения и постобработки данных;
 - сервер для тестирования параметров передачи речи, а также услуг передачи данных.

Отметим, что все тестовые модули поддерживают технологии GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA, HSPA+, LTE.

С методикой измерений и особенностями оценки качества связи можно ознакомиться на сайте Роскомнадзора <https://rkn.gov.ru>, вкладка «Связь» → «Качество связи». Там же приведены сведения о покрытии магистральных автотрасс услугами ПРТС крупнейшими операторами сотовой связи в табличной форме, качество покрытия оценено в процентах. Результаты измерений качества услуг связи, проводимых Роскомнадзором в населенных пунктах, отражены на сайте <http://качествосвязи.рф/>. Заметим, что измерения проводятся только по разработанным маршрутам, которые пока ориентированы на наибольшие скопления пользователей (рисунок 3.2).

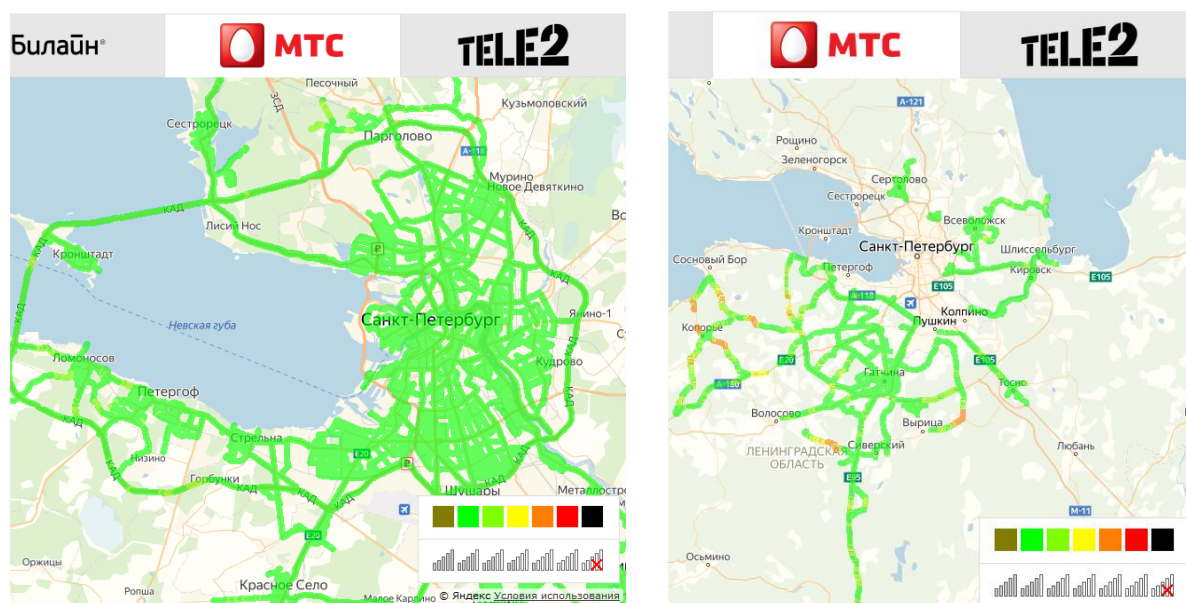


Рисунок 3.2 – Пример карты оценки качества связи 2G одного из операторов для Санкт-Петербурга и Ленинградской области

3.2 Оценка качества связи с использованием специализированных приложений

Оценку качества связи также можно проводить с использованием приложений для операционной системы мобильного телефона. Некоторые из этих приложений имеют как расширенный функционал, достаточный для специалистов, так и бесплатную усеченную версию, подходящую для пользователей, интересующихся качеством мобильной связи.

Чаще всего в список параметров, измеряемых такими приложениями, входят (рисунок 3.3):

- Operator – идентификатор/торговая марка оператора беспроводной связи;
- MCC – мобильный код страны – трехзначный код, специфичный для каждой страны;
- MNC – код мобильной сети – код из 2 или 3 цифр, специфичный для каждого оператора в стране;
- LAC – Код зоны расположения – сеть разделена на зоны местоположения, в которых абонент находится во всех ячейках одновременно;
- RNC – контроллер радиосети – в 3G показывает идентификатор, который контролирует текущую обслуживающую соту;
- CELLID – идентификатор текущей обслуживающей ячейки;
- Type – режим сетевых технологий;
- LEVEL – текущий уровень сигнала в дБм;
- QUAL – качество сигнала сети;
- качество принятых пилотных сигналов: RXQUAL для 2G, ECNO для 3G и RSRQ для 4G.
- SNR – отношение сигнал / шум;
- CQI – индикатор качества канала;
- UL – текущая скорость передачи данных по восходящей линии связи в кбит/с;
- DL – текущая скорость передачи данных по нисходящей линии в кбит/с;
- Data – используемая сеть передачи данных;
- Phone State (IDLE, CALL, DATA) – текущее состояние абонентского устройства;
- Serving Time – текущее время обслуживания ячейки в секундах;
- журнал изменений обслуживающих ячеек со временем изменения и уровень сигнала, на котором это изменение произошло.

Приложения такого типа позволяют проводить измерения как в одной точке, так и следуя по разработанному маршруту. В этом случае за основу может быть взята методика измерения, рассмотренная в п. 3.1. Рассмотрим пример методики измерений, проведенных с использованием смартфона. Отметим, что каждое приложение имеет свои особенности измерения параметров, особенно в области проверки скорости передачи данных, с которыми необходимо ознакомиться в руководстве пользователя.

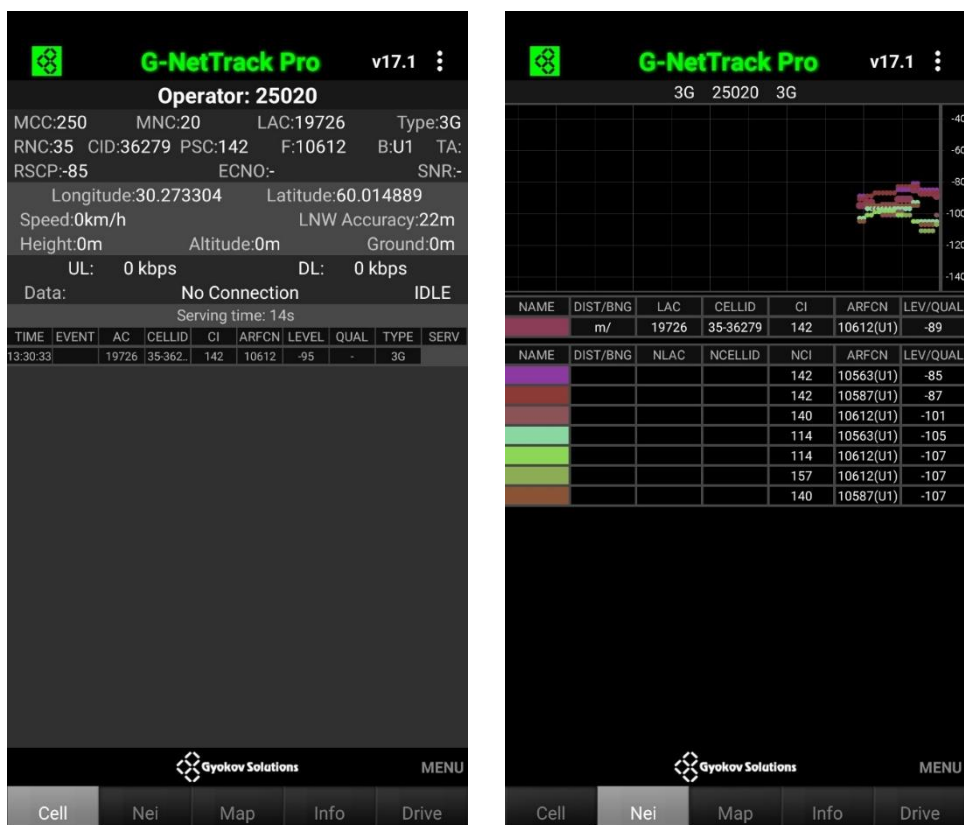


Рисунок 3.3 – Пример отображения параметров связи приложением для смартфона

Пример методики проведения измерений качества связи LTE с использованием специализированных приложений

1. Разработка маршрута, определении ЧНН.
2. Выбор начальной точки проведения измерений на местности и ее отметка на заранее подготовленной карте.
3. Подготовка оборудования: переключение UE в режим LTE-only запуск приложения.
4. Запись полученных данных из приложения.
5. Переход к следующей точке с шагом в 5-10 метров, с отметкой ее на карте.
6. Повторение шагов 3-4 до окончания маршрута.

Пункты методики 5 и 6 зависят от типа приложения. Некоторые приложения производят определение местоположения абонента в автоматическом режиме, поэтому достаточно следовать по разработанному маршруту и отключить сбор данных в конечной точке.

По результатам инспектирования получают log-файлы, которые содержат: данные в формате txt, данные в формате kml и скриншоты маршрута с параметром RSRP. В результате визуализации можно получить тепловые карты, пример которых приведен на рисунке 3.4.

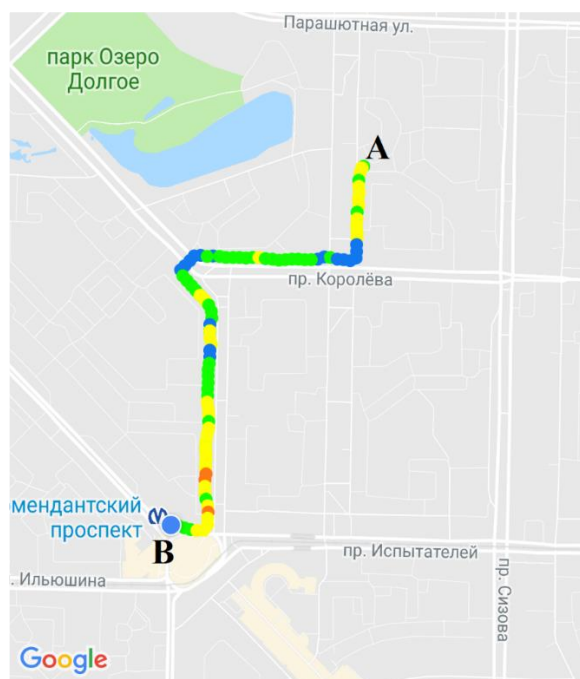


Рисунок 3.4 – Пример карты качества связи, построенной приложением на основе kml-данных

Полученные log-файлы в формате .txt могут быть статистически обработаны любым пакетом для статистической обработки данных.

Отметим, что важно учитывать и технические характеристики устройства, на котором проводились измерения. Это связано с существенным влиянием элементной базы пользовательского устройства, параметров его приемо-передающей части, например, чувствительности, на результаты измерений. Поэтому для проведения сертифицированных измерений обязательно выбираются смартфоны в соответствии с нормативными документами.

4. КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТЯХ WI-FI

Сети стандартов IEEE 802.11 (коммерческое название Wi-Fi) относятся к сетям с коммутацией пакетов и изначально были ориентированы только на передачу данных. Технологии этого семейства предназначены для создания беспроводных локальных сетей (WLAN), входящих в состав корпоративной сети или выступающих как сеть доступа в домашних сетях. Таким образом, WLAN изначально являлись дополнением к технологии Ethernet, наследуя и подходы к обеспечению качества обслуживания.

Важно отметить, что на сетевом уровне в WLAN поддерживают протокол IP, что накладывает определенные ограничения на методы, используемые для поддержки QoS.

Изначально в IEEE 802.11 не предусматривались никакие методы обеспечения QoS, то есть реализовывался режим best effort, обозначающий обслуживание трафика по мере его поступления. Однако, так как это сети беспроводной связи, то необходимо учитывать и влияние радиоканала. Таким образом, можно разделить задачу обеспечения качества обслуживания в IEEE 802.11 на две:

1. Контроль характеристик радиоканала.
2. Обеспечение QoS на канальном уровне.

4.1 Обеспечение качества обслуживания на радиоканале

Решение задачи обеспечения качественных характеристик радиоканала Wi-Fi можно также разделить на две. Первая – минимизация взаимодействия с другими технологиями нелицензируемого частотного диапазона. Вторая – минимизация влияния интерференции и других процессов внутри радиосети IEEE 802.11.

Взаимодействие с другими технологиями в нелицензируемом диапазоне. Как известно, IEEE 802.11 использует два частотных диапазона: 2,4 ГГц и 5 ГГц. Оба диапазона относятся к нелицензируемым, то есть приемопередающие устройства могут в них работать без получения разрешения Радиочастотного центра. Из-за этого происходит переполнение частотного диапазона устройствами, работающими на основе различных технологий и конфликтующих друг с другом. Диапазон 2.4 ГГц используют три популярных технологии: WPAN IEEE 802.15.1 Bluetooth, WLAN IEEE 802.11 и WPAN IEEE 802.15.4 Zigbee:

- Bluetooth, или IEEE 802.15.1, основан на беспроводной радиосистеме, предназначенной для близкодействующих и относительно недорогих устройств. Данная технология позволяет формировать беспроводные персональные сети (WPAN – Wireless Personal Area Network) и объединять их в Scatternet – набор операционных Bluetooth-пикосетей, перекрывающихся во времени и пространстве. Bluetooth работает на частотах от 2402 до 2480 МГц, используя 79 назначенных каналов, каждый

из которых имеет полосу пропускания 1 МГц. В последнее время Bluetooth используется и для решений IoT.

- Zigbee, устаревающая технология на основе IEEE 802.15.4, используется для создания персональных сетей с устройствами небольшой мощности, которым требуется беспроводное соединение, малое энергопотребление аппаратной части и низкая скорость передачи данных. Устройства Zigbee могут передавать данные довольно большие расстояния и использованием mesh-сети. Zigbee поддерживает скорость 250 кбит/с и лучше всего подходит для передачи данных от датчиков и устройств слежения.

В последнее время все больше производителей предлагают решения для умного дома, IoT и т.п., с использованием технологии Wi-Fi. Такой подход привел к насыщению диапазона 2,4 ГГц устройствами и необходимостью расширения частотного диапазона. Диапазон 5 ГГц в Российской Федерации выделен для радиорелейных линий связи прямой видимости, поэтому Wi-Fi 5ГГц разрешено использовать только внутри помещений.

Существуют гетерогенные системы с разнообразными характеристиками радиопередачи, которые работают одновременно в нескоординированном режиме. Однако совместное использование спектра различными устройствами делает системы мешающими друг другу: неизбежно появляются интерференция и значительное ухудшение производительности.

Например, столкновение пакетов, или интерференция, происходит, только когда используются перекрывающиеся частоты в перекрывающиеся периоды времени. На рисунке 4.1 приведен пример столкновения WLAN IEEE 802.11 Wi-Fi и WPAN IEEE 802.15.1 Bluetooth. Как видно из рисунка, второй и третий WLAN-пакеты, соответствующие третьему и седьмому пакетам Bluetooth, порождают коллизии.

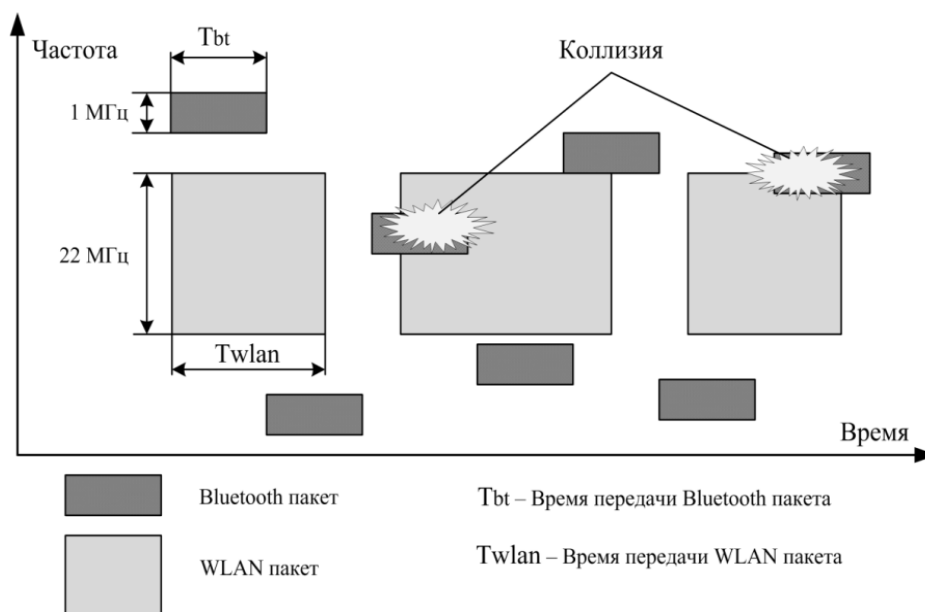


Рисунок 4.1 – Пример столкновения пакетов Wi-Fi и Bluetooth

Второй случай – это взаимное влияние Wi-Fi и ZigBee, использующих один частотный диапазон. Однако Wi-Fi использует высокую мощность по сравнению с ZigBee, т.е. при возникновении интерференции полученные пакеты отбрасываются без восстановления данных. Следовательно, осуществляется повторная передача, которая увеличивает вероятность порождения новых столкновений. Таким образом, интерференция приводит к уменьшению пропускной способности сети, являющейся одним из ключевых показателей QoS, а, следовательно, и к существенному увеличению потерь и задержек, вплоть до критических. Кроме того, увеличивается время ожидания устройством ZigBee доступа к среде для передачи с ожидаемыми потерями пакетов и повторной передачей, что приводит к быстрой разрядке аккумулятора датчика.

В целом, можно заметить, что воздействия Bluetooth, ZigBee на Wi-Fi невелики, так как мощность передачи Wi-Fi намного больше, чем Bluetooth и Zigbee. Поэтому интерференция, вызванная этими технологиями, не вызывает серьёзных проблем в поддержке QoS в сети IEEE 802.11. Проблема поддержки QoS для WLAN заключается больше во взаимодействии беспроводных сетей между собой и компонентов внутри беспроводной сети.

Для уменьшения интерференции используются механизмы сосуществования: совместные и несовместные. Можно сказать, что механизмы сосуществования используются для повышения производительности системы связи при наличии интерференции, а также снижают интерференцию, вызванную на других устройствах, активно действующих в нелицензируемом диапазоне.

Совместные механизмы (collaborative mechanisms) требуют непосредственной связи между технологиями пакетной передачи, использующими один частотный диапазон. Сосуществование реализовано посредством ортогональной передачи в одном временном интервале. Такие механизмы используются в устройствах, имеющих возможность одновременной поддержки этих технологий.

Несовместные механизмы (non-collaborative mechanisms) работают без осуществления какой-либо непосредственной связи между сетевыми модулями различных технологий. Они добиваются сосуществования путем проведения двух взаимоувязанных процессов: классификации каналов и адаптивного управления действиями. Классификация каналов — это процедура, используемая для оценки состояния канала и обнаружения интерференции.

В настоящее время все несовместные механизмы используют для оценки качества канала следующие показатели: BER (Bit Error Rate), FER (Frame Error Rate), PLR (Packet Loss Rate), мощность, SNR (Signal to Noise Ratio), RSSI (Received Signal Strength Indication), LQI (Link Quality Indication), ACK (Acknowledgement), beacon и т.д.

Отметим, что реализация адаптивного управления позволяет использовать результаты классификации каналов для принятия решения об

обслуживании STA с целью уменьшения интерференции. В качестве параметров адаптивной подстройки используются: смена частоты (канала), регулирование мощности передачи, выбор наилучшего типа/длины пакетов, планирование передачи и т.д.

Высокая плотность Wi-Fi-устройств. Еще одна проблема – перегрузка и интерференция между WLAN из-за большого количества точек доступа (AP), развернутых в непосредственной близости между собой. Интерференция между BSS (Basic Service Set – базовый набор услуг, или набор станций, которыми управляет одна координационная функция) является серьезной проблемой. В нелицензируемом диапазоне 2,4 ГГц существует несколько групп трех непересекающихся каналов. Чаще всего реализуется группа 1, 6 и 11 канал. Нехватка частотных ресурсов приводит к возникновению ряда проблем: перекрывающиеся базовые наборы (OBSS – Overlapping Basic Service Set), проблема скрытого узла (HNP – Hidden node problem), проблема незащищенного узла (ENP – Exposed node problems), интерференции между узлами. OBSS возникает в случае, когда две или более BSS работают на том же канале, а передачи некоторых клиентов, принадлежащих к одной BSS, влияют на STA (клиентские станции) в других BSS. Широкий диапазон задержек и ухудшение пропускной способности наблюдаются в зависимости от степени перекрытия и количества, перекрывающихся BSS.

Проблема скрытого узла является довольно серьезной, так как приводит к потерям и, как следствие, ухудшению пропускной способности. В то же время проблема незащищенного узла приводит к снижению производительности. Различают 5 проблем:

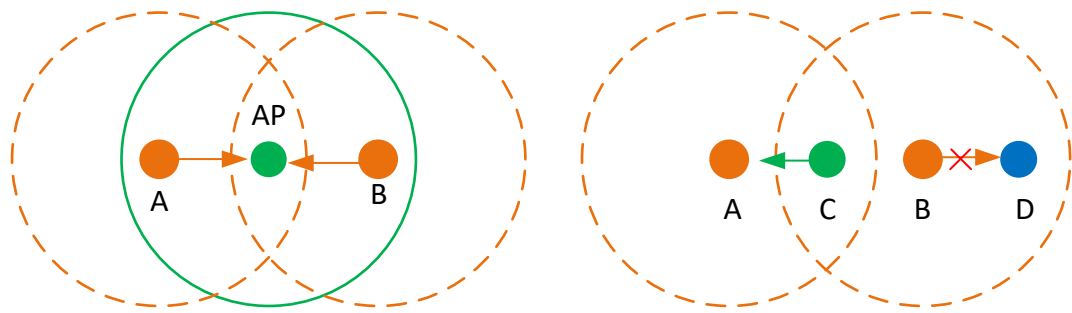
1. Проблема скрытого узла в едином BSS: если STA A и STA B в одном BSS не могут слышать друг друга, любая из них может начать передачу даже в то время как другая передает кадр; кадры этих станций сталкиваются в AP (Рисунок 4.2 а).

2. Проблема скрытого узла между различными BSS: если STA в разных BSS не могут слышать друг друга, коллизии кадров будет происходить в одной или обоих AP в BSS.

3. Проблема скрытого узла с наложенной мощностью: одновременная передача двух STA разрушает кадры, переданные третьей STA. Другими словами, третья STA страдает от проблемы HNP из-за наложенной мощности других двух STA.

4. Проблема незащищенного узла – ненужное восприятие несущей (carrier sensing) передачи STA не позволяет другим STA передавать кадры и наоборот (Рисунок 4.2 б).

5. Проблема незащищенного узла с наложенной мощностью: когда обе STA A и B передают, третья STA C не может инициировать передачу, так как сумма мощности передачи STA A и STA B вводит STA C в заблуждение несмотря на отсутствие столкновений.



а) Коллизия в AP

б) В и С слышат друг друга, В не может инициировать передачу

Рисунок 4.2 – а) проблема скрытого узла б) проблема незащищенного узла

Эти проблемы порождают разные типы интерференции, и наиболее серьезными последствиями являются: отбрасывание связи (*link suppression*), эффект взаимной блокировки (*deadlock effect*) и эффект усиления интерференции.

На рисунке 4.3 показано отбрасывание связи AP-AP. Передача в одном BSS останавливает возможные передачи у других BSS. Это приводит к уменьшению утилизации ссылки передачи: AP2 услышит передачу STA1 – AP1, следовательно, AP2 не может инициировать передачу с STA3. На рисунке 4.4 представлено отбрасывание связи STA-AP: AP1 передает пакеты STA1, STA2 услышит AP1, следовательно, STA2 не может начинать передачу с AP2.

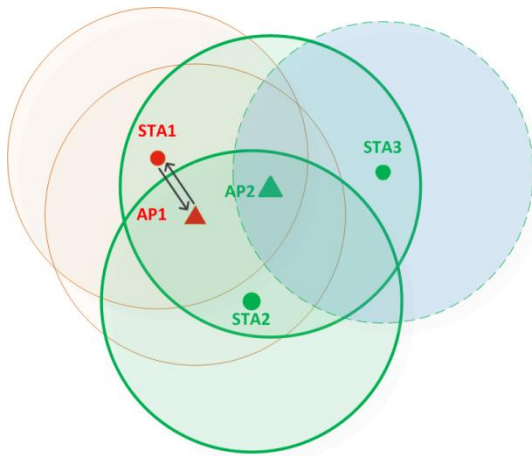


Рисунок 4.3 – Отбрасывание связи AP – AP

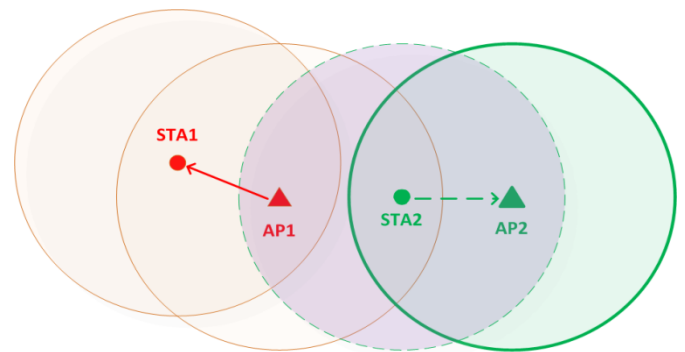


Рисунок 4.4 – Отбрасывание связи STA – AP

Рассмотрим эффект взаимной блокировки (рисунок 4.5). Данный эффект представляет собой следствие существования проблемы скрытого узла и возникает при использовании механизмов RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send): соответствующие точки доступа будут находиться в режиме ожидания, так как не могут ответить сообщением CTS на RTS, который ранее получили от своих ассоциированных клиентов. Обе AP устанавливают NAV (Network Allocation Vector) и никто не отвечает за свое RTS-сообщение: STA1 передает RTS на AP1, AP1 ждет в течении SIFS-интервала и AP2 устанавливает NAV.

В течение SIFS STA2 передает RTS на AP2, однако AP2 не сможет ответить сообщением CTS, и AP1 также устанавливает NAV из-за получения RTS от STA2. Таким образом, эти станции и точки доступа не могут передать данные.

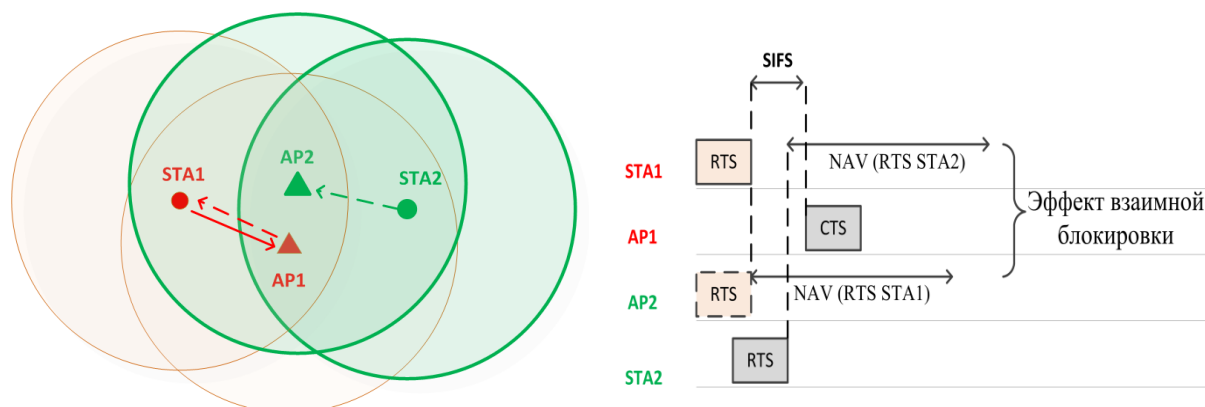


Рисунок 4.5 – Эффект взаимной блокировки

Эффект усиления интерференции происходит тогда, когда столкновения приводят к объединению сигналов и этот комбинированный сигнал может быть сильнее индивидуального сигнала и вызывает интерференцию в более широком диапазоне.

Важно отметить также влияние препятствий на затухание сигнала Wi-Fi. Различные препятствия (стены, потолки, мебель, металлические двери и т.д.), расположенные между Wi-Fi-устройствами, могут частично или значительно отражать/поглощать радиосигналы, что приводит к частичной или полной потере сигнала. В городах с многоэтажной застройкой основным препятствием для радиосигнала являются здания. Наличие капитальных стен (бетон+арматура), листового металла, штукатурки на стенах, стальных каркасов и т.п. влияет на качество радиосигнала и может значительно ухудшать работу Wi-Fi-устройств (таблица 4.6). Внутри помещения причиной помех радиосигнала также могут являться зеркала и тонированные окна.

Таблица 4.6 - Потери эффективности сигнала Wi-Fi при прохождении через различные среды [5]

Препятствие	Дополнительные потери (dB)	Эффективное расстояние*
Открытое пространство	0	100%
Окно без тонировки (отсутствует металлизированное покрытие)	3	70%
Окно с тонировкой (металлизированное покрытие)	5-8	50%
Деревянная стена	10	30%
Межкомнатная стена (15,2 см)	15-20	15%
Несущая стена (30,5 см)	20-25	10%

Бетонный пол/потолок	15-25	10-15%
Монолитное железобетонное перекрытие	20-25	10%

* **Эффективное расстояние** означает, насколько уменьшится радиус действия после прохождения соответствующего препятствия по сравнению с открытым пространством.

4.2 Обеспечение QoS на канальном уровне

Стандартизация качества на канальном уровне Wi-Fi определяется стандартом 802.11e (Wi-Fi Multimedia – WMM), который вносит изменения в MAC-уровень и задает 4 класса трафика согласно категориям доступа (таблица 4.1). При этом WMM обеспечивает QoS для сетей IEEE 802.11, назначая высший приоритет VoIP-трафику (VoWiFi) перед трафиком, менее чувствительным к скорости передачи данных. Таким образом, можно добиться уменьшения флуктуации интервалов между пакетами, вносящей вклад в формирование джиттера задержки, при их прохождении по сети.

Таблица 4.1 - Категории доступа различных типов трафика в WMM

Категория доступа	Описание	Приоритет
Голос (Voice)	Наивысший приоритет. Позволяет осуществлять звонки VoIP с низкими задержками.	7, 6
Видео (Video)	Дает приоритет над передачей данных. Один канал 802.11a или 802.11g может поддерживать один поток телевидения высокой четкости или 4 потока телевидения стандартной четкости. Задержки небольшие и постоянные.	5, 4
Доступ без приоритета (Best Effort)	Трафик приложений, которые не поддерживают QoS. Большие задержки	0, 3
Фон (Background)	Трафик низкого приоритета для передачи файлов, заданий печати для принтера и др. процессов, не требующих определенных значений задержек и пропускной способности	2, 1

Отметим, что приоритет задается согласно спецификации IEEE 802.1p (таблица 4.2), определяющей именно маркировку и работающей совместно с IEEE 802.1.Q, определяющей добавление специальных полей в кадр Ethernet, по которым можно определять принадлежность пакета к VLAN. Как видно из обозначения спецификаций, эти стандарты разрабатывались прежде всего для Ethernet, но сети Wi-Fi на MAC-уровне имеют аналогичный формат кадра. Более того, ряд анализаторов трафика распознают пакеты Wi-Fi как EthernetII. К тому же единые правила маркировки трафика позволяет создавать общее QoS-пространство.

Таблица 4.2 – Категории доступа различных категорий трафика (TC – Traffic Categories)

Priority	802.1P Priority	802.1d Designation	Access Category	WMM Designation

Lowest	1	BK - Background	AC_BK	Background
	2	-		
	0	BE - Best Effort	AC_BE	Best Effort
	3	EE - Excellent Effort		
	4	CL – Controlled Load	AC_VI	Video
	5	VI - Video, < 100 ms latency and jitter		
	6	VO - Voice, < 10 ms latency and jitter	AC_VO	Voice
Highest	7	NC – Network Control		

В кадр добавляется специальное поле QoS (рисунок 4.6), совпадающее с аналогичным в Ethernet и представляющее собой 2 байта, выделенные под флаг квитирования (ack), указание на конец обслуживания и поле с указанием для коммутаторов с поддержкой STP (802.1D). Протокол STP позволяет строить так называемые покрывающие деревья – наборы маршрутов в сетях на коммутаторах, убирающие логические петли. Однако стоит учитывать, что в сетях Ethernet STP вызывает дополнительные задержки уже при числе коммутаторов более 10. В сегментах Wi-Fi данный протокол желательно не использовать.

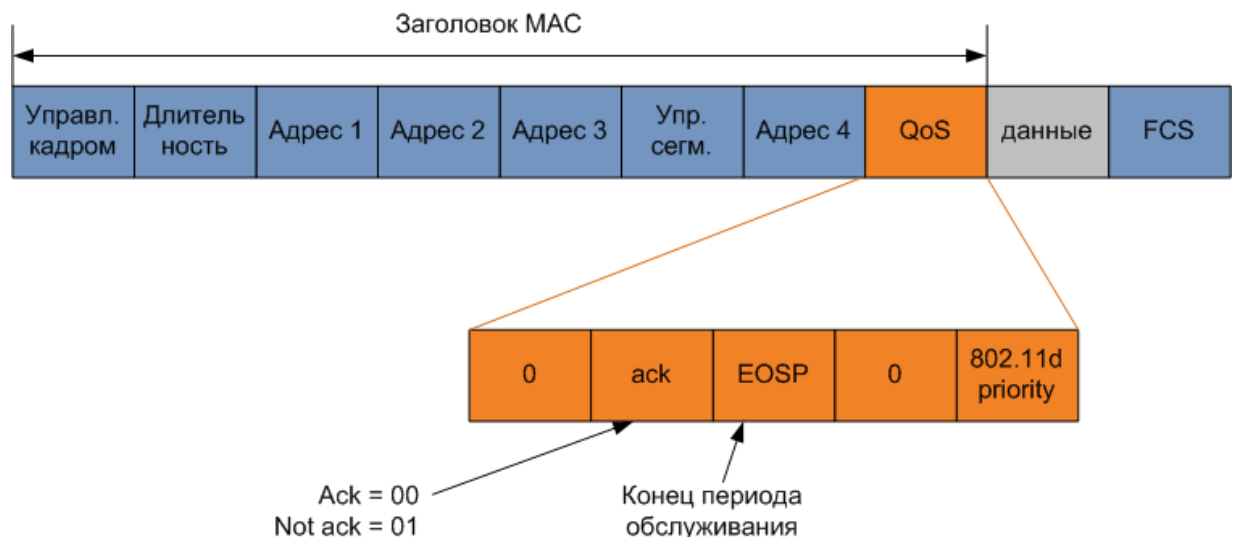


Рисунок 4.6 – Формат кадра с поддержкой WMM

Для того, чтобы организовать в сети Wi-Fi передачу трафика согласно установленным категориям доступа, используются две функции:

- улучшенное распределение функций координации (EDCF) – расширение DCF (Distributed Coordination Function), разделяющего беспроводный ресурс между станциями;

- функция гибридной координации (HCF) – расширение опционального режима PCF (Point Coordination Function), позволяющего централизованно реализовывать координацию станций.

Функция EDCF вводит изменения, касающиеся размера CW-окна и промежутка ожидания, чтобы гарантировать приоритетный доступ различного типа приложениям к среде передачи данных (Таблица 4.3)

Таблица 4.3 – Значения параметров EDCF для некоторых категорий трафика

Параметры	Высокий	Средний	Низкий
AIFS	2	4	7
CW _{min}	7	10	15
CW _{max}	7	31	255
PF	2	2	2

Длительность промежутка обратного отсчета определяется как случайное число $X \in [1, Cw(TC) = 1]$, где $Cw(TC)$ – размер окна для заданной категории трафика (TC). В случае возникновения коллизий формируется новое окно, такое как:

$$newCw(TC) = (PF \cdot (oldCW(TC) + 1)) - 1,$$

где PF – постоянная масштабирования окна, зависящая от категории трафика.

Отметим, что параметры устанавливаются разные для точки доступа и для клиентского устройства (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Параметры WMM

AC	CW _{min}	CW _{max}	AIFS
Клиентское устройство			
AC_BK	aCW _{min}	aCW _{max}	7
AC_BE	aCW _{min}	4(aCQ _{min} +1)-1	3
AC_VI	(aCW _{min} +1)/2-1	aCW _{min}	1
AC_VO	(aCW _{min} +1)/4-1	(aCW _{min} +1)/2-1	1
Точка доступа			
AC_BK	aCW _{min}	aCW _{max}	7
AC_BE	aCW _{min}	4(aCQ _{min} +1)-1	3
AC_VI	(aCW _{min} +1)/2-1	aCW _{min}	2
AC_VO	(aCW _{min} +1)/4-1	(aCW _{min} +1)/2-1	2

Ни рисунке 4.7 показан принцип работы функции EDCF: для трафика высшего приоритета выставляется арбитражный межкадровый интервал AIFS равный межкадровому интервалу функции DCF, что позволяет обслужить высокоприоритетный трафик раньше.

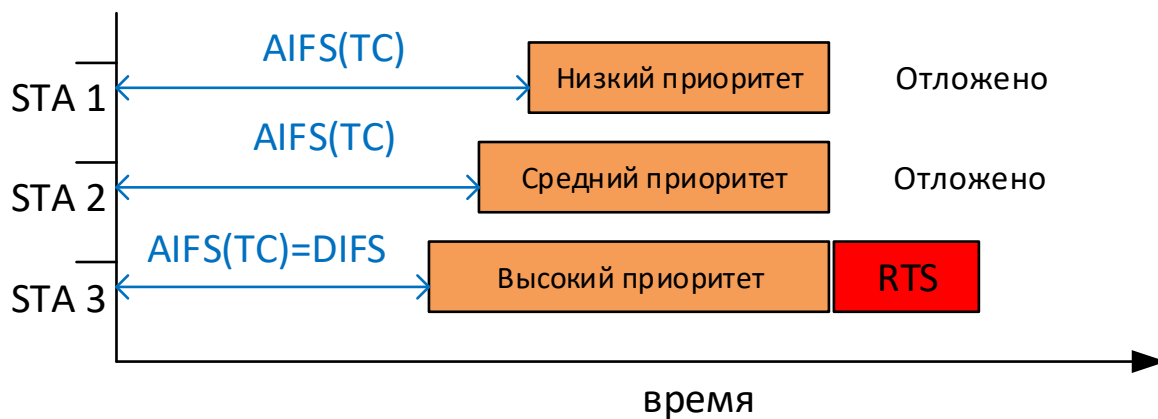


Рисунок 4.7 – Обслуживание высокоприоритетного трафика в EDCF

Режим гибридной функции координации (Hybrid Coordination Function, HCF) является развитием централизованной функции координации PCF (рисунок 4.8):

- Точка доступа является центром координации (НС) и управляет коллективным доступом всех узлов сети к среде передачи данных, для чего опрашивает все узлы сети, внесенные в ее список, и на основании этого опроса организует передачу данных между всеми узлами сети.
- В сетях с HCF в течение определенного промежутка времени CFP реализуется режим бесконкурентного доступа: доступ к среде контролируется точкой доступа, затем следует промежуток конкурентного доступа CP с EDCF. Чередующиеся режимы бесконкурентного и конкурентного доступа образуют суперфрейм.
- Чтобы точка доступа имела бы самый высокий приоритет доступа к среде, промежуток ожидания для точки доступа (PIFS) меньше, чем для всех остальных узлов сети ($PIFS < DIFS < AIFS$).

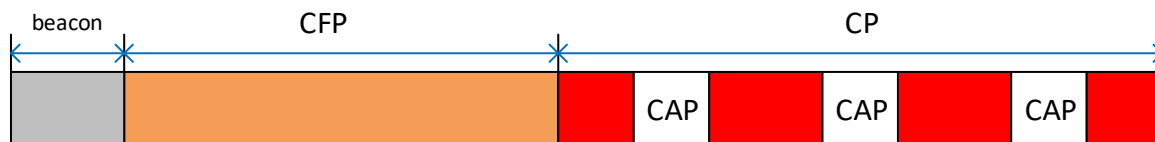


Рисунок 4.8 – Режим HCF

Точка доступа также может получать внеочередной доступ к среде, образуя периоды CAP (Controlled Access Periods). Периоды CAP используются точкой доступа для опроса узлов сети, а периоды CFP – для инициирования обмена данными между узлами сети, а также для опроса узлов сети.

Опросы сети происходят посредством служебных кадров QoS CF_POLL, узлы отвечают на запросы кадрами подтверждения QoS CF_ACK. Точка доступа может передавать кадры данных (QoS DATA), комбинированные кадры опроса и данных (QoS DATA+CF_POLL), комбинированные кадры опроса и подтверждения (QoS CF_ACK+CF_POLL) и комбинированные кадры опроса, подтверждения и данных (QoS DATA+CF_ACK+CF_POLL).

Аналогично и узлы сети могут помимо кадров данных совмещать кадры подтверждения с передачей данных (DATA+CF_ACK).

Фрагментация кадров. Иногда также в сетях можно использовать фрагментацию кадров, если есть необходимость минимизировать задержки для некоторых типов трафика и повысить качество передачи (рисунок 4.9).

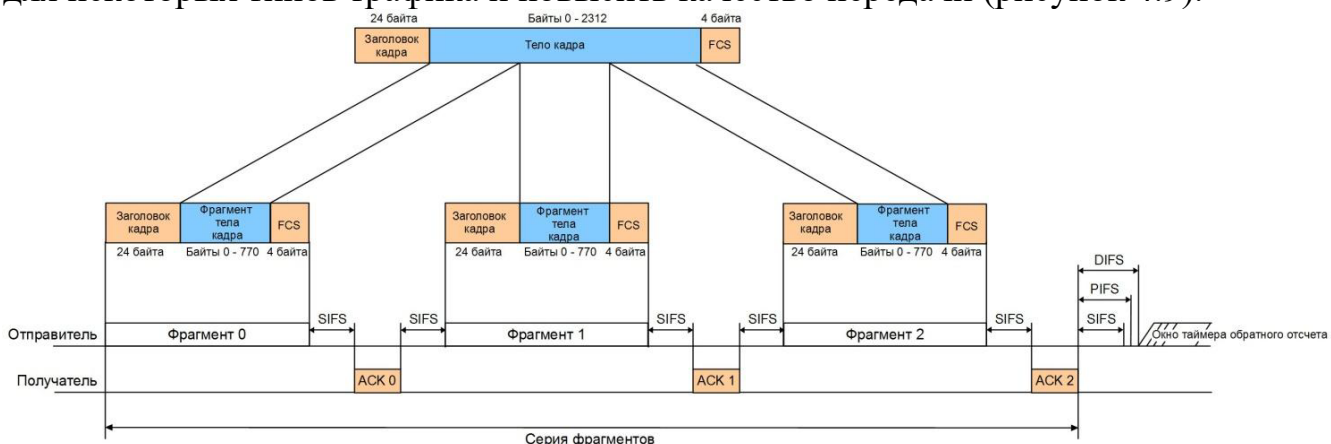


Рисунок 4.9 – Фрагментация кадров

Однако, данный метод крайне редко используется в современных сетях, так как пропускные способности достаточны для удовлетворительного качества услуг. К тому же размеры фрагментов устанавливаются администратором сети самостоятельно, что требует предварительных расчетов, не принося особого выигрыша. Фрагментироваться может только пользовательский трафик, все служебные пакеты и широковещательный трафик фрагментации не подлежат.

СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

3G (Third Generation) — технология третьего поколения;

3GPP (3rd Generation Partnership Project) — сообщество, разрабатывающее спецификации для мобильной связи;

AP (Access Point) - точка доступа;

AQM (Audio Quality Measurement) — оценка качества звука

ARP (Allocation and Retention Priority) — приоритет распределения сетевых ресурсов;

BSS (Basic Service Set) – базовая зона обслуживания;

CI (Cell Identify) — идентификатор соты;

CINR (Carrier to Interference + Noise Ratio) — отношение уровня полезного сигнала к уровню шума;

CQI (Channel Quality Indicator) — индикатор, характеризующий качества канала;

CSFB (Circuit Swith FallBack) — технология предоставления голосового соединения в LTE;

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - механизм коллективного доступа с распознаванием несущей и исключением коллизий;

DCF (Distributed Coordination Function) – функция распределенной координации;

DLL (Data Link Layer) – канальный уровень модели OSI;

DS (Distribution System) – распределительная система многосотовой сети;

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – широкополосная модуляция с прямой последовательностью расширения спектра;

EARCN (eUTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number) — номер частотного радиоканала;

EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution) — увеличение скоростей данных для глобального развития

EFR (Enhanced Full Rate) — расширенный полноскоростной кодек

EMM (EPS Mobility Management state) — состояние клиентского оборудования;

eNB (Evolved NodeB) — обозначение базовой станции в LTE;

FACH (Forward Access Channel) — канал прямого доступа

FER (Frame Erasure Rate) — коэффициент потерянных кадров

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – широкополосная модуляция с перескоком частоты;

GBR (Minimum Guaranteed Bit Rate) — гарантированная скорость передачи;

GPRS (General Protocol Radio Service) — служба пакетной передачи данных

GPS (Global Positioning System) — мировая система определения координат

GSM (Global System for Mobile Telecommunications) — стандарт сети сотовой связи второго поколения

HSPA (High Speed Packet Access) — высокоскоростная пакетная передача данных;

HSR (Handover Successful Rate) — коэффициент успешности хэндовера
HSS (Home Subscriber Server) — сервер абонентских данных сети LTE;
IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – международная организация, созданная в 1963 году, занимается разработкой компьютерных и коммуникационных стандартов;
ISO (International Organization for Standardization) – международная организация по стандартизации;
KPI (Key Performance Indicators) — ключевые индикаторы, отображающие производительность сети
LLC (Logical Link Control) – подуровень логической передачи данных;
LTE (Long Term Evolution) — проект разработки консорциумом 3GPP стандарта усовершенствования технологий мобильной передачи данных CDMA, UMTS
MAC (Media Access Control) – подуровень управления доступом к среде
MIMO (multiple-input multiple-output) – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала;
MOS (Mean Opinion Score) — шкала средней экспертной оценки
MSC (Mobile Services Switching Center) – центр коммутации подвижной связи
NAS (Non-access stratum) — функциональный уровень в сетях UMTS и LTE между ядром сети и пользовательским оборудованием;
OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) – ортогональное частотное разделение каналов;
OSI (Open System Interconnection) – модель взаимодействия открытых систем;
PC (Point Coordinator) – центр координации сети
PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) — элемент сети, осуществляющий тарификацию трафика
PCF (Point Coordination Function) – функция централизованной координации
PCRF (Policy and Charging Rules Function) — часть сети LTE, управляющая начислением платы за услуги связи, и качество соединений
PDCP (Packet Data Convergence Protocol) — протокол сходимости пакетных данных
PDN (Packet Data Network) — сеть передачи данных
PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) — физический канал для передачи информации "вниз" с разделением пользователей
PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) — объективная оценка восприятия качества речи
PGW (Pocket Gateway) — пакетный шлюз
PLMN (Public Land Mobile Network) — сеть сотовой подвижной связи общего пользования
PMI (Precoding Matrix Indicator) — индикатор матрицы предварительного кодирования
PRACH (Physical RACH) — физический канал случайного доступа
PUCCH (Physical Uplink Control Channel) — физический канал управления, несущий управляющую информацию, включая информацию качества канала

PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) — физический канал передачи пользовательского трафика и сигнализации

QCI (QoS Class Identity) — идентификатор класса QoS

QoS (Quality of Services) – качество обслуживания

RI (Rank Indicator) — индикатор класса

RLC (Radio Link Control) — протокол управления радиоканалом

RNC (Radio Network Controller) — контроллер базовых станций UMTS

RRC (Radio Resource Control) — протокол управления радиоинтерфейсом

RRC (Radio Resource Connection) — предоставление радиоресурса

RS (Reference Signal) — пилотный сигнал

RSCP (Received Signal Code Power) — уровень первого сигнала, который получает мобильная станция при подключении к базовой станции

RSCQ (Reference Signal Received Quality) — качество пилотных сигналов

RSRP (Reference Signal Received Power) — уровень сигнала соты

RSSI (Received Signal Strength Indicator) — параметр, который характеризует мощность широкополосного сигнала

RxLev — уровень принимаемого сигнала

RxQual — качество принимаемого сигнала

SACCH (Slow Associated Control Channel) — совмещенный канал управления

SAN (Serving/Active Network Set) — обслуживающая сота

SC (Scrambling Code) — скремблирующий код

SCH (Synchronization Channel) — канал синхронизации

SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel) — индивидуальный канал управления

SDF (Service Data Flow) — обслуживаемый поток данных

SF – коэффициент расширения спектра

SGW (Serving Gateway) — шлюз между ядром сети и сетью доступа

SID (Silence Descriptor) — блок, описывающий параметры «комфортного» шума

SIM (Subscriber Identification Module) — идентификационный модуль абонента

SIR (Signal to Interference Ratio) — отношение сигнал/помеха

SLA () –

SM (Spatial Multiplexing) — пространственное мультиплексирование;

SPR (Subscription Profile Repository) — база данных, которая содержит информацию о подписках и услугах абонента

SQI (Speech Quality Index) — индекс качества речи

TA (Timing Advance) — время упреждения

TCH (Traffic Channel) — канал трафика

TRAU (Transcoder and Rate Adaptation Unit) — транскодер

TSC (Training Sequence Code) — код обучающей последовательности

UE (User Equipment) — абонентское устройство

UE (User Equipment) — оборудование пользователя

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) — технология сотовой связи третьего поколения

VoIP (Voice over Internet Protocol) – технология передачи голоса в сетях с пакетной коммутацией;

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – торговая марка Wi-Fi Alliance беспроводных сетей на базе стандарта IEEE 802.11

WLAN (Wireless Local Area Network) – беспроводная локальная сеть

Услуги – результаты непосредственного взаимодействия поставщика и потребителя и внутренней деятельности поставщика по удовлетворению потребностей пользователя

Мультисервисные услуги – услуги электросвязи, которые поддерживают одновременное использование многих типов средств информации (речь, данные, видео).

Предоставление услуг – любая деятельность, связанная с предоставлением услуги поставщиком услуг, с момента поступления заказа на услугу до момента наличия услуги для ее использования абонентом/пользователем.

Пользователь того или иного объекта, который использует объект соединения (например, инициирует вызовы или отвечает на них) – лицо или объект, не являющееся частью сети, которые используют соединения через сеть для связи.

Абонент – пользователь, отвечающий за оплату услуг.

Оператор сети – организация, которая владеет сетью электросвязи с целью транспортирования носителей услуг электросвязи.

Поставщик услуг – организация, предоставляющая услуги пользователям и абонентам.

Сервисы – совокупность технологий реализации услуг и правил их использования.

Качество восприятия (QoE) – Приемлемость в целом приложений или сервисов с точки зрения субъективного восприятия конечным пользователем.

Качество обслуживания (QoS) – совокупность характеристик услуги электросвязи, которые имеют отношение к ее возможности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности пользователя услуги.

Требования к QoS пользователя/абонента (QoSR) – изложение требований к QoS со стороны абонента/пользователя или сегмента/сегментов совокупности абонентов/пользователей с едиными требованиями к качеству или потребностями в нем.

ЛИТЕРАТУРА

Литература к главе 1

1. Симонина О.А. Качество сервисов и услуг в сетях связи [Электронный ресурс] : учебное пособие / О. А. Симонина ; рец.: Н. А. Соколов , В. С. Елагин ; Федер. агентство связи, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2016. - 91 с.
2. А.Е. Рыжков, М.А.Сиверс, А.С Бабкин, Ф.М. Пыленок и А.П.Трофимов. Сети стандарта LTE. СПб: СПбГУТ, 2014. –254с.
3. Сети мобильной связи LTE/LTE-Advanced технологии 4G, приложения архитектура – Тихвинский В.О/Терентьев С.В./Высочин В.П. 383 с. 2014г.
4. Сети мобильной связи. Технологии и архетектура. В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А. Б. Юрчук 2010г.
5. Antti Toskala, Harri Holma, Esa Tirola, Kari Pajukoski, UTRAN Long Term Evolution in 3GPP,” PIMC 06, Helsinki, Finland .
6. Radio-Electronics.com. Resources and analysis for electronic engineers [Электронный ресурс] / Справочно-информационный интернет-портал Radio-Electronics.com. — Режим доступа: <http://www.radio-electronics.com> , свободный. — Загл. с экрана. Яз. англ.
7. 3GPP. The Mobile Broadband Standard [Электронный ресурс] / Справочно-информационный интернет-портал 3GPP.com— Режим доступа: <http://www.3gpp.org> , свободный. — Загл. с экрана. Яз. англ.
8. Сотовая связь. История. Стандарты. Технология. [Электронный ресурс] / Справочно-информационный интернет-портал CELNET.RU. — Режим доступа: <http://www.celnet.ru> , свободный — Загл. с экрана. Яз. рус.
9. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMAX / А. Е. Рыжков, М. А. Сиверс, В. О. Воробьев, А. С. Гусаров, А. С. Слышков, Р. В. Шунь- ков. – СПб. : Линк, 2012. – 226 с
10. Sassan, Ahmadi. LTE-Advanced. A practical Systems Approach to Understanding the 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. – Oxford : Academic Press, 2014.
11. 4G Mobile Broadband Evolution. 3GPP Release 11 & Release 12 and Beyond. – Feb. 2014. – [http://www.4gamericas.org/documents/4G Mobile Broadband Evolution Rel-11 Rel12 and Beyond Feb 2014 FINAL.pdf](http://www.4gamericas.org/documents/4G%20Mobile%20Broadband%20Evolution%20Rel-11%20Rel12%20and%20Beyond%20Feb%202014%20FINAL.pdf)
12. Brydon A. 3GPP Network Sharing Enhancements for LTE. – May 2013. <http://www.unwiredinsight.com/2013/3gpp-lte-ran-sharing-enhancements>

Литература к главе 2

1. Machina Research. The Global M2M Market in 2018. – January 2018. – http://www.raenitt.ru/publication/M2M_for_LTE.pdf
2. Вишневецкий В. М., Самуйлов К. Е., Наумов В. А., Яркина Н. В. Модель соты LTE с межмашинным трафиком в виде мультисервисной системы массового обслуживания с эластичными и потоковыми заявками и марковским входящим потоком. // Вестник Российского университета дружбы народов. Выпуск № 4. – 2016. – С. 26-36.

3. Cellular Internet of Things. Technologies, Standards and Performance / O. Liberg, M.Sundberg and oth. – Elsevier. 2018 – 369p.
4. 3GPP TS 36.211; Physical Channels and Modulation
5. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа: монография / А. Е. Рыжков [и др.]; рец.: С. Б. Макаров, В. М. Устименко; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб.: СПбГУТ, 2015. - 254 с.
6. Рыжков, А.Е. Гетерогенные сети радиодоступа: учебное пособие / А. Е. Рыжков, В. А. Лаврухин; рец. А. Л. Гельгор, А. Е. Кучерявый; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2017. – 92с.
7. 3GPP TS 36.101; User Equipment (UE) radio transmission and reception
8. GSMA White Paper. LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements Version 2.0 05 April 2018 – <https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads//CLP.29-v2.0.pdf>
9. 3GPP TS 36.213; Physical layer procedures
10. Рыжков А.Е. Развитие технологии NB-IoT.// Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 4 – С. 93-100.
11. 3GPP TS 23.401; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access
12. 3GPP TS 23.682; Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications
13. 3GPP TS 36.101 V15.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception
14. IEEE ComSoc White Papers. A Look at the Future of 5G
15. <https://spectrum.ieee.org/computing/software/a-look-at-the-future-of-5g>
16. 3GPP TS 23.501 V15.0.0. System Architecture for the 5G System; Stage 2
17. Designing Mission Critical Communications Solutions for First Responders. Whitepaper. – 2018// [https://img.en25.com/Web/ArdenMediaCompanyLLC/%7Bb3514115-9302-4e7f-8384c6375cc8d85%7D_Telit_WP_Designing_Mission_Critical_Communications_Solutions_for_First_Responders_\(1\).pdf](https://img.en25.com/Web/ArdenMediaCompanyLLC/%7Bb3514115-9302-4e7f-8384c6375cc8d85%7D_Telit_WP_Designing_Mission_Critical_Communications_Solutions_for_First_Responders_(1).pdf)
18. System architecture milestone of 5G Phase 1 is achieved/ F.Mademann, 2017, December – http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1930-sys_architecture
19. View on 5G Architecture (Version 2.0) – https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2017/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper-2-Summer-2017_For-Public-Consultation.pdf

Литература к главе 3

1. Методика оценки качества услуг подвижной радиотелефонной связи [Электронный ресурс]. – minsvyaz.ru: Официальный сайт Минкомсвязи. – URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4473>

2. Программа и методики. Проведения контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи, включая MVNO [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Москва: 2014. — Режим доступа: <https://rkn.gov.ru/communication/p714/>, свободный
3. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА УСЛУГ ДОСТУПА В ИНТЕРНЕТ. Общие требования. (Parameters of quality of services of the Internet access. General requirements) [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — 01.12.2010. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200082865>, свободный
4. Концепция управления качеством связи в Российской Федерации (проект) // Официальный сайт Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации // URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4668>

Литература к главе 4

1. Группа стандартов IEEE 802.11. Режим доступа: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-standarty>,
2. Качество обслуживания. Режим доступа: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/ios_xe/qos/configuration/guide/convert/qos_overvw_xe/qos_overview_xe.pdf
3. Y.1541 : Network performance objectives for IP-based services / ITU-T Recommendation
4. Обзор стандартов IEEE 802.11. Режим доступа: <http://www.dataexpress.ru/articles/22/>
5. Ограничения в работе Wi-Fi. Режим доступа: <http://help.211.ru/like/wifi+restriction>
6. Параметры качества обслуживания. Режим доступа: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/RTtoWLAN/CCVP_BK_R7805F20_00_rtowlan-srnd/CCVP_BK_R7805F20_00_rtowlan-srnd_chapter_011.pdf, (2013).

ПРИЛОЖЕНИЕ

№	Название KPI	Формула расчета KPI
1	Успешность процедуры Attach, %	<i>SI mode MM:</i> <i>(Attach success times +Attach fail Times(#6 Illegal ME)+</i> <i>+Attach fail Times(#7 Serv not allowed)+Attach fail</i> <i>Times(#8 EPS and non-EPS services not allowed)+</i> <i>+Attach fail Times(#11 PLMN not allowed)+</i> <i>+Attach fail Times(#12 TA not allowed)+</i> <i>+Attach fail Times(#13 Roaming not allowed)+</i> <i>+Attach fail Times(#14 Serv not allowed PLMN)+</i> <i>+Attach fail Times(#15 No Suit Cells In TA)+</i> <i>+Attach fail Times(#19 ESM failure)+</i> <i>+Attach fail Times(#25 Not auth for this CSG))/</i> <i>/ Attach request times x 100%</i>
2	Успешность процедуры TAU в пределах одного MME, %	<i>SI mode MM:</i> <i>(intra-MME TAU success times (without SGW change) +</i> <i>Intra TAU fail times(SGW not change)(#3 Illegal UE) +</i> <i>Intra TAU fail times(SGW not change)(#6 Illegal ME) +</i> <i>Intra TAU fail times(SGW not change)(#7 Serv not allowed)</i> <i>+Intra TAU fail times(SGW not change)(#11 PLMN not</i> <i>allowed) +Intra TAU fail times(SGW not change)(#12 TA</i> <i>not allowed) +Intra TAU fail times(SGW not change)(#13</i> <i>Roaming not allowed) +Intra TAU fail times(SGW not</i> <i>change)(#14 Serv not allowed PLMN) +</i> <i>Intra TAU fail times(SGW not change)(#15 No Suit Cells In</i> <i>TA) +Intra TAU fail times(SGW not change)(#25 Not auth</i> <i>for this CSG) +intra-MME TAU success times (with SGW</i> <i>change) +Intra TAU fail times(SGW change)(#3 Illegal UE)</i> <i>+Intra TAU fail times(SGW change)(#6 Illegal ME) +Intra</i> <i>TAU fail times(SGW change)(#7 Serv allowed) +Intra TAU</i> <i>fail times(SGW change)(#11 PLMN not allowed) +Intra</i> <i>TAU fail times(SGW change)(#12 TA not allowed) +Intra</i> <i>TAU fail times(SGW change)(#13 Roaming not allowed)</i> <i>+Intra TAU fail times(SGW change)(#14 Serv not allowed</i> <i>PLMN) +Intra TAU fail times(SGW change)(#15 No Suit</i> <i>Cells In TA) +Intra TAU fail times(SGW change)(#25 Not</i> <i>auth for this CSG)+ +periodic TAU success times (without</i> <i>SGW change) +</i> <i>Period TAU fail times(SGW not change)(#3 Illegal UE) +</i> <i>Period TAU fail times(SGW not change)(#6 Illegal ME) +</i> <i>Period TAU fail times(SGW not change)(#7 Serv not</i> <i>allowed) +Period TAU fail times(SGW not change)(#11</i> <i>PLMN not allowed) +Period TAU fail times(SGW not</i> <i>change)(#12 TA not allowed)+Period TAU fail times(SGW</i> <i>not change)(#13 Roaming not allowed) +Period TAU fail</i> <i>times(SGW not change)(#14 Serv not allowed PLMN) +</i> <i>Period TAU fail times(SGW not change)(#15 No Suit Cells</i> <i>In TA) +Period TAU fail times(SGW not change)(#25 Not</i> <i>auth for this CSG) +periodic TAU success times (with SGW</i> <i>change) +Period TAU fail times(SGW change)(#3 Illegal</i>

		<i>UE) +13Period TAU fail times(SGW change)(#6 Illegal ME) +Period TAU fail times(SGW change)(#7 Serv allowed) +Period TAU fail times(SGW change)(#11 PLMN not allowed) +Period TAU fail times(SGW change)(#12 TA not allowed) +Period TAU fail times(SGW change)(#13 Roaming not allowed) +Period TAU fail times(SGW change)(#14 Serv not allowed PLMN) +Period TAU fail times(SGW change)(#15 No Suit Cells In TA) +Period TAU fail times(SGW change)(#25 Not auth for this CSG))/(intra-MME TAU request times (without SGW change) + intra-MME TAU request times (with SGW change) + periodic TAU request times (without SGW change) + periodic TAU request times (with SGW change) x 100%</i>
3	Успешность процедуры S1 Paging, %	<i>S1 mode MM: paging success times/paging request times x 100%</i>
4	Успешность процедуры S1 Handover в пределах одного MME, %	<i>S1 mode MM: (intra-MME S1-based handover success times (without SGW change) +intra-MME S1-based handover success times (with SGW change))/(intra-MME S1-based handover request times (without SGW change) +intra-MME S1-based handover request times (with SGW change)) x 100%</i>
5	Успешность процедуры E-RAB Setup, %	<i>S1: SAE bearer setup success times / SAE bearer setup request times x 100%</i>
6	Успешность процедуры Bearer Activation (Default + Dedicated), %	<i>S+PGW Basic Session Measurement: S+PGW successful bearer context creations / S+PGW create bearer context requests x 100%</i>
7	Успешность процедуры Dedicated Bearer Activation, %	<i>S+PGW Basic Session Measurement: S+PGW Successful number of PDN-GW initiated Dedicated Bearer Creation / S+PGW Attempted number of PDN-GW initiated Dedicated Bearer Creation x 100%</i>
8	Пиковая загрузка UGW по трафику DL+UL, %	<i>PGW Forwarding performance measurement: (SGi incoming user traffic peak throughput in KB/s + + SGi outgoing user traffic peak throughput in KB/s) x 8/ / Total UGW throughput in license (Kbit/s) x 100%</i>
9	Утилизация IP пулов для каждого APN, %	<i>S+PGW Basic session measurement (specified APN): S+PGW Max Number of PDN Connections (APN) / IP addresses configured (APN) x 100%</i>
10	Пользовательский трафик SGi	<i>SGi incoming user traffic peak throughput in KB/s + SGi outgoing user traffic peak throughput in KB/s</i>
11	Успешность PDP активации, %	<i>PDP context activation success ratio: Successful PDP context activations x 100%/PDP context activation requests</i>

Рыжков Александр Евгеньевич
Симонина Ольга Александровна

Обеспечение качественных показателей беспроводной связи

Учебное пособие

Редактор ...

Компьютерная верстка ...

План издания 2019 г., п. ...

Подписано к печати XX.XX.20XX
Объем ... усл.-печ. л. Тираж ... экз. Заказ ...

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ

193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ