

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(**Н И У « Б е л Г У »**)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Кафедра информационно-телекоммуникационных систем и технологий

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО
ДОСТУПА В Г. УСТЬ-ИЛИМСКЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

Выпускная квалификационная работа студента

**очной формы обучения
направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные
технологии и системы связи**

**4 курса группы 07001209
Полунина Владислава Витальевича**

Научный руководитель
ст. преп. кафедры
Информационно-
телекоммуникационных
систем и технологий
НИУ «БелГУ»
Е.П. Пеньков

Рецензент
начальник производственно-
технической лаборатории
Белгородского ОРТПЦ
Огнев А.А.

БЕЛГОРОД 2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**
(НИУ «БелГУ»)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ
Направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Профиль: «Системы радиосвязи и радиодоступа»

Утверждаю
Зав. кафедрой

« ____ » _____ 201_ г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Полунина Владислава Витальевича

(фамилия, имя, отчество)

1. Тема ВКР «Проектирование сети беспроводного широкополосного доступа в г. Усть-Илимске Иркутской области»

Утверждена приказом по университету от « ____ » _____ 201_ г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы 6.06.2016

3. Исходные данные:

объект проектирования – город Усть-Илимск Иркутской области;
тип проектируемой сети связи – Беспроводной для взаимодействия с мобильными абонентами;
планируемое количество абонентов – 16564 человек

4. Содержание расчетно-пояснительной записки:

- 4.1. Выбор технологии беспроводной связи, описание объекта для проектирования сети;
- 4.2. Анализ выбранной технологии;
- 4.3. Анализ технических требований к построению и функционированию проектируемой сети;
- 4.4. Выбор оборудования и расчет проектируемой сети;
- 4.5. Технико-экономическое обоснование проекта;
- 4.6. Техника безопасности и охрана труда

5. Перечень графического материала:

- 5.1. Функциональная схема сети
- 5.2. Проектируемая схема сети в городе Усть-Илимск
- 5.3. Проектируемая схема размещения базовых станций
- 5.4. Технико-экономические показатели.

6. Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал	Задание принял
4.1. – 4.4 , 4.6	<i>Старший преподаватель каф. ИТСиТ Пеньков Е.П.</i>		
4.5	<i>канд. техн. наук старший преподаватель каф. ИТСиТ Болдышев А.В.</i>		

7. Дата выдачи задания _____ 25.04.2016г _____

Руководитель

*Старший преподаватель
кафедры Информационно-телекоммуникационных
систем и технологий»
НИУ «БелГУ»*

_____ *Е.П. Пеньков*
(подпись)

Задание принял к исполнению _____
(подпись)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ, ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ.....	6
1.1 Обзор технологий широкополосной беспроводной связи	6
1.2 Эволюция развития мобильной беспроводной связи (GSM).....	8
1.3 Поколение мобильной связи 4G	10
1.4 Сравнение ключевых технологий поколения 4G (LTE и WiMAX).....	11
1.5 Описание объекта для проектирования сети.....	14
1.6 Анализ существующих сетей связи.....	15
2 АНАЛИЗ ВЫБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ	18
2.1 IMT – Advanced	18
2.2 Архитектура базовой сети LTE (SAE).....	19
2.3 Радиоинтерфейс сети LTE.....	24
2.4 Модуляция в LTE.....	30
2.5 Физический уровень LTE.....	38
2.6 Спектральная эффективность сети LTE.....	41
3 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ И ФУНКЦИОНИРОВАЮ СЕТИ LTE.....	48
3.1 Основные технические требования к радиоинтерфейсу сети LTE.....	48
4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СЕТИ....	57
4.1 Выбор оборудования транспортной сети.....	57
4.2 Выбор оборудования базовой станции eNode Band LTE.....	61
4.3 Расчет бюджета радиолинии.....	66

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		<i>Полунин В.В.</i>			Проектирование сети беспроводного широкополосного доступа в г. Усть-Илимске Иркутской области	Лит.	Лист	Листов
Провер.		<i>Пеньков Е.П.</i>					2	100
Рецензент		<i>Огнев А.А.</i>				<i>НИУ «БелГУ», гр.07001209</i>		
Н. контр.		<i>Пеньков Е.П.</i>						
Утв.		<i>Жуляков Е.Г.</i>						

4.4	Расчет радиуса действия базовой станции.....	70
4.5	Расчет пропускной способности и количества eNode Band.....	72
4.6	Частотное планирование сети LTE в городе Усть-Илимск.....	77
4.7	Ситуационное расположение eNB на территории Усть-Илимска.....	79
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА В ГОРОДЕ УСТЬ-ИЛИМСК.....	
5.1	Расчет капиталовложений.....	82
5.2	Калькуляция эксплуатационных расходов.....	83
5.3	Калькуляция доходов.....	88
5.4	Определение оценочных показателей проекта.....	90
6	ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА.....	
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	99

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент весь мир наблюдает за очень быстрым развитием технологий широкополосной беспроводной связи. В связи с непрекращающимся прогрессом в микроэлектронике, позволяющим создавать всё более сложные (и при этом более дешевые) средства беспроводной связи, развитие беспроводных цифровых коммуникаций происходит чрезвычайно быстро. Не для кого не секрет, что количество мобильных устройств увеличивается с каждым днём, это способствует увеличению спроса на различные высокоскоростные сервисы и следовательно увеличению объёмов трафика в сетях связи. Бум сотовой связи, сравнимый лишь с ростом производства персональных компьютеров и развитием Интернета, не замедляется уже четверть века. В связи с этим происходит внедрение сетей четвертого(4G) поколения, позволяющих увеличить пропускную способность и качество связи.

Низкая стоимость, быстрота развертывания, широкие функциональные возможности по передаче данных, телефонии и видеопотоков делают беспроводные сети одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. Также имеется необходимость внедрения новых услуг передачи данных из-за высокой насыщенности рынка голосовых услуг и высокой конкуренции. Предоставление абонентам мультимедийных услуг требует высокой пропускной способности каналов. Технологии 2G и 3G не обеспечивают высокой частотной эффективности, что является серьезной проблемой на пути обеспечения высокого качества услуг. На данный момент объем передачи данных превзошел объем передачи звуковых сообщений, что еще раз доказывает актуальность развёртывания сетей с большой пропускной способностью. Очевидно, что с помощью существующих сетей удовлетворить запросы абонентов практически невозможно, поэтому внедрение сетей 4G является актуальным.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		4

Целью данной выпускной квалификационной работы является углубление теоретических знаний в области технологий радиодоступа и приобретение практических навыков проектирования сетей широкополосного радиодоступа.

Задачи данной выпускной квалификационной работы:

1. анализ существующих сетей связи в г. Усть-Илимске;
2. выбор варианта реализации абонентского доступа в сеть Интернет в г. Усть-Илимске;
3. анализ выбранной технологии;
4. анализ рынка оборудования и выбор оптимального решения;
5. расчет пропускной способности сети и бюджета радиолинии;
6. рассмотрение вопросов по технике безопасности и охране труда;
7. технико-экономическое обоснование проектируемой системы.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		5

1 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ, ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ

1.1 Обзор технологий широкополосной беспроводной связи

Формирование беспроводной связи сопровождается постоянной сменой технологий, в базе которых лежат стандарты сотовой связи GSM и CDMA, а также стандарты систем передачи данных IEEE 802 (см. рисунок 1.1). Исторически технологии беспроводной связи развивались по двум независимым направлениям – системы телефонной связи (сотовая связь) и системы передачи данных (Wi-Fi, WiMAX).

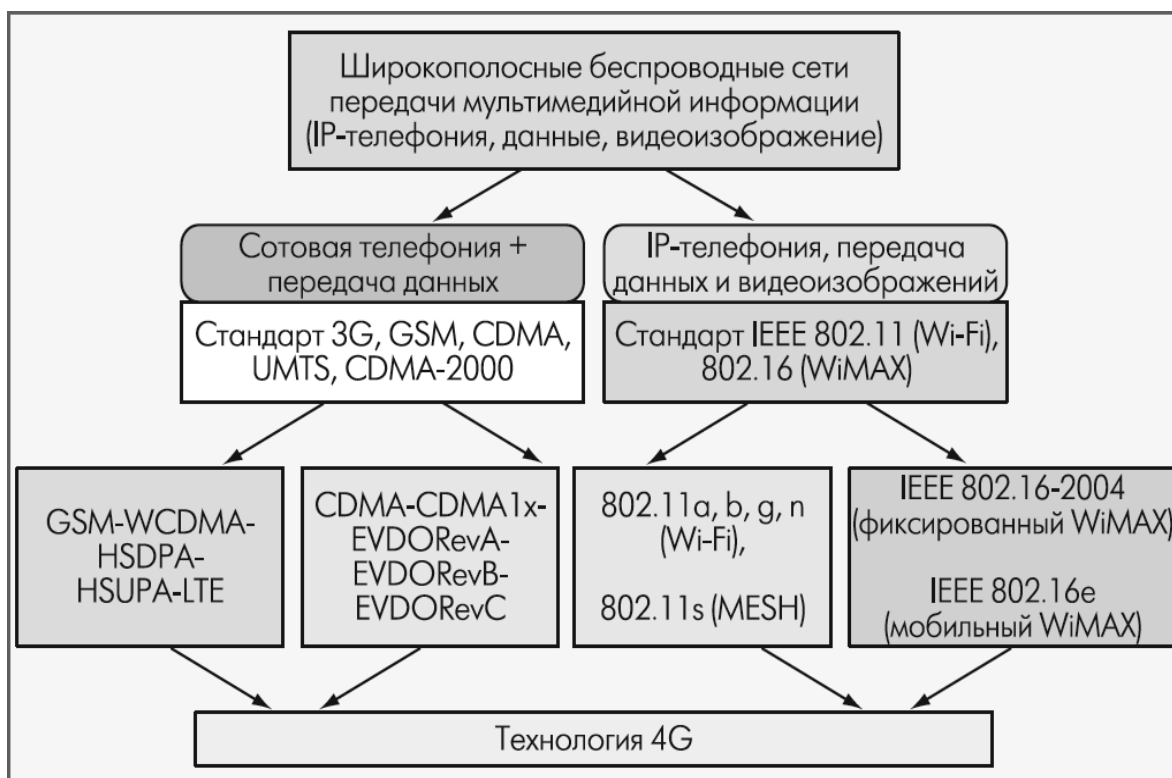


Рисунок 1.1 – Главные пути развития технологии широкополосной связи

Однако в последнее время наблюдается явная тенденция к слиянию данных функций. Более того, объем пакетных данных в сетях сотовой связи третьего поколения (3G) уже превосходит объем голосового трафика (см. рисунок 1.2), что связано с внедрением технологий HSPA [2]. В свою очередь,

инновационные сети передачи данных непременно обеспечивают заданную степень качества услуг (QoS) для разных видов трафика. Реализуется поддержка присваивания приоритетов отдельных потоков информации, при этом как на сетевом/транспортном уровнях (на уровне TCP/IP), так и на MAC-уровне (стандарты IEEE 802.16).

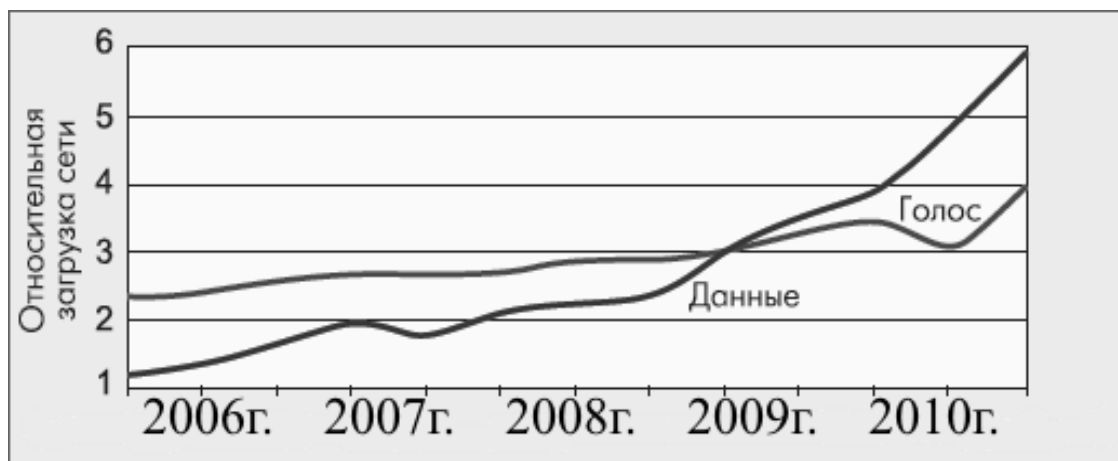


Рисунок 1.2 – Сравнение объемов трафика голоса и данных в сетях WCDMA

Это позволяет применять их для оказания услуг голосовой связи, передачи мультимедийной информации и т.п. В связи с этим само понятие сетей последующего, четвертого, поколения (4G) прочно связано с созданием универсальных мобильных мультимедийных сетей передачи информации. Сейчас две технологии, очевидно, нацелены на оказание универсальных услуг связи. Это WiMAX и технология LTE (Long Term Evolution). При этом каждая из них занимает свою нишу на широком рынке беспроводной связи.

Разработка технологии фиксированного WiMAX (IEEE 802.16) не оправдала возлагавшихся на нее надежд по быстрдействию, размеру зоны покрытия и ценовой политики. Однако операторы справедливо ожидают качественного прорыва от мобильного WiMAX (IEEE 802.16e), который уже начал активно внедряться во всех странах мира, включая Россию.

Но требования конечных пользователей к предоставляемым услугам (см. рисунок 1.3.) непрерывно увеличиваются. Мобильные сети должны использоваться не только для сотовой связи, но и для передачи видео,

мобильного ТВ, музыки и работы с Интернетом с высочайшими скоростями и качеством передачи.

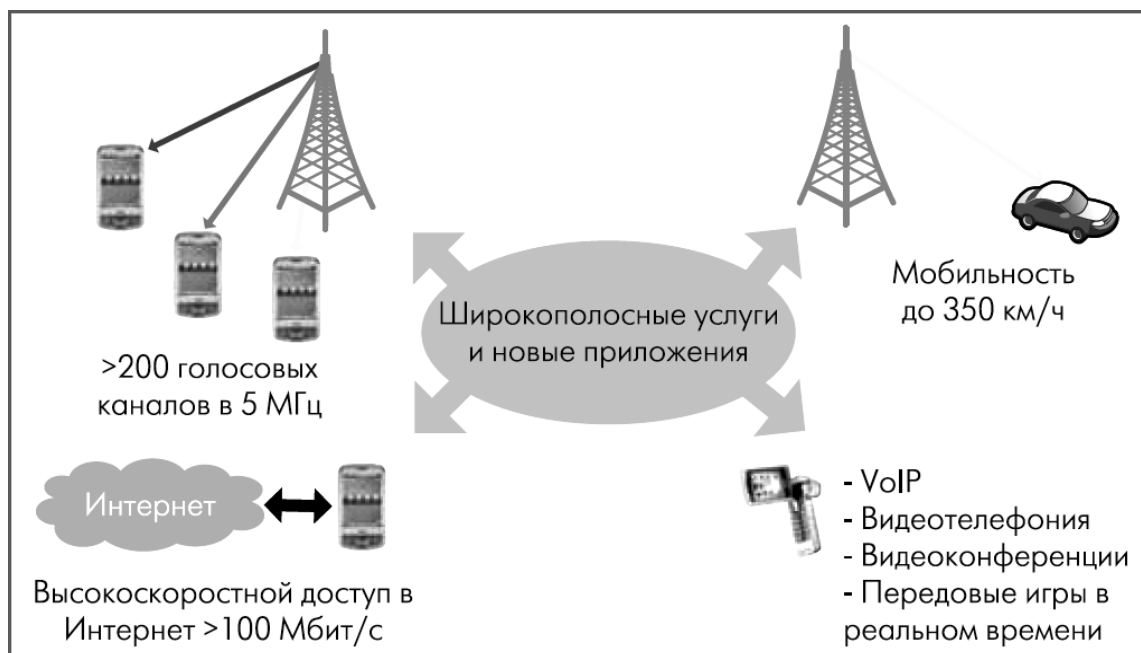


Рисунок 1.3 – Сервисы широкополосного мобильного доступа

Конкретно с данной целью в рамках проекта сотрудничества в разработке сетей последующего поколения 3GPP (3G Partnership Project) была начата разработка технологии LTE.

1.2 Эволюция развития мобильной беспроводной связи (GSM)

В конце 1990-ых с целью развития спецификаций для технологий GSM был образован 3GPP (3rd Generation Partnership Project) – организация, ответственная за разработку, поддержку и развитие семейства стандартов GSM. GSM (от названия группы Groupe Spécial Mobile, позже переименован в Global System for Mobile Communications) (русск.СПС-900) — глобальный цифровой стандарт для мобильной сотовой связи, с разделением частотного канала по принципу TDMA и средней степенью безопасности. Разработан под эгидой Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) в конце 80-х годов.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		8

С того времени все стандарты, связываемые с технологией GSM разрабатываются и обслуживаются 3GPP. 3GPP, как предполагает его имя, состоит из ряда партнеров. Эти партнеры представляют собой организации по стандартизации, расположенные по всему миру и отвечающие за: одобрение и обслуживание границ действия 3GPP, выделение ресурсов, и работу в качестве апелляционного органа по процедурным вопросам.

Изначально, GSM разрабатывалась в качестве сети с коммутацией каналов, которая отлично подходит для передачи голоса, но совсем не подходит для передачи данных. Все изменилось с принятием General Packet Radio Service (GPRS) стандарта. GPRS предоставил способ пересылки пакетов по сети GSM, и его часто описывают, как 2,5G стандарт.

Возможности передачи данных по сетям GSM продвинулись еще дальше с принятием стандарта Enhanced Data Rates for GSM Evolution, также известного как EDGE. Представленная в 2003 технология EDGE обеспечивает втрое более высокую производительность по сравнению с GPRS и сама по себе является 3G технологией, основанной на ITU спецификациях для 3G.

Возможности передачи данных были еще больше улучшены с выпуском очередного 3G стандарта от 3GPP под названием High Speed Packet Access (HSPA). HSPA сети теоретически могли обеспечивать нисходящей передачи данных до 14 МБ/с. Поэтому HSPA сети должны были обеспечивать значительный прирост нисходящей скорости передачи данных; однако на практике это не подтвердилось. К примеру, в начале 2009 года компания Vodafone провела тест HSPA+ сети, обещавшей нисходящую скорость обмена данными до 16 МБ/с, однако они признали, что большинство пользователей получит скорость загрузки, не превышающую 4 МБ/с.

HSPA+, также известная под названием Evolved HSPA, является расширением базового стандарта HSPA и обеспечивает теоретически возможную скорость загрузки данных до 56 МБ/с. Дополнительным аспектом технологии HSPA+ стала необязательная архитектура all-IP. Архитектура all-IP является основной инновацией в отрасли беспроводных телекоммуникаций, а

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		9

также необходимым элементом для LTE. HSPA+ также использует антенную технологию под названием MultipleInput/MultipleOutput (MIMO). Как и all-IP архитектура, MIMO является технологией, также используемой в LTE.

Итак, если взглянуть на то, с чего начинали технологии GSM, как сеть с коммутацией каналов, предназначенная для эффективных голосовых приложений высокой мобильности, и где они находятся сегодня с EDGE, HSPA и HSPA+, становится ясно, что 3GPP прогрессивно развивало GSM стандарт, чтобы сделать его стандартом обмена данными высокой мобильности (к этим данным голос тоже относится). Наряду с постоянным и значительным увеличением скорости обмена данными, 3GPP также представила значительные изменения архитектуры, необходимые для осуществления их задачи по достижению максимальных возможностей GSM в третьем поколении и переходе к четвертому поколению [3].

1.3 Поколение мобильной связи 4G

На данный момент за приоритетное право называться ведущей технологией 4G борются: технология Wimax (основана на стандарте IEEE 802.16e) и мобильный протокол передачи данных 3GPP Long Term Evolution (LTE)

Основная технология 4G – OFDM (ортогональное частотное уплотнение).

Существует много различных мнений о будущем сетей 4 поколения: выбор стоит между мобильным WiMAX и LTE, хотя в последнее время все больше компаний мобильного сектора отдают предпочтение именно последнему.

Long Term Evolution (LTE) также представляет собой 3G-стандарт беспроводного широкополосного доступа, LTE – последний стандарт семейства GSM, развитый на основе GSM на базе архитектур от коммутации каналов до All-IP. После стандарта General Packet Radio Service (GPRS), включая стандарты

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		10

Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) и High Speed Packet Access (HSPA), стандарты GSM постепенно, но неумолимо, переходят к архитектуре All-IP.

1.4 Сравнение ключевых технологий поколения 4G (LTE и WiMAX)

На этот момент большее предпочтение в РФ отдается технологии LTE. Это связано с тем, что технология LTE - это результат эволюции стандартов UMTS/HSPA, HSPA+ и поэтому более перспективна для операторов, имеющих сети 2G/3G из-за возможности интеграции LTE в уже существующие сети. У WiMAX нет такой возможности, так как этот стандарт является отдельной ветвью эволюции мобильного широкополосного доступа.

Как можно заметить, количество устройств поддерживающих технологию LTE очень быстро увеличивается, вскоре всего это связано с хорошей оценкой перспективности данной технологии. У WiMAX дела обстоят намного хуже. На сегодняшний день численность WiMAX-устройств, сертифицированных WiMAX forum, исчисляется несколькими десятками.

К превосходствам LTE относится разработка бесшовного взаимодействия (выбор сети, хэндовер) – прежде всего с сетями GSM и WCDMA, а еще большой выбор вариантов взаимодействия сети LTE с сетями остальных семейств: Wi-Fi, CDMA2000, WiMAX.

Операторы уже в течение долгого времени создают сети 2G/3G, которые сейчас плавно эволюционируют к LTE. Разработчики и поставщики оборудования LTE обеспечили возможность переиспользования частот (рефарминг частот), которые уже выделены, что открывает сетям LTE путь в жизнь на уже имеющихся у операторов частотных ресурсах. Лучше заменить сети 2G сетями LTE, потому что сети 3G имеют ковровое покрытие. Сравнение LTE и WiMAX представлено в таблице 1.1, из которой видно, что стандарт LTE превосходит по ряду параметров стандарт WiMAX. Это в первую очередь

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		11

связано с тем, что стандарт LTE был разработан на несколько лет позже технологии WiMAX, в котором были учтены и исправлены ряд недочетов стандарта WiMAX.

Таблица 1.1– Сравнение характеристик систем LTE и мобильного WiMAX

Характеристика	LTE	WiMAX	Влияние на систему
Многостанционный доступ	OFDMA на DL, SC-FDMA на UL	OFDMA на DL и UL	SC-FDMA: снижается пик-фактор, упрощается терминал, повышается КПД
Диспетчеризация частотных ресурсов	Селективная	Рандомизирующая	Частотная селективная диспетчеризация - дополнительный энергетический выигрыш
Заголовки/ служебная информация	Сравнительно малые заголовки	Достаточно большие заголовки	Снижение заголовков повышает спектральную эффективность
Объединения пакетов в HARQ	Incremental redundancy	Chase combining	Дополнительные энергетический выигрыш при использовании Incremental redundancy
Задержка на обработку пакетов	10 мс	30 мс	Упрощенная архитектура сети LTE позволяет снизить задержку
Адаптация системы к каналу	Высокая точность (1-2 дБ)	Грубая настройка (2-3 дБ)	Адаптация системы с высокой точностью повышает спектральную эффективность
Управление мощностью	Частичное управление мощностью	Классический алгоритм	Частичное управление мощностью - компромисс между пропускной способностью на краю и в сумме по соте
Переиспользование частот	Коэффициент 1	Коэффициент 3	Меньше коэффициент, выше спектральная эффективность

Из таблицы 1.2 видны преимущества технологии LTE. Но в ключевых параметрах наблюдается большая схожесть, это связано с тем, что в LTE

используются технологии и методы, которые уже реализованы в WiMAX. (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2– Сравнение ключевых параметров LTE и WiMAX

Параметр	Мобильный WiMAX	3GPP-LTE (E-UTRAN)
Тип сети	WiMAX Forum ALL-IP network	UTRAN, движущийся в направлении у All-IP Evolved UTRA CN с IMS
Технология множественного доступа: Прямой канал (DL) Обратный канал (UL)	OFDMA OFDMA	OFDMA SC-FDMA
Битовые скорости: DL UL	75 Мбит/с (MIMO 2x2) 25 Мбит/с	100 Мбит/с (MIMO2x2) 50 Мбит/с
Ширина полосы радиоканала	5; 8,75; 10 МГц	1.25 – 20 МГц
Радиус ячейки	2-7 Км	5 Км
Емкость ячейки	100-200 пользователей	Более 400 пользователей при полосе свыше 5 МГц
Спектральная эффективность	3.75 бит/сек/Гц	5 бит/сек/Гц
Мобильность: Скорость перемещения Переходы из ячейки в ячейку	До 120 Км/ч Жестко регламентированы	до 250 Км/ч Гибкость перехода из ячейки в ячейку
Наследуемые стандарты	От IEEE 802.16a до 16d	GSM/GPRS/EGPRS/UMTS/HSPA
Параметры MIMO: DL UL Количество кодовых слов	2x2 1xN 1	4x4 2x2 2
Стандартизация	IEEE 802.16e-2005 PHY и MAC CN стандартизован Форумом WiMAX	RAN (PHY+MAC)+CN
Роуминг	Новый (разработан Форумом WiMAX)	Автоматический (разработан для GSM/UMTS)

В общем виде технологии LTE и WiMAX схожи по своим характеристикам, но на данный момент в России большее применение получила именно технология LTE, из-за возможности интеграции в существующие сети с минимальными затратами.

1.5 Описание объекта для проектирования сети

Внедрение новой технологии будет описано на примере города Усть-Илимска. Усть-Илимск — город в России на северо-западе Иркутской области на реке Ангаре. Площадь города составляет 229 квадратных километров с численностью населения в 82820 человек. Но фактически город расположен на площади $\approx 90\text{км}^2$. Город поделён на 2 части рекой Ангарой. Левобережная часть города зовётся старым городом, а правобережная - новым. Старый город старше нового на 5 лет. Плотность застройки – в общем средняя, также имеется частный сектор в черте города. Усть-Илимск на карте показан на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Карта города Усть-Илимск.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		14

1.6 Анализ существующих сетей связи

Для того чтобы проектирование сети широкополосного беспроводного доступа имело актуальность и было конкурентоспособным, нужно в начале проектирования проанализировать существующую сеть связи: определить действующих операторов связи и набор предоставляемых ими услуг, а также выяснить технологии, на основе которых действующие операторы предоставляют свои услуги абонентам сети. В настоящее время в городе Усть-Илимск неплохо развит Интернет, проводное покрытие охватывает практически весь город, провайдеры предлагают безлимитные тарифы со скоростями до 100 Мбит/сек. Но статистика показывает, что средняя скорость передачи данных по проводным сетям около 20 Мбит/сек. На данный момент в Усть-Илимске насчитывается 5 интернет провайдеров. Оператором, в наибольшей мере предоставляющим услуги широкополосного доступа является ОАО «Ростелеком». Из них 3 предоставляют доступ в Интернет своим пользователям по технологии ADSL. Технологию FTTB используют 2 провайдера. Среди провайдеров Усть-Илимска домашний интернет подключают 5 компаний, интернет в офис – 3. И наконец, обеспечивают мобильным интернетом 3 провайдера. Абоненты частного сектора имеют доступ к глобальной среде Internet посредством технологии HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access — пакетная передача данных от базовой станции к мобильному телефону) благодаря использованию 3G модемов у операторов мобильной связи «МТС», «Теле2» и «МегаФон».

Однако предоставить качественные мультисервисные услуги связи по существующим беспроводным информационным каналам всем жителям города операторы сотовой связи не могут, так как каналы связи в данной технологии недостаточно широкополосные, и передача мультимедийного контента затруднительна. В связи с тем, что прокладывать новую кабельную инфраструктуру экономически не целесообразно, было принято решение применение беспроводных технологий широкополосного доступа для

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		15

реализации цели проекта. Строительство новой беспроводной сети с чистого листа потребует огромных вложений и не будет столь рентабельна, как модернизация существующей сети. Поэтому для актуальности проекта данная работа написана в виде технических рекомендаций для усовершенствования сети провайдера «МегаФон». «Мегафон» это один из крупнейших российских операторов сотовой связи, занимает третье место по абонентской базе и лидирует на рынке мобильного доступа в Интернет. В качестве общероссийской компании «Мегафон» начал работать в 2002 году, до этого под названием ЗАО «Северо-Западный GSM» вел деятельность как региональный оператор. С появлением «Мегафона» и была сформирована так называемая «большая тройка» сотовых операторов России. В городе Усть-Илимск сеть сотовой связи оператора «Мегафон» покрывает большую часть территории, включая прилегающие к городу поселки. «Мегафон» уже провел модернизацию своей сети до стандарта третьего поколения связи. Покрытие Усть-Илимска сетью третьего поколения показано на рисунке 1.5.

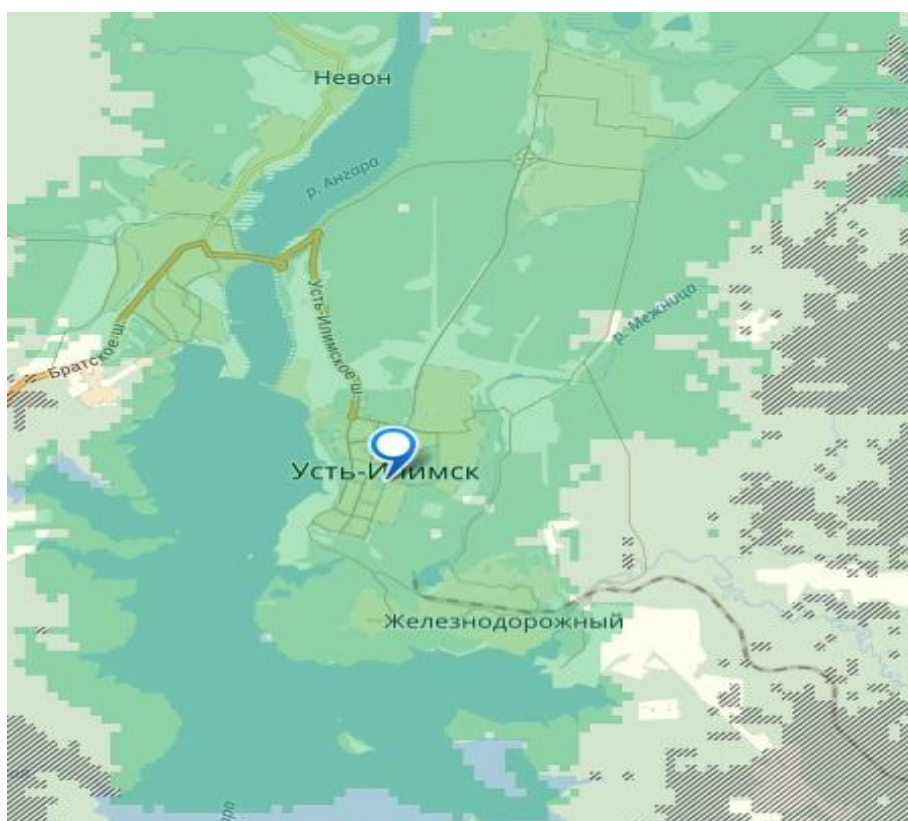


Рисунок 1.5 – Зона покрытия 3G в городе Усть-Илимске.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		16

Следующим шагом в данной работе будет выбор беспроводной технологии широкополосного доступа для достижения целей проектирования. Проанализировав выше представленные аргументы, в качестве используемой технологии была выбрана технология LTE.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		17

2 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ LTE

2.1 IMT – Advanced

IMT-Advanced - это сертификат, присваивающий официальный статус сетей четвертого поколения.

3GPP Long Term Evolution (LTE) — название технологии мобильной передачи данных. Проект 3GPP является стандартом по совершенствованию технологий CDMA, UMTS для удовлетворения будущих потребностей в скорости передачи данных.

Стандарт 3GPP LTE, под которым чаще всего имеется в виду его релиз 9 и более ранние, формально, не является стандартом беспроводной связи 4G, однако стандарт LTE-Advanced, под которым понимается релиз 10 и более поздние релизы стандарта LTE, утвержден Международным Союзом Электросвязи как стандарт беспроводных сетей, отвечающий всем требованиям беспроводной связи четвертого поколения, и включен в IMT-Advanced. Все имеющиеся на данный момент внедрения сетей LTE относятся к Release 8, 9. Первоначально 3GPP LTE не относился к 4G - четвертому поколению беспроводной связи, так как он не удовлетворял всем условиям Международного Союза Электросвязи относительно 4G, однако позже было разрешено использование этого обозначения, и стандарт 3GPP LTE стали относить к pre-4G, то есть предварительной версии стандартов 4-го поколения. Вместе со стандартом WiMAX Release 2, или просто WiMAX 2, что чаще используется как название стандарта, (стандарт IEEE 802.16m) LTE Advanced являются на данный момент всеми стандартами, утвержденными в IMT-Advanced.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		18

2.2 Архитектура базовой сети LTE (SAE)

SAE (англ. System Architecture Evolution — эволюция системной архитектуры) это архитектура ядра сети, разработанная консорциумом 3GPP для стандарта беспроводной связи LTE.

SAE является эволюционным продолжением ядра сети GPRS, с некоторыми отличиями:

- упрощенная архитектура — архитектура SAE снижает эксплуатационные и капитальные расходы. Новая, плоская модель, означает, что потребуется повысить пропускную способность узлов только двух типов (базовых станций и шлюзов), чтобы они справились с трафиком в случае его значительного роста.
- целиком построена на IP (All IP Network — AIPN) — Первые концепции 3G были разработаны, с тем, что голос по-прежнему передается по системе с коммутацией каналов. С тех пор наблюдался переход к IP-сетям. Соответственно архитектура SAE построена на базе IP-сети.
- обеспечивает большую пропускную способность на сети радиодоступа (radio access network — RAN) — предполагается, что нисходящий канал (DownLink) будет со скоростью свыше 100 Мбит/с, и основное внимание системы будет сосредоточено на мобильности полосы пропускания, от сети потребуется поддерживать гораздо больше уровней данных.
- обеспечивает меньшую задержку RAN — с увеличением требуемых уровней взаимодействия и более быстрых ответов, концепция SAE обеспечит уровень задержки в районе 10 мс.
- поддерживает мобильность между несколькими гетерогенными RAN, включающим поддержку, как систем типа GPRS, так и не-3GPP систем (например WiMAX)

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		19

Создание конкурентной технологии построения сетей мобильной связи на основе сетей мобильной связи WIMAX (стандарт IEEE 802.16e) активизировало усилия участников проекта 3GPP по разработке на основе технологии OFDM эволюционного варианта сети UMTS, названного LTE.

Сеть LTE состоит из двух важнейших компонентов: сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE (System Architecture Evolution), которые интегрируются в сеть GPRS (см. рисунок 2.1).

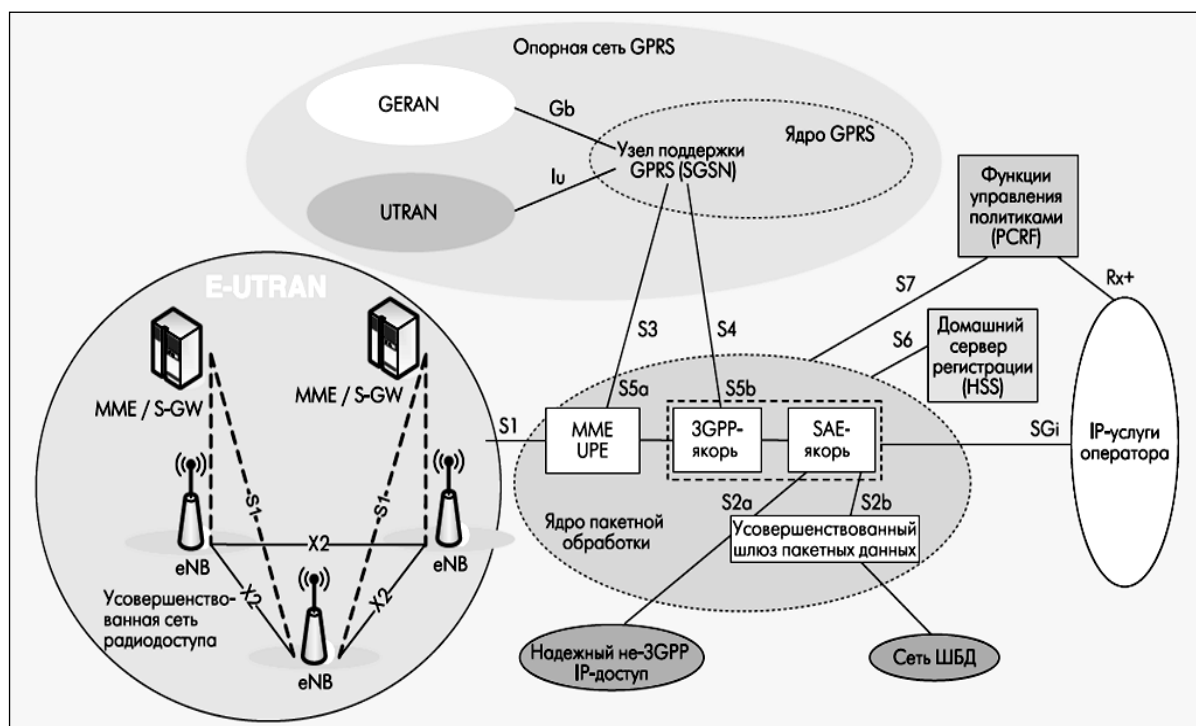


Рисунок 2.1 – Взаимодействие сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE.

Основными требованиями проекта 3GPP к сети SAE были: максимально возможное упрощение структуры сети и исключение дублирующих функций сетевых протоколов, характерных для систем UMTS.

Сеть радиодоступа E-UTRAN рассмотрена в ряде технических спецификаций, согласно которым она состоит только из базовых станций eNB (evolvedNodeB). Базовые станции eNB являются элементами полносвязной сети E-UTRAN и соединены между собой по принципу «каждый с каждым» при помощи интерфейса X2. Интерфейс X2 поддерживает хэндовер мобильного

терминала в состоянии LTE-ACTIVE. Каждая базовая станция имеет интерфейс S1 с базовой сетью SAE, построенной по принципу коммутации пакетов.

Основным компонентом архитектуры SAE является Evolved Packet Core (EPC) – ядро пакетной обработки. EPC служит эквивалентом сети GPRS. Компонентами EPC являются [1]: Mobility Management Entity (MME) — узел управления мобильностью. Предназначен для осуществления «эстафетной передачи» (хэндовера) между базовыми станциями сети LTE, а также сетей второго и третьего поколений данного оператора. MME — это ключевой контролирующей модуль для сети доступа LTE. Он отвечает за процедуры обеспечения мобильности, хэндовера, слежения и пейджинга UE (Пользовательского Устройства — User Equipment). Он участвует в процессах активации/деактивации сетевых ресурсов и также отвечает за выбор SGW для UE при начальном подключении и при хэндовере внутри LTE со сменой узла Ядра Сети (Core Network — CN). Он отвечает за аутентификацию пользователя (при взаимодействии с HSS). Сигнализация слоя без доступа (Non-Access Stratum — NAS) оканчивается в MME и данный узел также отвечает за генерацию и распределение временных идентификаторов для UE. Он проверяет авторизацию UE для доступа к сервис-провайдерам мобильных сетей (Public Land Mobile Network — PLMN) и реализует роуминговые ограничения для UE. MME является заключительной точкой сети для шифрования/защиты целостности сигнализации NAS и отвечает за управление безопасностью. Узаконенный перехват сигнализации также обеспечивается MME. MME предоставляет плоскость функций контроля для обеспечения мобильности между LTE и сетями доступа 2G/3G через интерфейс S3 установленный к MME от SGSN. MME также соединен интерфейсом S6 с домашним HSS для роуминга UE.

Serving Gateway (SGW) — обслуживающий шлюз сети LTE. Предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных поступающих из/в подсистему базовых станций. По сути, заменяет MSC, MGW и SGSN сети UMTS. SGW имеет прямое соединение с сетями второго и третьего поколений

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		21

того же оператора, что упрощает передачу соединения в /из них по причинам ухудшения зоны покрытия, перегрузок и т.п. SGW маршрутизирует и направляет пакеты с пользовательскими данными, в то же время выполняя роль узла управления мобильностью (mobility anchor) для пользовательских данных при хэндовере между базовыми станциями (eNodeB), а также как узел управления мобильностью между сетью LTE и сетями с другими технологиями 3GPP. Когда UE свободен и не занят вызовом, SGW проключает нисходящий канал данных (DownLink — DL) и производит пейджинг, если требуется передать данные по DL в направлении UE. Он управляет и хранит состояния UE (например требования по пропускной способности для IP-сервисов, внутреннюю информацию по сетевой маршрутизации). Он также предоставляет копию пользовательских данных при узаконенном перехвате.

Public Data Network (PDN) Gateway или просто PDN Gateway (PGW) — (Пакетный шлюз — Packet Data Network Gateway) шлюз к/от сетей других операторов. Если информация (голос, данные) передаются из/в сети данного оператора, то они маршрутизируются именно через PGW. Пакетный шлюз обеспечивает соединение от UE к внешним пакетным сетям данных, являясь точкой входа и выхода трафика для UE. UE может иметь одновременно соединение с более чем одним PGW для подключения к нескольким сетям. PGW выполняет функции защиты, фильтрации пакетов для каждого пользователя, поддержку биллинга, узаконенного перехвата и сортирование пакетов. Другая важная роль PGW — являться узлом управления мобильностью между 3GPP и не-3GPP технологиями, такими как WiMAX и 3GPP2 (CDMA 1X и EvDO).

Home Subscriber Server (HSS) — сервер абонентских данных. HSS представляет собой объединение VLR, HLR, AUC выполненных в одном устройстве.

Policy and Charging Rules Function (PCRF) — узел выставления счетов абонентам за оказанные услуги связи. Это - общее название для устройств в рамках SAE EPC, которые отслеживают поток предоставляемых услуг, и обеспечивают тарифную политику. Для приложений, требующих контроль или

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		22

начисление платы в режиме реального времени, может использоваться дополнительный сетевой элемент под названием Applications Function (AF).[14]

Логический элемент MME (Mobility Management Entity) отвечает за решение задач управления мобильностью абонентского терминала и взаимодействует с базовыми станциями eNB сети E-UTRAN с помощью протоколов плоскости управления C-plane (интерфейс S1-C). Логический элемент UPE (User Plane Entity) отвечает за передачу данных пользователей согласно протоколам плоскости пользователя U-plane и взаимодействует с eNB посредством интерфейса S1-U.

Благодаря интерфейсу S1 базовые станции соединены с несколькими узлами MME/UPE, что позволяет более гибко использовать сетевой ресурс. Такой интерфейс называют S1-flex.

Сеть LTE имеет следующие функциональные отличия от сети UMTS:

- Базовые станции eNB выполняют функции управления радиоресурсами (Radio Bearer Control), управление доступом (Radio Admission Control), управление мобильностью (Connection Mobility Control), динамическое распределение ресурсов (DynamicResourceAllocation). Таким образом, в сети радиодоступа E-UTRAN базовые станции eNB управляют протоколами радиointерфейса, комбинируя выполнение функций базовых станций NodeB и большинство функций контроллера RNC сети UMTS.
- Сетевой элемент управления мобильностью MME отвечает за распределение сообщений вызова (paging) к базовым станциям eNB. Кроме того, MME управляет протоколами плоскости управления: назначения идентификаторов абонентских терминалов, обеспечения безопасности сети, проверки подлинности сообщений абонентов и управления роумингом.

Сетевой элемент плоскости пользователя UPE выполняет сжатие заголовков IP-протоколов, шифрование потоков данных, терминацию пакетов данных плоскости пользователя. Кроме того, UPE управляет протоколами пользовательского уровня, например, хранением текущего статуса абонентского

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		23

терминала (АТ), прерыванием состояния LET-IDLE на уровне абонентских терминалов.

2.3 Радиointерфейс сети LTE

LTE базируется на трех основных технологиях: мультиплексирование посредством ортогональных несущих OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), многоантенные системы MIMO (Multiple Input Multiple Output) и эволюционная системная архитектура сети (System Architecture Evolution).

Принципиально, что дуплексное разделение каналов может быть как частотным (FDD), так и временным (TDD). Это позволяет операторам очень гибко использовать частотный ресурс. Такое решение открывает путь на рынок тем компаниям, которые не обладают спаренными частотами. С другой стороны, поддержка FDD очень удобна для традиционных сотовых операторов, поскольку у них спаренные частоты есть "по определению" – так организованы практически все существующие системы сотовой связи. Сама же по себе система FDD существенно более эффективна в плане использования частотного ресурса, чем TDD, – в ней меньше накладных расходов (служебных полей, интервалов и т.п.).

Обмен между базовой станцией (БС) и мобильной станцией (МС) строится по принципу циклически повторяющихся кадров (в терминологии LTE – радиокадр) [9]. Длительность радиокадра – 10 мс. Все временные параметры в спецификации LTE привязаны к минимальному временному кванту $T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f)$, где Δf – шаг между поднесущими, стандартно – 15 кГц. Таким образом, длительность радиокадра – $307200T_s$. Сам же квант времени соответствует тактовой частоте 30,72 МГц, что кратно стандартной в 3G-системах (WCDMA с полосой канала 5 МГц) частоте обработки 3,84 МГц ($8 \times 3,84 = 30,72$).

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		24

Стандарт LTE предусматривает два типа радиокадров. Тип 1 предназначен для частотного дуплексирования – как для полного дуплекса, так и для полудуплекса. Такой кадр состоит из 20 слотов (длительностью 0,5 мс), нумеруемых от 0 до 19.

Два смежных слота образуют субкадр (см. рисунок 2.2). При полнодуплексном режиме радиокадры в восходящем и нисходящем каналах передаются параллельно, но с оговоренным в стандарте временным сдвигом.



Рисунок 2.2 – Структура кадра LTE при частотном разделении дуплексных каналов

Радиокадр типа 2 (см. рисунок 2.3) предназначен только для временного дуплексирования. Он состоит из двух полукадров длительностью по 5 мс. Каждый полукадр включает 5 субкадров длительностью 1 мс.

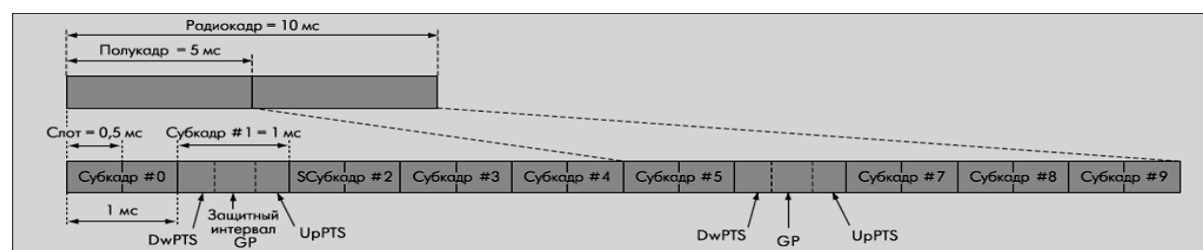


Рисунок 2.3 – Структура кадра LTE при временном разделении дуплексных каналов

Стандарт предусматривает два цикла временного дуплексирования – 5 и 10 мс. В первом случае 1-й и 6-й субкадры идентичны и содержат служебные поля Dw PTS, Up PTS и защитный интервал GP. При 10-мс цикле TDD 6-й субкадр используется для передачи данных в нисходящем канале. Субкадры 0 и 5, а также поле Dw PTS всегда относятся к нисходящему каналу, а субкадр 2 и

поле U_p PTS – к восходящему. Распределение остальных субкадров определяется по таблице 2.1, где D – нисходящий канал, U – восходящий, S – субкадр со специальными полями.

Таблица 2.1– Распределение субкадров в радиокадре типа 2

Конфигурация	Цикл TDD, мс	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Возможно, несколько вариантов длительности полей D_wPTS , U_pPTS и GP , но их сумма всегда равна 1 мс.

Как уже отмечалось, в LTE используется модуляция OFDM, хорошо исследованная в системах DVB, Wi-Fi и WiMAX [1]. Напомним, технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида:

$$S_k(t) = a_k \cdot \sin [2\pi (f_0 + k\Delta f)] \quad (2.1)$$

расположенных с определенным шагом по частоте Δf . Один OFDM-символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области OFDM-символ включает поле данных (полезная информация) и так называемый циклический префикс CP (Cyclic Prefix) – повторно передаваемый фрагмент конца предыдущего символа (см. рисунок 2.4). Назначение префикса – борьба с межсимвольной интерференцией в приемнике вследствие многолучевого

распространения сигнала. Отраженный сигнал, приходящий с задержкой, попадает в зону префикса и не накладывается на полезный сигнал.

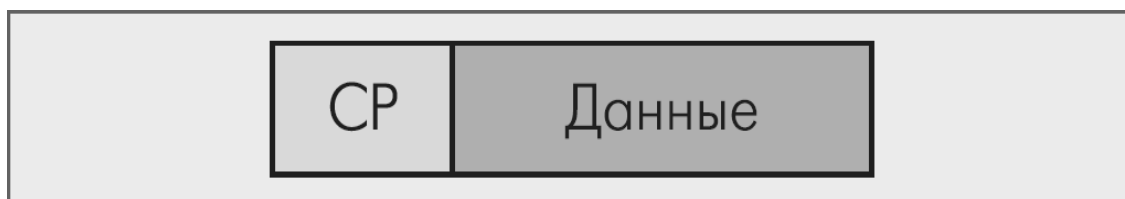


Рисунок 2.4– OFDM-символ с циклическим префиксом

В LTE принят стандартный шаг между поднесущими $\Delta f = 15$ кГц, что соответствует длительности OFDM-символа 66,7 мкс. Каждому абонентскому устройству (АУ) в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области (см. рисунок 2.5) – ресурсная сетка.

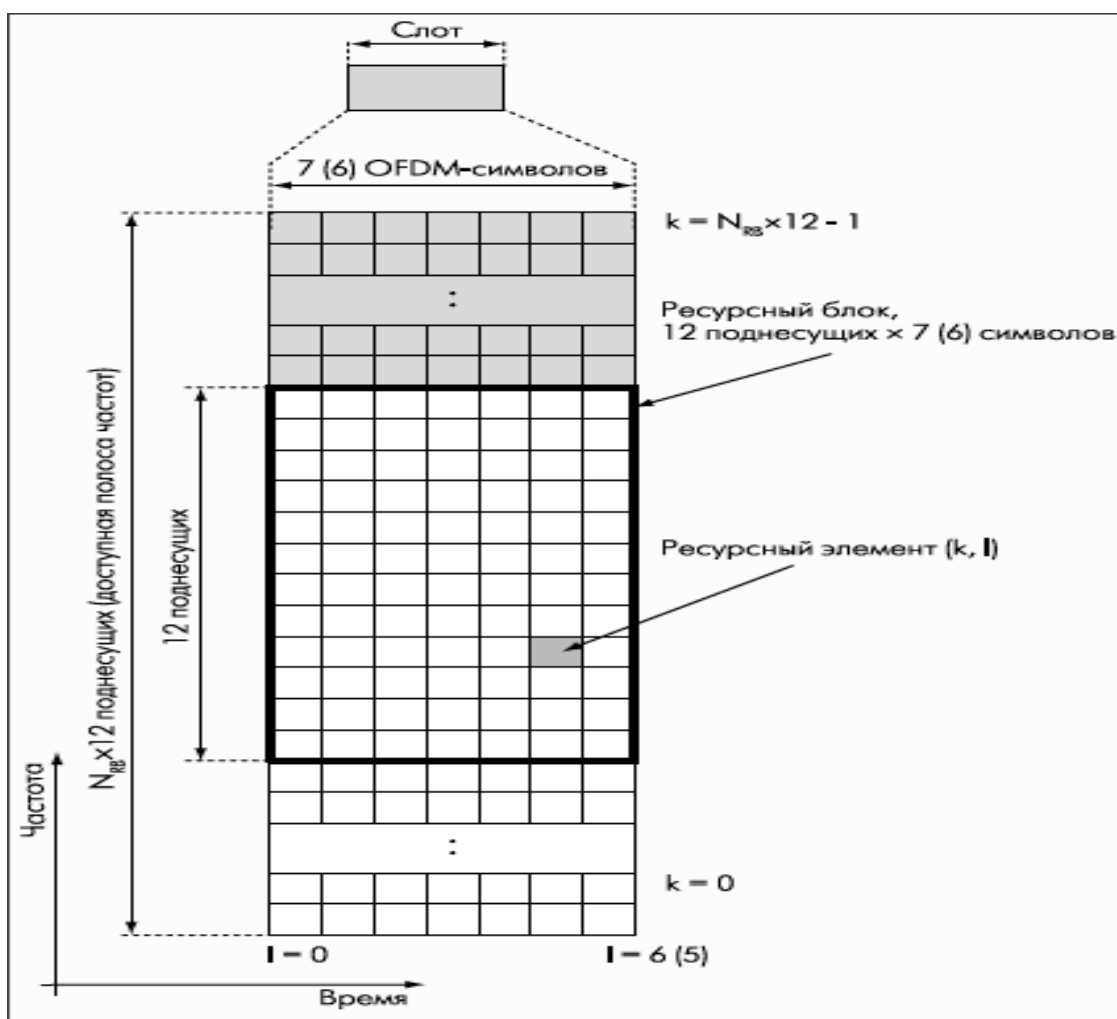


Рисунок 2.5 – Ресурсная сетка LTE при стандартном шаге поднесущих $\Delta f = 15$ кГц

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Ячейка ресурсной сетки – так называемый ресурсный элемент – соответствует одной поднесущей в частотной области и одному OFDM-символу – во временной. Ресурсные элементы образуют ресурсный блок – минимальную информационную единицу в канале. Ресурсный блок занимает 12 поднесущих (т.е. 180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса (табл.2.2.) – так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс. Число ресурсных блоков NRB в ресурсной сетке зависит от ширины полосы канала и составляет от 6 до 110 (ширина частотных полос восходящего/нисходящего каналов в LTE – от 1,4 до 20 МГц).

Таблица 2.2 – Физический префикс в нисходящем канале при $\Delta f = 15$ кГц

Тип префикса	Длина префикса		Длина слота OFDM-символов
	Ts	мкс	
Стандартный:			7
первый символ слота	160	5.2	
остальные 6 символов слота	144	4.7	
Расширенный	512	16.7	6

Ресурсный блок – это минимальный ресурсный элемент, выделяемый абонентскому устройству планировщиком базовой станции. О распределении ресурсов в каждом слоте базовая станция сообщает в специальном управляющем канале.

Длительность префикса 4,7 мкс позволяет бороться с задержкой отраженного сигнала, прошедшего путь на 1,4 км больше, чем прямо распространяющийся сигнал. Для систем сотовой связи в условиях города этого обычно вполне достаточно. Если же нет – используется расширенный префикс, обеспечивающий подавление межсимвольной интерференции в ячейках радиусом до 120 км. Такие огромные ячейки полезны для разного рода

широковещательных сервисов (MBMS), таких как мобильное ТВ-вещание. Для этих же режимов (только в нисходящем канале) предусмотрена особая структура слота, с шагом между поднесущими 7,5 кГц и циклическим префиксом 33,4 мкс. В слоте при этом всего три OFDM-символа. Особый случай широковещательного сервиса представляет режим MBSFN (мультимедийный широковещательный сервис для одночастотной сети). В этом режиме несколько БС в определенной MBSFN-зоне одновременно и синхронно транслируют общий широковещательный сигнал.

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

Спецификации LTE определяют несколько фиксированных значений для ширины восходящего и нисходящего каналов между БС и АС (в сетях E-UTRAN) (табл. 2.3.).

Таблица 2.3– Параметры канала передачи между БС и АУ

Ширина канала, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число номинальных несущих для БПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Тактовая частота для БПФ, Мгц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Поскольку в OFDM используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), число формальных поднесущих для упрощения процедур цифровой обработки

сигнала должно быть кратно $N = 2n$ (т.е. 128, 256,..., 2048). При этом частота выборок должна составлять $F_s = \Delta f \cdot N$. При заданных в стандарте значениях она оказывается кратной 3,84 МГц – стандартной частоте выборок в технологии WCDMA. Это очень удобно для создания многомодовых устройств, поддерживающих как WCDMA, так и LTE.

Разумеется, при формировании сигнала амплитуды "лишних" поднесущих (включая центральную поднесущую канала) считаются равными нулю.

2.4 Модуляции в LTE

В LTE используется модуляция по технологии множественного доступа с одной несущей частотой (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access – SC-FDMA) для Uplink передачи данных – от пользователя к базовой станции (см. рисунок 2.6) и по технологии ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM-модуляция) для Downlink передачи – от базовой станции к пользователю.

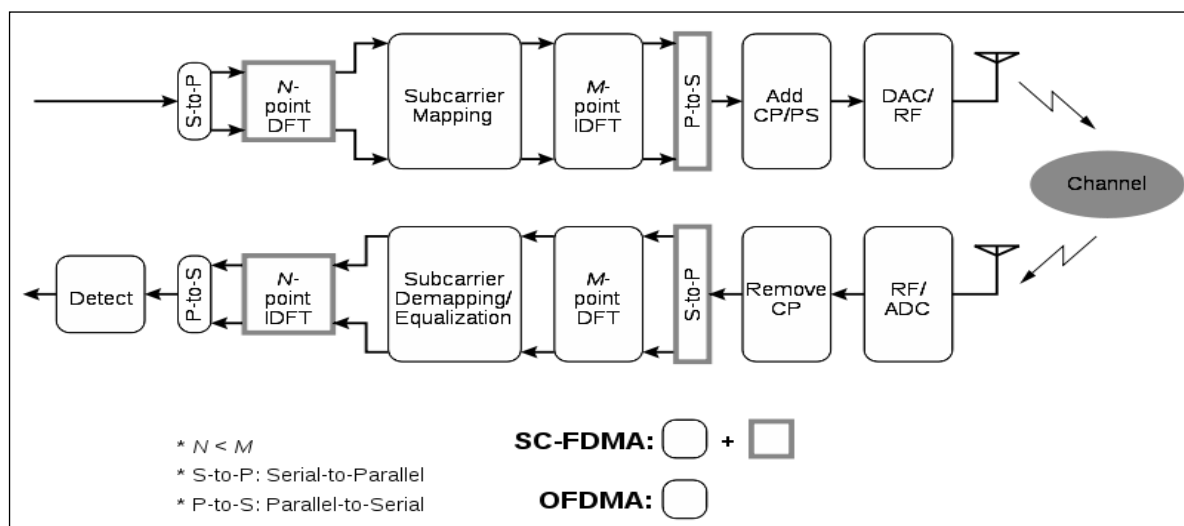


Рисунок 2.6 – Структура SC-FDMA

В системах LTE используются два основных метода дуплексной связи: дуплекс с частотным разделением (FDD) и дуплекс с временным разделением (TDD). Применяются и другие варианты, в т.ч. FDD с половинной скоростью.

При этом интеграция режимов FDD и TDD в LTE значительно ближе, чем это было в UMTS. Схема передачи в сторону абонента использует множественный доступ с ортогональным делением частот (OFDM), а для передачи в сторону базовой станции применяется новая схема передачи, получившая название SC-FDMA. Эта новая схема объединила черты как традиционной схемы с одной несущей, так и схемы OFDM.

Технология OFDM известна с середины 1960-х гг. и в настоящее время применяется во многих беспроводных системах. Применение OFDM в беспроводной мобильной связи сдерживалось по двум основным причинам. Первая заключается в том, что для выполнения необходимых быстрых преобразований Фурье требуется достаточно большая вычислительная мощность. Однако непрерывное развитие технологий обработки сигнала привело к тому, что эту причину уже нельзя считать препятствием на пути внедрения OFDM, и теперь эта технология образует основу нисходящего канала LTE. Другим фактором, сдерживающим применение OFDM в мобильных системах, были присущие этой технологии сигналы с высоким отношением пикового значения к среднему (PAR), которые порождаются параллельной передачей нескольких сотен близко расположенных поднесущих. Для мобильных устройств сигналы с большим PAR создают целый ряд проблем, связанных с конструкцией усилителя мощности и потреблением энергии от батарей. Именно поэтому 3GPP остановился на новой схеме передачи SC-FDMA.

Множественный доступ в нисходящем канале LTE достигается за счет применения тщательно доработанной версии OFDM, получившей название множественного доступа с ортогональным разделением частот (OFDMA). Данный метод позволяет закреплять отдельные поднесущие за разными пользователями. Это облегчает обслуживание многих абонентов, работающих с низкими скоростями, а также позволяет использовать частотные скачки для смягчения эффектов узкополосного многолучевого распространения.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31

SC-FDMA представляет собой гибридную схему передачи, которая сочетает низкие значения PAR, присущие системам с одной несущей, таким как GSM и CDMA, с большой длительностью символа и гибким распределением частот OFDM. Принципы генерации сигнала SC-FDMA показаны на рисунке 2.7, который является фрагментом одного из рисунков отчета 3GPP TR 25.814 об исследовании физического уровня LTE.



Рисунок 2.7 – Структурная схема генерации сигнала SC-FDMA

В левой части (см. рисунок 2.7) символы данных представлены во временной области. Символы преобразуются в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье и затем, в частотной области, они распределяются в нужные места общего спектра несущей. Затем их требуется снова преобразовать во временную область, чтобы перед передачей добавить к ним циклический префикс. Альтернативное название технологии SC-FDMA — распределенная OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT-SOFDM).

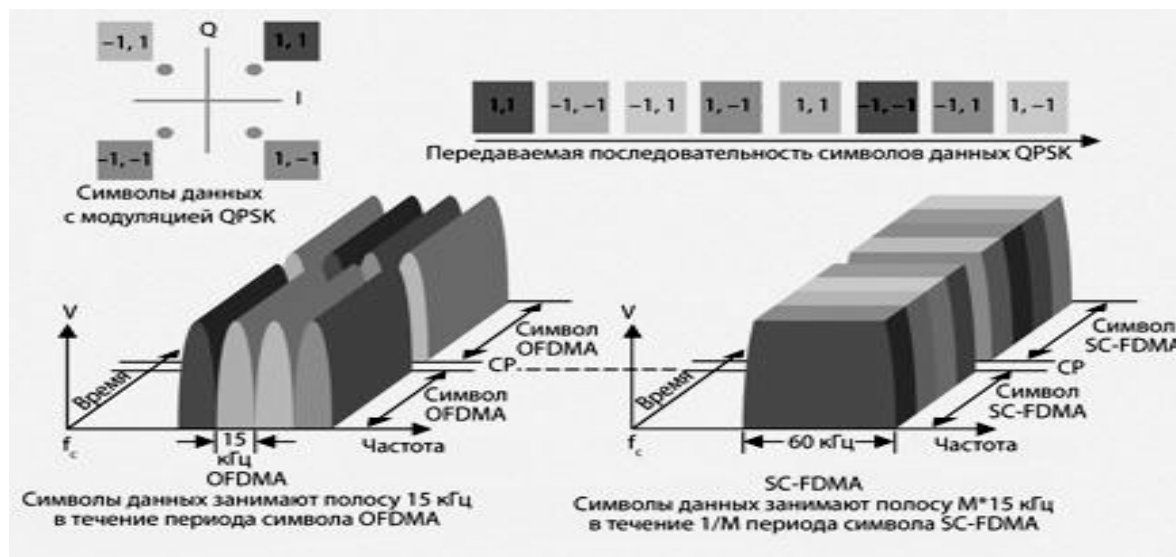


Рисунок 2.8 – Сравнение передачи серии символов данных QPSK в OFDMA и SC-FDMA

Альтернативное описание этой технологии приведено на рисунке 2.8, где в частотной и временной областях показано, как OFDMA и SC-FDMA передают последовательность из восьми символов QPSK. В этом упрощенном примере число поднесущих (M) было сокращено до четырех. Для OFDMA четыре (M) символа обрабатываются параллельно, причем каждый из них модулируется собственной поднесущей с соответствующей фазой QPSK. Каждый символ данных занимает полосу 15 кГц на время передачи одного символа OFDMA, которое равно 66,7 мкс. В начале следующего символа OFDMA вставляется защитный интервал, содержащий циклический префикс (CP). CP представляет собой копию конца символа, добавленную к началу символа. Благодаря параллельной передаче, символы данных имеют ту же длину, что и символы OFDMA.

В случае SC-FDMA символы данных передаются последовательно. Поскольку в данном примере используются четыре поднесущих, за один период символа SC-FDMA передаются четыре символа данных. Период символа SC-FDMA имеет ту же длину, что и символ OFDMA, т.е. 66,7 мкс, но благодаря последовательной передаче символы данных получаются короче, т.е. равными $66,7/M$ мкс. В связи с повышением скорости следования символов для их передачи требуется более широкая полоса. В результате каждый символ

занимает в спектре 60 кГц, а не 15 кГц, как было в случае более медленных символов, используемых в OFDMA. После передачи четырех символов данных вставляется СР.

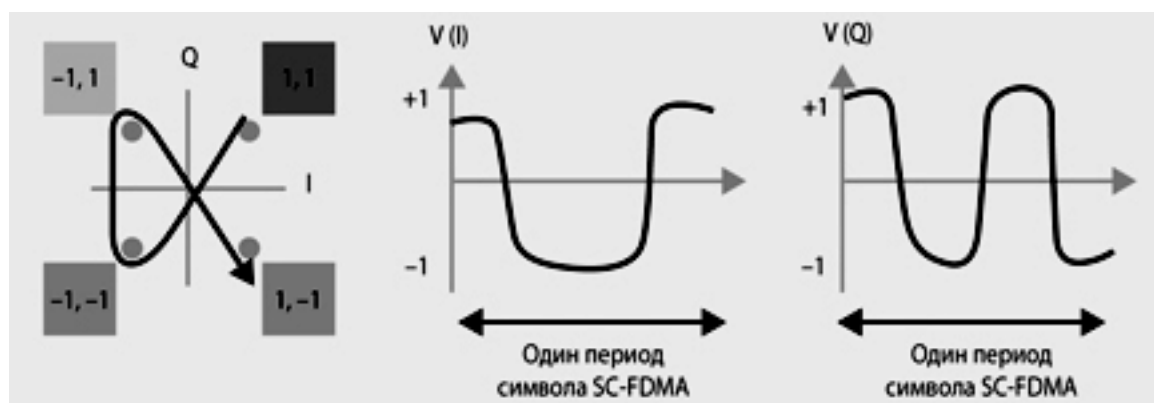


Рисунок 2.9 – Создание символа SC-FDMA во временной области

В продолжение графического сравнения OFDMA и SC-FDMA на рисунке 2.9 показан детальный процесс генерации сигнала SC-FDMA. Сначала создается представление последовательности символа данных во временной области. В данном примере с четырьмя поднесущими для генерации одного символа SC-FDMA требуются четыре символа данных. Используя первые четыре цветных символа QPSK (см. рисунок 2.8) процесс создает один символ SC-FDMA во временной области, рассчитывая траекторию, переходящую от одного символа данных QPSK к другому. Это делается со скоростью в M раз выше скорости символов SC-FDMA, так что в результате один символ SC-FDMA содержит M последовательных символов данных QPSK. Чтобы не усложнять рассмотрение, мы не будем обсуждать фильтрацию переходов между символами, хотя в любой реальной схеме такая фильтрация обязательно присутствует.

После создания IQ-представления одного символа SC-FDMA во временной области следующим шагом является представление его в частотной области с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Частота дискретизации ДПФ выбирается таким образом, чтобы форма одного символа SC-FDMA во временной области полностью представлялась M бинами ДПФ, отстоящими друг от друга на 15 кГц, причем каждый бин представляет одну

поднесущую с постоянной амплитудой и фазой в течение одного периода символа SC-FDMA равного 66,7 мкс. При этом всегда существует однозначное соответствие между числом символов данных, передаваемых за один период символа SC-FDMA, и числом создаваемых бинов ДПФ, которое, в свою очередь, равно числу занимаемых поднесущих. Это достаточно логично: с ростом числа символов данных, передаваемых за один период SC-FDMA, сигнал во временной области изменяется быстрее, что приводит к расширению полосы и, следовательно, требует большего числа бинов ДПФ для полного представления сигнала в частотной области.

Теперь самое время задать вопрос: «Как же может SC-FDMA сохранить стойкость к многолучевому распространению при столь коротких символах данных?». В OFDMA модулирующие символы данных остаются постоянными в течение периода символа OFDMA равного 66,7 мкс, тогда как символ SC-FDMA меняется со временем, поскольку содержит M коротких символов данных. Стойкость к многолучевому распространению процесса демодуляции OFDMA обусловлена большой длиной символов данных, которые накладываются непосредственно на отдельные поднесущие. К счастью, стойкость к разбросу задержки обусловлена именно постоянной природой каждой поднесущей, а не постоянством символов данных. Как показано выше, ДПФ изменяющегося во времени символа SC-FDMA создает набор бинов ДПФ, постоянных в течение символа SC-FDMA, несмотря на то, что модулирующие символы данных при этом изменяются. В этом и заключается основное свойство процесса ДПФ, что изменяющийся во времени символ SC-FDMA, состоящий из M последовательных символов данных, представляется в частотной области M не меняющимися во времени поднесущими. Таким образом, даже SC-FDMA с присущими ему короткими символами данных обладает достаточной стойкостью к многолучевому распространению. На рисунке 2.8. все поднесущие SC-FDMA показаны с одной и той же амплитудой, но в реальных условиях каждая поднесущая имеет свою амплитуду и фазу в течение каждого символа SC-FDMA.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		35

Для завершения генерации сигнала SC-FDMA выполняются те же операции, что и для OFDMA. Обратное БПФ преобразует смещенный по частоте сигнал во временную область, а затем добавление CP обеспечивает свойственную OFDMA фундаментальную стойкость к многолучевому распространению. На рисунке 2.10 иллюстрируется близкая взаимосвязь между SC-FDMA и OFDMA.

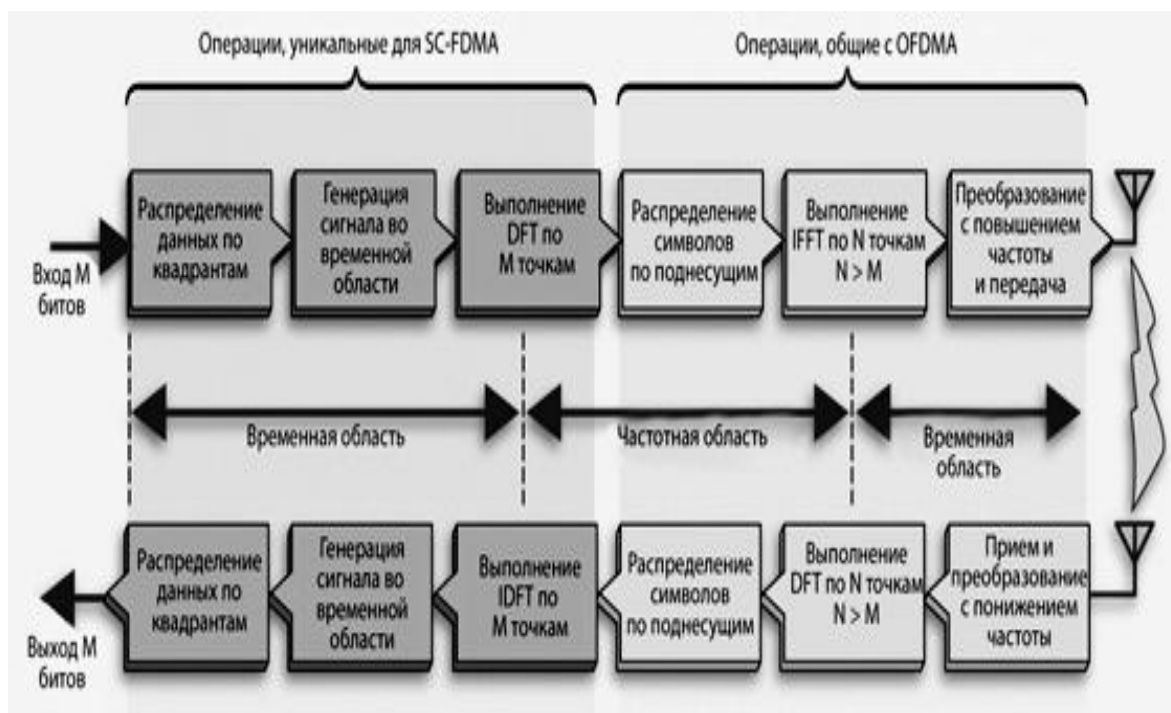


Рисунок 2.10 – Упрощенная модель генерации и приема SC-FDMA

Светлые блоки показывают обработку OFDMA, а темные блоки представляют дополнительную обработку во временной области, необходимую для SC-FDMA. Главное, что следует отметить, это то, что сигнал, преобразованный из частотной области обратно во временную область, представляет собой ни что иное, как смещенную по частоте версию последовательности символов QPSK. Данный пример демонстрирует основную причину создания SC-FDMA, а именно, PAR конечного сигнала не превышает PAR исходных символов данных, которые в данном случае являются символами QPSK. Это существенно отличается от OFDMA, где параллельная передача тех же символов QPSK создает статистические пики, очень похожие на Гауссовский

шум, которые значительно превышают PAR исходных символов данных. Ограничение PAR с помощью SC-FDMA существенно снижает потребность в том, чтобы мобильное устройство работало с высокими пиками мощности. Это снижает и затраты, и энергопотребление.

Как уже выше было сказано, для передачи данных в сети LTE каждая поднесущая модулируется посредством 4-, 16- и 64- позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит. Сигнал с квадратурной фазовой модуляцией (QPSK) в координатах I/Q приведен на рисунке 2.11.

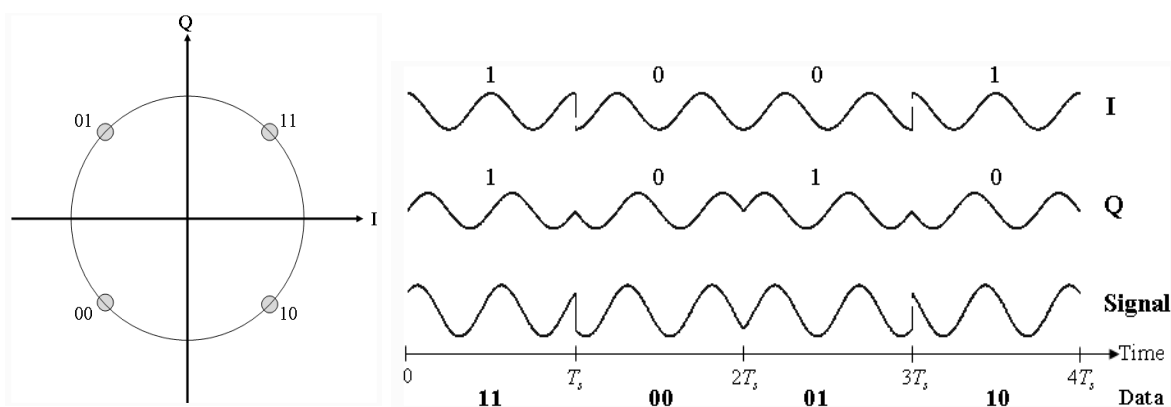


Рисунок 2.11 – Структура сигнала QPSK

При этом, сигнал на выходе модулятора:

$$u(t) = I(t) \cos(2\pi f_H t) + Q(t) \sin(2\pi f_H t), \quad (2.2)$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ – сигналы, полученные сглаживанием символов I и Q с помощью сглаживающего фильтра.

Для уменьшения полосы частот модулирующая последовательность пропускается через сглаживающий фильтр с импульсной характеристикой типа «приподнятый косинус».

2.5 Физический уровень LTE

Физический уровень LTE состоит из двух типов сигналов, известных как физические сигналы и физические каналы. Физические сигналы генерируются на уровне 1 и используются для синхронизации системы, идентификации ячейки и оценки радиоканала. Физические каналы служат для передачи данных, поступающих с более высоких уровней, включая управление, расписание и полезные данные. В таблице 2.4. показаны физические сигналы и каналы восходящего соединения.

В восходящем соединении используются две структуры фрейма, одна для FDD типа 1 и другая — для FDD типа 2. Фрейм типа 1 имеет длительность 10 мс и состоит из десяти субфреймов, каждый из которых занимает два слота по 0,5 мс. На рисунке 2.12. показано распределение DMRS и PUSCH по структуре фрейма. Число символов в слоте зависит от длины CP. Для нормального CP в каждом слоте содержится семь символов SC-FDMA. Для расширенного CP, который используется при большом разбросе задержки, в каждом слоте содержится шесть символов SC-FDMA. Опорные сигналы демодуляции передаются в четвертом символе каждого слота (т.е. в символе с номером 3). При этом, PUSCH может передаваться в любом другом слоте.

Таблица 2.4 – Сигналы и каналы восходящего соединения

Сигналы восходящего соединения	Полное наименование	Назначение
1	2	3
DMRS	Опорный сигнал (демодуляция)	Используется базовой станцией для синхронизации с абонентским оборудованием и для оценки канала восходящего соединения. Связан с PUSCH или PUSCH

Окончание таблицы 2.4

1	2	3
SRS	Опорный зондирующий сигнал	Используется для оценки канала при отсутствии PUCCH или PUSCH
PRACH	Физический канал произвольного доступа	Установка соединения
PUCCH	Физический управляющий канал восходящего соединения	Расписание, ACK/NACK
PUSCH	Общий физический канал восходящего соединения	Полезные данные

На рисунке 2.12 показана структура фрейма 1 в частотной и временной областях. Каждый вертикальный столбик представляет одну поднесущую. Передачи сгруппированы в блоки, называемые блоками ресурсов (RB), которые состоят из 12-ти соседних поднесущих длительностью 0,5 мс. Кроме DMRS и PUSCH на рисунке показан PUCCH, который всегда привязан к крайнему RB в полосе канала, причем в каждом следующем слоте он попеременно привязывается либо к самой нижней частоте, либо к самой верхней.

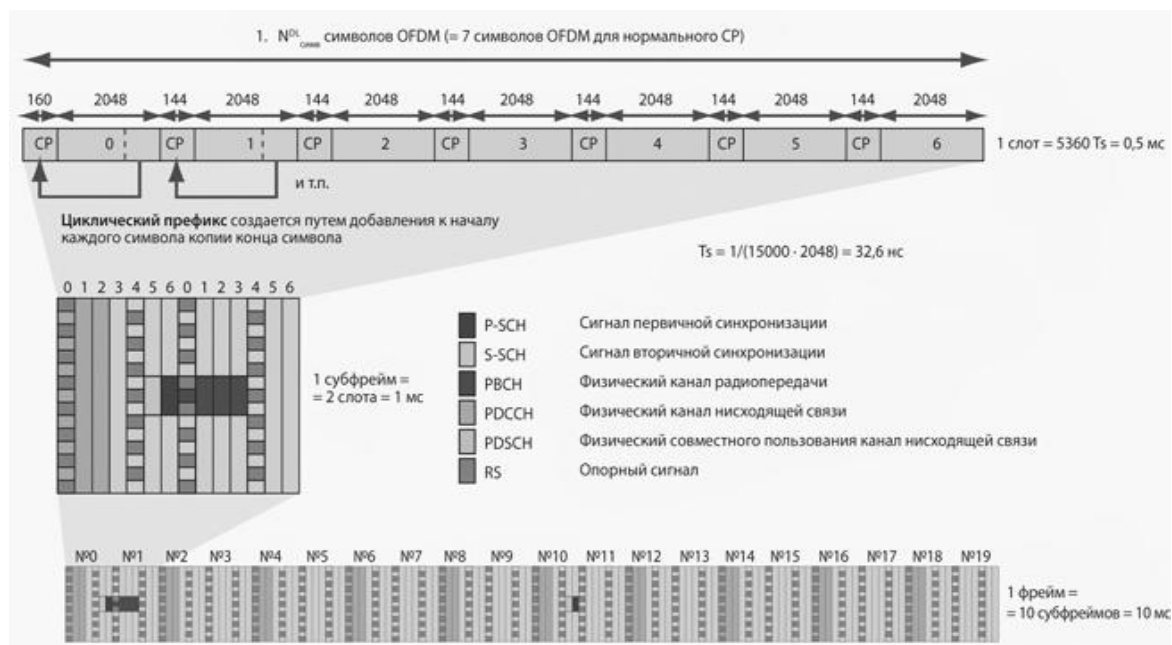


Рисунок 2.12 – Структура фрейма 1 для восходящего соединения, оказывающая распределение DMRS и PUSCH

На рисунке 2.13 можно увидеть, что одному абонентскому устройству выделяется диапазон частот, который, как правило, уже полосы системы. Это связано с тем, что число привязанных RB пропорционально скорости передачи, которая не всегда равна максимальному значению. DMRS передается только в полосе, закрепленной за PUSCH и PUCCH, в отличие от опорных сигналов нисходящего соединения, которые всегда передаются во всей полосе канала, даже если канал занят не полностью.

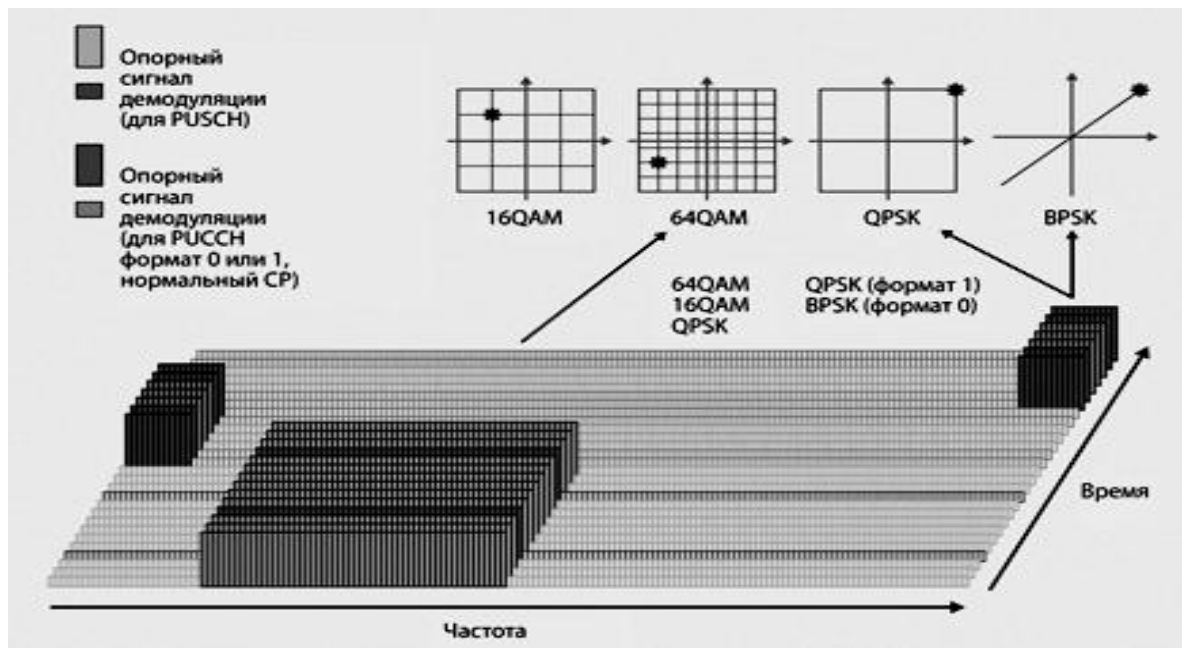


Рисунок 2.13 – Структура фрейма 1 для восходящего соединения, показывающая зависимость одного субфрейма от частоты

Если базовой станции нужно оценить состояние восходящего канала при отсутствии передачи управляющих или полезных данных, она выполняет привязку сигнала SRS, который не зависит от PUSCH и PUCCH. PUSCH может применять модуляцию QPSK, 16QAM или 64QAM. PUCCH использует только модуляцию QPSK, а DMRS — BPSK с поворотом на 45°.

2.6 Спектральная эффективность сети LTE

Спектральная эффективность сети LTE будет рассмотрена путём анализа основных параметров технологии LTE и других мобильных беспроводных технологий.

Для проведения корректного сравнительного анализа спектральной эффективности систем мобильной связи необходимо учесть, что наборы параметров по умолчанию (диапазон частот, ширина полосы частот, разнос сот и т.д.) сравниваемых систем должны быть более или менее соизмеримыми. Такой подход обуславливается тем, что при изменении (увеличении) ширины полосы частот изменяются и предельные теоретические показатели Шеннона по скорости передачи информации в линиях связи. Например, при использовании для передачи данных полосы частот 10 МГц расчетное значение пропускной способности сети выше, чем при полосе 5 МГц.

В настоящее время наиболее интересным представляется сравнительный анализ спектральной эффективности систем связи, построенных на базе следующих стандартов для радиотехнологий, разработанных 3GPP/3GPP2, ETSI, IEEE [5, 6]:

- Evolved UTRAN (LTE) (3GPP/ETSI);
- CDMA-EV-DO (3GPP2);
- 802.16a-802.16.m (IEEE);
- 802.20 (IEEE);
- 802.11 (IEEE).

Технология Wi-Fi (802.11.x) рассматривается телекоммуникационным сообществом в большей степени как дополнительная сеть доступа для сетей фиксированной и мобильной связи. Данные по этой технологии будут также приведены ниже.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		41

Стандарты семейства CDMA-EV-DO (3GPP2):

- Стандарт CDMA-EV-DO (Release 0) позволяет получать информацию по прямому каналу со скоростью 2,4 Мбит/с, а по обратному — со скоростью 153 кбит/с. При этом спектральная эффективность сети составит 1,9 и 0,12 бит/с/Гц для прямого и обратного каналов соответственно.

- Стандарт CDMA-EV-DO (Revision A) позволяет операторам предоставлять усовершенствованные мультимедиа услуги (включающие передачу голоса, данных и вещание) посредством IP-сетей. Ширина полосы частот канала в сетях, работающих на основе стандарта Revision A, составляет 1,25 МГц, как и в сетях, работающих на основе стандарта CDMA2000. Скорость передачи информации по прямому и обратному каналу равна 3,1 и 1,8 Мбит/с соответственно. При этом спектральная эффективность сети равна 2,48 и 1,44 бит/с/Гц для прямого и обратного канала соответственно.

- Стандарт CDMA-EV-DO (Revision B) является эволюционным продолжением предыдущей версии. Новшество Revision B состоит в способности системы агрегировать сразу несколько каналов, используемых в Revision A. Так, в полосе частот 20 МГц можно использовать до 15 каналов по 1,25 МГц каждый. Это позволяет увеличить пропускную способность прямого и обратного каналов сети стандарта CDMA-EV-DO до 46,5 и 27 Мбит/с соответственно. При использовании модуляции 64QAM пропускная способность прямых каналов с шириной полосы частот 1,4; 5 и 20 МГц составит соответственно 4,9; 14,7 и 73,5 Мбит/с.

- Стандарт CDMA-EV-DO (Revision C) находится на стадии разработки. Задачи, поставленные перед разработчиками Revision C, заключаются в увеличении пропускной способности с 73,5 до 200 Мбит/с. В таблице 2.5. приведены данные по спектральной эффективности сетей стандарта CDMA-EV-DO.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		42

Таблица 2.5 – Значения спектральной эффективности сетей CDMA-EV-DO

Версия стандарта CDMA-EV-DO	Ширина полосы частот, МГц	Спектральная эффективность, бит/сек/Гц	
		в линии «вниз»	в линии «вверх»
Release 0	1.25	1.9	0.12
Revision A	1.25	2.48	1.44
Revision B	1.25	3.92	-
	5	2.94	-
	20	2.3...3.67	1.35

Стандарты семейства IEEE 802.11 (Wi-Fi), 802.16 (WiMAX):

- Стандарт IEEE 802.11, разработка которого была завершена в 1999 г., является базовым и определяет протоколы, необходимые для организации беспроводных локальных сетей (WLAN). В основу стандарта положена сотовая архитектура построения сети. Для обеспечения перехода мобильных рабочих станций из зоны действия одной точки доступа в зону действия другой в многосотовых сетях предусмотрены специальные процедуры сканирования (активного и пассивного прослушивания эфира) и присоединения абонентов сети, однако строгих требований по реализации роуминга стандарт IEEE 802.11 не предусматривает.

- Стандарт 802.11a – является наиболее «широкополосным» из семейства стандартов IEEE 802.11, предусматривая скорость передачи данных до 54 Мбит/с (редакцией стандарта, утвержденной в 1999 г., определены три обязательные скорости: 6, 12 и 24 Мбит/с и пять необязательных: 9, 18, 36, 48 и 54 Мбит/с). В отличие от базового стандарта, ориентированного на диапазон 2,4 ГГц, спецификациями IEEE 802.11a предусмотрена работа в диапазоне 5 ГГц. В качестве технологии модуляции сигнала выбрана модуляция, основанная на ортогональном частотном разделении сигналов (OFDM). Наиболее существенное различие между этой технологией и радиотехнологиями прямого расширения спектра (Direct Sequence Spread Spectrum — DSSS) и расширения спектра за счет перестройки частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum —

FHSS) заключается в том, что технология OFDM предполагает параллельную передачу полезного сигнала одновременно по нескольким частотным каналам, в то время как при технологиях DSSS и FHSS сигналы передаются последовательно. В результате повышается пропускная способность канала и качество сигнала.

- Стандарт IEEE 802.11b – позволяет получать высокую скорость передачи данных (до 11 Мбит/с), практически эквивалентную пропускной способности обычных проводных линий связи Ethernet, а также ориентирован на «освоенный» диапазон частот 2,4 ГГц (ISM). Этот стандарт завоевал наибольшую популярность у производителей оборудования для беспроводных сетей.

- Стандарт IEEE 802.11g – представляет собой развитие стандарта 802.11b и позволяет повысить скорость передачи данных в беспроводных широкополосных линиях связи до 22 Мбит/с (а возможно, и выше) благодаря использованию более эффективной технологии модуляции сигнала OFDM. Стандарт 802.11g предусматривает скорость передачи данных до 54 Мбит/с.

- Стандарт IEEE 802.16a – учитывает тонкости распределения спектра в полосе частот 10...66 ГГц. Он определяет три режима физического уровня соединений. Предусмотрен режим с одной несущей для специальных нужд, но дополнительно используется модуляция OFDM.

Цель разработки стандарта IEEE 802.20 схожа с целью разработки стандарта IEEE 802.16e, призванного решить проблему мобильности в сетях WiMAX на уровне пикосот и фемтосот.

Таблица 2.6. содержит данные по спектральной эффективности сетей стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 [7].

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		44

Таблица 2.6 – Значения спектральной эффективности сетей беспроводного широкополосного доступа

Версия стандарта	Ширина полосы частот, МГц	Спектральная эффективность, бит/сек/Гц	
		в линии «вниз»	в линии «вверх»
802.11a	20	2,7	-
802.11b	20	0,55	-
802.11g	20	2,7	-
802.16a	20	до 3,75	-
802.16e	5	до 3,1	до 2,28
	10	до 3,1	до 2,3
802.16d	3.5...7	-	-

На рисунках 2.14-2.16. приведены диаграммы спектральной эффективности трех различных систем мобильной связи и систем беспроводного широкополосного доступа, использующих каналы с шириной полосы частот 5, 10 и 20 МГц. Анализ данных (см. рисунки 2.14-2.16) позволяет сделать вывод о том, что стандарты LTE (Release 8) позволяют снизить стоимость передачи данных и существенно расширить рынок сетей 3G за счет появления дополнительных конкурентных преимуществ по сравнению со стандартами IEEE 802.16e. Отметим, что внедрение технологии MIMO в сетях 3G потенциально может увеличить общую информационную нагрузку пропорционально количеству приёмо-передающих антенн.

При определении путей технического усовершенствования сетей мобильной и беспроводной связи необходимо отметить, что физический уровень сетей HSDPA, HSUPA, 1xEV-DO, 2xEV-DO, IEEE 802.16e, 802.16d уже достаточно оптимизирован, показатели эффективности работы систем на физическом уровне близки к предельным теоретическим показателям Шеннона по скорости передачи информации в линиях связи. Поэтому при всех технологиях можно получить более или менее сопоставимые параметры работы физических уровней систем.

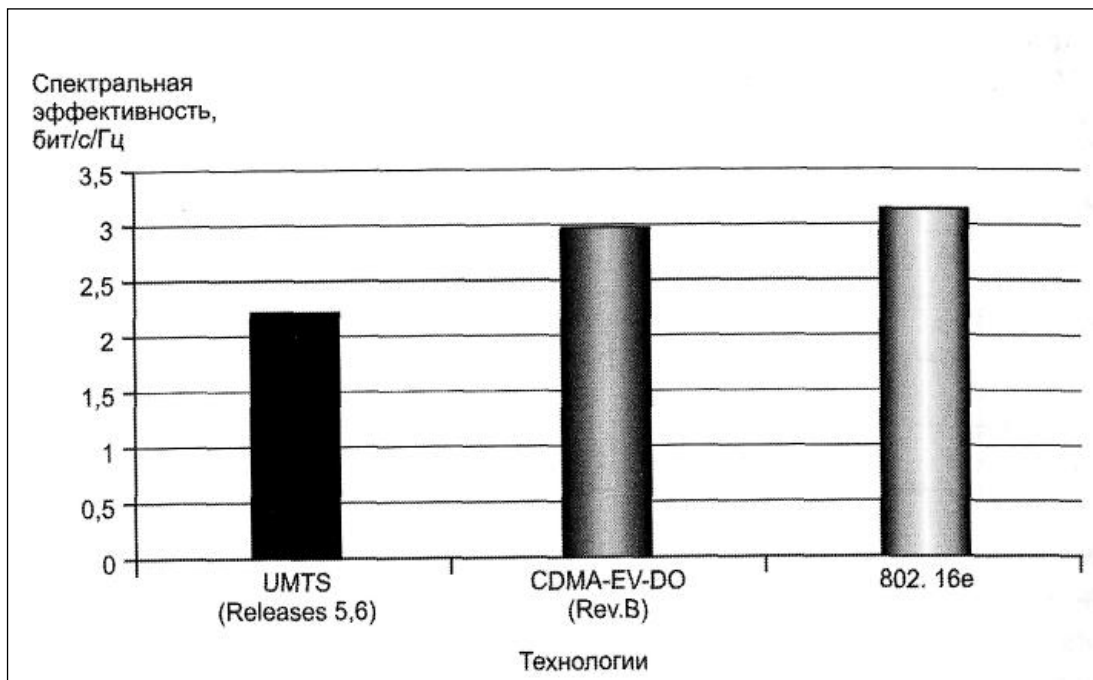


Рисунок 2.14 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 5 МГц [7]

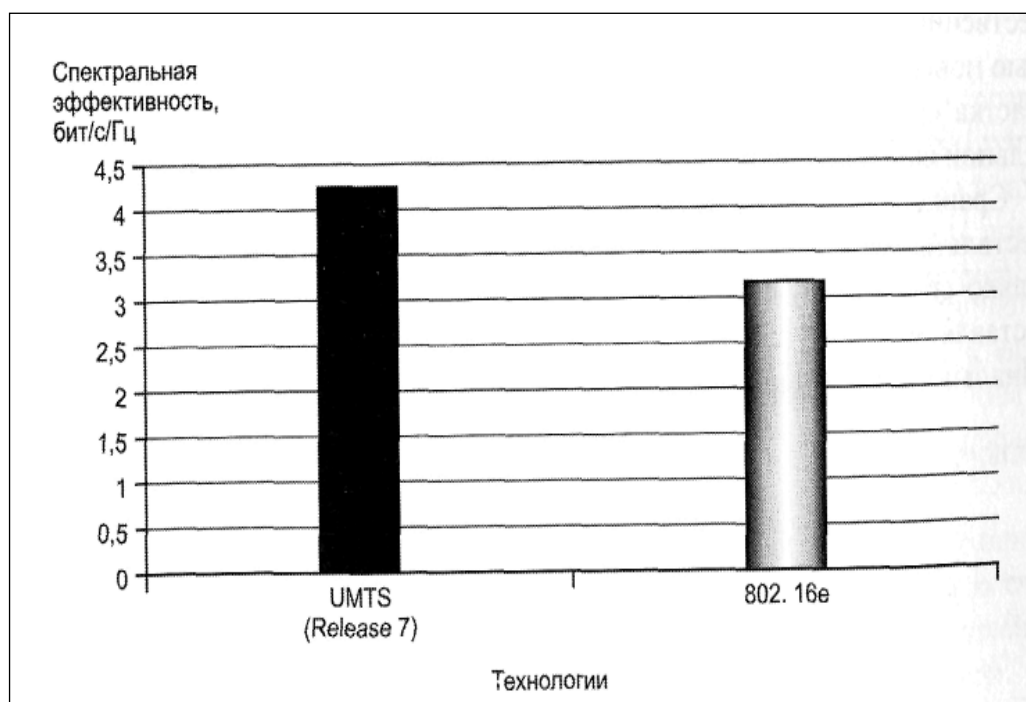


Рисунок 2.15 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 10 МГц [7]

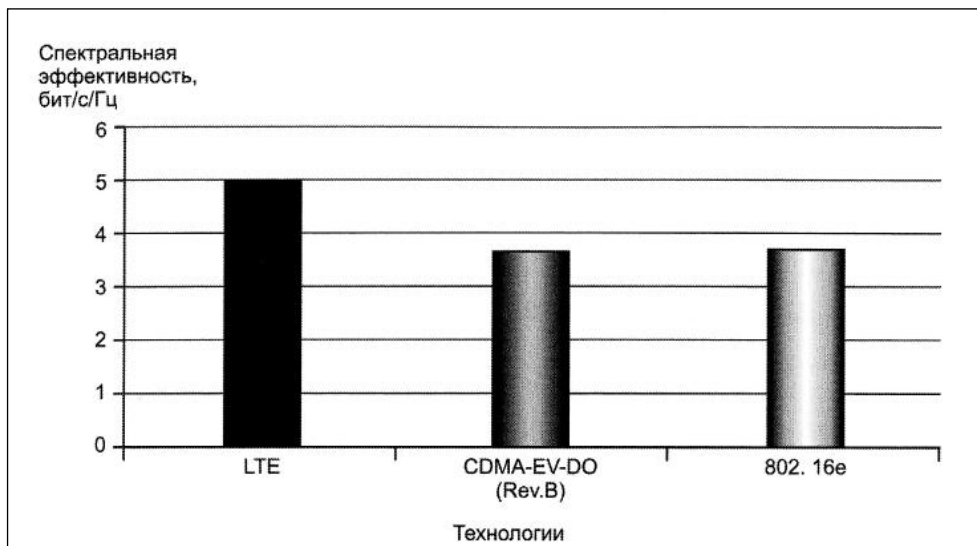


Рисунок 2.16 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 20 МГц [7]

Таким образом, развитие системы UMTS было и остается направленным не только на расширение спектра услуг и возможных приложений, но и на существенное технологическое усовершенствование, связанное с необходимостью повышения спектральной эффективности системы из-за ограниченности участка спектра, выделенного в диапазоне 2-3 ГГц для развития сетей мобильной связи третьего и четвертого поколения.

Сравнение мобильных и беспроводных систем связи целесообразнее осуществлять на базе большего числа системных параметров, включающих не только спектральную эффективность, но и доступность сети, качество предоставляемых услуг, стоимость инфраструктуры, роуминг и параметры терминального оборудования.

3 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ СЕТИ LTE

3.1 Основные технические требования к радиоинтерфейсу сети LTE

Началом работы партнерского проекта по сетям третьего поколения 3GPP над дальнейшим развитием этих сетей считается семинар по эволюции сети радиодоступа (RAN), проведенный 2-3 ноября 2004 г. в Торонто (Канада). Основными направлениями работ по дальнейшему развитию сети RAN стали [1,11]:

- снижение себестоимости бита информации;
- увеличение количества услуг, ориентированных на требования абонентов;
- повышение гибкости использования имеющихся и новых частотных диапазонов;
- упрощение архитектуры и унификация интерфейсов;
- более рациональное потребление энергии абонентскими терминалами;
- исключение излишних опций.

Таким образом, главными целями эволюции сетей 3G к сети E-UTRAN являются улучшение качества услуг и уменьшение расходов пользователей, а также эксплуатационных расходов операторов.

Первые технические требования к LTE, сформулированные в отчете TR.25.913 [1], определили, в свою очередь, требования к сети радиодоступа E-UTRAN, входящей в сеть LTE [5, 9]:

1. Максимальная (пиковая) скорость передачи данных (peak data rates):

- 100 Мбит/св линии «вниз» при полосе канала 20 МГц (спектральная эффективность 5 бит/с/Гц);
- 50 Мбит/св линии «вверх» при полосе канала 20 МГц (спектральная эффективность 2,5 бит/с/Гц).

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		48

Эти требования можно реализовать, если спектр сигнала увеличить (по сравнению с сетью доступа UTRAN) в четыре раза (с 5 до 20 МГц) и применить технологию MIMO.

Значения пиковой скорости передачи данных и спектральной эффективности для сети E-UTRAN в режиме FDD/TDD и в режиме TDD, совместимом с кадровой структурой сети UTRAN при ее работе с низкой скоростью манипуляции (LCR-формат), приведены в таблицах 3.1, 3.2. Эти значения можно получить, если использовать технологию MIMO, два передатчика TX, модуляцию 64QAM, скорость кодирования R, равную единице в линии «вниз», а также один передатчик TX UE (абонентского устройства), модуляцию 16QAM и ту же скорость кодирования в линии «вверх».

Таблица 3.1 – Значения пиковой скорости передачи данных (1) и спектральной эффективности (2) для сети E-UTRAN в режиме FDD/TDD

Требуемое значение пиковой скорости и спектральной эффективности	Линия «вниз»		Линия «вверх»	
	2 TX, MIMO, 64QAM, R=1 10% служебных сигналов		Один TX UE, 16QAM, R=1 14% служебных сигналов	
	(1) Мбит/с в полосе 20 МГц	(2) бит/сек/Гц	(1) Мбит/с в полосе 20 МГц	(2) бит/сек/Гц
Без учета служебной информации	100	5,0	50	2,5
С учетом служебной информации	182	9,1	57	2,9
С учетом заголовков протоколов L1 и L2 (29% служебной информации системы)	144	7,2	48	2,4

При расчетах пиковой скорости передачи данных учитывалась кадровая структура линий «вверх» и «вниз» (циклические префиксы, временные и частотные защитные интервалы, контрольные символы), виды модуляции и помехоустойчивого кодирования. Кроме того, учитывались служебные

заголовки и сообщения протоколов физического и канального уровней L1 и L2 (сообщения планирования передачи информации, сообщения протокола повторной передачи HARQ сообщения абонентского терминала об измеренном качестве канала (Chanel Quality Indicator — CQI).

Таблица 3.2– Значения пиковой скорости передачи данных (1) и спектральной эффективности (2) для сети E-UTRAN в режиме TDD (LCR-формат)

Требуемое значение пиковой скорости и спектральной эффективности	Линия «вниз»		Линия «вверх»	
	2 TX, MIMO, 64QAM, R=1		Один TX UE, 16QAM, R=1	
	(1) Мбит/с в полосе 20 МГц	(2) бит/сек/Гц	(1) Мбит/с в полосе 20 МГц	(2) бит/сек/Гц
Без учета служебной информации	100	5,0	50	2,5
С учетом коротких циклический префиксов в линии «вниз»	149	7,5	49,8	2,5
С учетом длинных циклический префиксов в линии «вверх»	128	6,4		

В табл. 3.1. и 3.2. приведены значения пиковой скорости передачи данных в линиях «вниз» и «вверх» в условиях благоприятной помеховой обстановки, когда отношение сигнал/шум (С/П) больше 20 дБ и можно использовать многопозиционные виды модуляции 16QAM, 64QAM [2, 3]. Ухудшение отношения С/П приводит к уменьшению пиковой скорости передачи (см. рисунок 3.1. — для линии «вниз»; рисунок 3.2. — для линии «вверх»). Как показано на рисунках 3.1 и 3.2 пиковая скорость передачи данных зависит от характеристик помехоустойчивости алгоритма приема и обработки сигнала.

На рисунках обозначено:

- R— скорость помехоустойчивого кодирования;

- MMSE (Minimum Mean Squared Error) — линейное детектирование MIMO-сигналов по критерию минимума среднеквадратической ошибки;

- QRM-MLD с использованием ASESS (Adaptive Selection of the Surviving Symbol Replica Candidates) — адаптивное нелинейное детектирование (QR decomposition and the M-algorithm - QRM) MIMO-сигналов по критерию максимума функционала правдоподобия (Maximum Likelihood Detection — MLD).

Зная требуемое отношение сигнал/шум и мощность передачи сигнала, можно определить пиковые скорости передачи данных на разных удалениях от базовой станции.

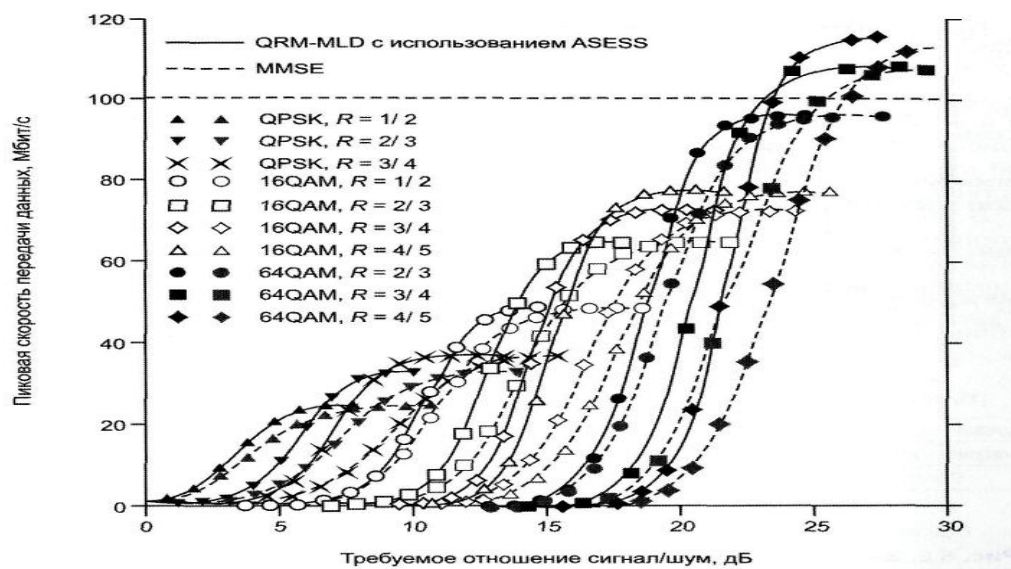


Рисунок 3.1 – Зависимость пиковой скорости передачи данных от отношения сигнал/шум в линии «вниз» канала с шириной полосы 20 МГц (мобильность абонента до 3 км/час)

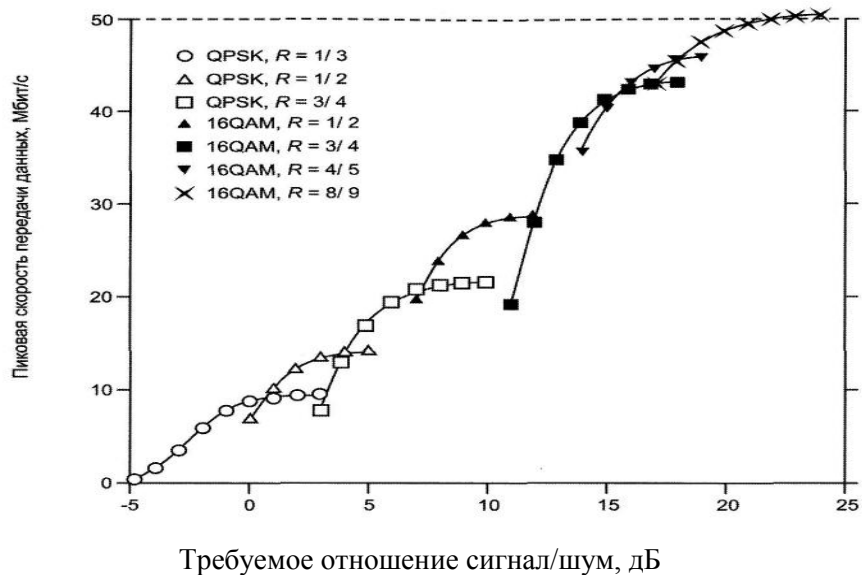


Рисунок 3.2 – Зависимость пиковой скорости передачи данных от отношения сигнал/шум в линии «вверх» канала с шириной полосы 20 МГц (мобильность абонента до 3 км/час)

2. Емкость сети E-UTRAN: не менее 200 пользователей на соту в активном режиме при ширине спектра сигнала 5 МГц.

3. Время задержки передачи пакетов данных на уровне протоколов управления (control-plane latency):

- время перехода мобильного терминала из неработающего состояния IDLE (Release 6) в активное состояние CELL_DCH (Release 6) менее 100 мс;

- время перехода мобильного терминала из режима ожидания CELL_PCH (Release 6) в активное состояние CELL_DCH (Release 6) менее 50 мс.

4. Время задержки передачи пакетов данных пользователя (user plane latency):

- менее 5 мс в активном состоянии мобильного терминала при загрузке IP-пакетов минимальных размеров (для одного пользователя с одним потоком данных).

Небольшое время задержки передачи пакетов данных требуется для предоставления современных услуг в реальном масштабе времени сетями сотовой связи, функционирующими по принципу коммутации пакетов (TCP/IP).

Время задержки передачи пакетов данных пользователя с IP-уровня одного узла сети (мобильного терминала, шлюза) на IP-уровень другого узла сети складывается из времен задержек на различных этапах передачи данных (табл. 3.3). Суммарное среднее время задержки передачи пакетов для протоколов плоскости пользователя при передаче данных для сети E-UTRAN равно 4,0 мс (включая задержку передачи данных между базовой станцией и шлюзом сети). Сокращение этой задержки до 1,0 мс является целью создания радиointерфейса в рамках проекта WINNER.

Таблица 3.3 Оценка времени задержки передачи данных протоколами плоскости пользователя

Этап передачи данных	Описание этапа	Время задержки, мс
0	Активация терминала	Не учитывается
1	Обработка задания передачи пакетов данных процессором терминала	1
2	Цикловая синхронизация	0,25
3	Длительность подкадра	0,5
4	Выполнение алгоритма ретрансляции HARQ	0,3*2,5
5	Обработка задания передачи пакетов данных процессором базовой станции	1
6	Передача пакета данных между базовой станцией и шлюзом aGW	1...15(Ts1u)
7	Обработка задания процессором шлюза	0,5
Общая задержка		4 мс + Ts1u

5. Скорость передачи данных пользователя (user throughput):

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		53

- в линии «вниз» в три-четыре раза выше, чем при использовании технологии HSDPA (Release 6) и при двух передающих антеннах базовых станций и двух приемных антеннах абонентских терминалов;

- в линии «вверх» в два-три раза выше, чем при использовании технологии HSUPA и при одной передающей антенне абонентских терминалов и двух приемных антеннах базовых станций.

6. Эффективность использования спектра (спектральная эффективность):

- в линии «вниз» в три-четыре раза выше, чем при использовании технологии HSDPA (Release 6) в условиях полной загрузки сети;

- в линии «вверх» в два-три раза выше, чем при использовании технологии HSUPA в условиях полной загрузки сети.

Параметры спектральной эффективности сети E-UTRAN приведены в таблице 3.4. (для абонентов с низкой мобильностью и при несущих частотах радиосигнала в диапазоне 2 ГГц).

Таблица 3.4 – Значения параметров спектральной эффективности сети E-UTRAN

Параметр	Абсолютное значение параметра, бит/сек/Гц	
	линия «вниз»	линия «вверх»
Средняя спектральная эффективность	до 4,8 (2x2 MIMO)	до 1,7
Средняя спектральная эффективность на одного пользователя в соте	до 0,37	до 0,25

7. Мобильность абонентов в сети E-UTRAN:

- низкая (скорость перемещения 0... 15 км/час);
- высокая (скорость перемещения 15... 120 км/час);
- сверхвысокая (скорость перемещения 120...350 км/час, максимально до 500 км/час).

8. Радиус сот:

- до 5 км при обеспечении максимальных пропускной способности, спектральной эффективности и мобильности;
- до 30 км при ухудшении этих параметров.

9. Технология мобильного вещания (Multimedia Broadcast Multicast Service - MBMS):

- снижение технологической сложности АТ — использование одинаковых видов модуляции, кодирования, множественного доступа и одинаковых полос канала в сети для режимов Multicast и Unicast;
- одновременное предоставление пользователю услуг вещания MBMS и передачи речи;
- доступность для технологии вещания парных (в режиме FDD) и непарных (в режиме TDD) спектральных полос.

10. Гибкость использования радиоспектра:

- использование адаптивных каналов с шириной спектра 1,4; 3; 5; 10; 15 и 20 МГц в линиях «вверх» и «вниз»;
- обеспечение гибкости использования радиоспектра в режиме только в линии «вниз» и в режиме в линиях «вниз» и «вверх».

11. Совместимость сети E-UTRAN с другими сетями 3GPP:

- совместимость в одной географической зоне и одновременное использование каналов сетей E-UTRAN и сетей GERAN/UTRAN;
- абонентские терминалы сети E-UTRAN, поддерживающие сети UTRAN и/или GERAN, обеспечивают межсетевой хэндовер;
- длительность прерывания обслуживания в процессе выполнения хэндовера между сетями E-UTRAN и UTRAN (или GERAN) для оказания услуг в реальном масштабе времени (real-time) не должно превышать 300 мс;

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		55

- длительность прерывания обслуживания в процессе выполнения хэндовера между сетями E-UTRAN и UTRAN (или GERAN) для оказания услуг, инвариантных ко времени (nonreal-time), не должна превышать 500 мс.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		56

4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СЕТИ

4.1 Выбор оборудования транспортной сети

Оборудование транспортной сети следует выбирать, в первую очередь, руководствуясь особенностями технологии LTE, а также, чтобы данное оборудование отвечало требованиям надежности, отличалось эффективностью, гибкостью, компактностью, обладало широким набором функций и удовлетворяло понятию «цена – качество». Главным условием при выборе оборудования транспортной сети является надежная передача данных пользователей согласно рассчитанной пропускной способности сети LTE.

Транспортная сеть проектируемой в городе Усть-Илимск сети LTE будет реализована по технологии Ethernet. В технологии Ethernet (стандарт IEEE 802.3) определены следующие скорости: Ethernet на скорости 10 Мбит/с, FastEthernet на скорости 100 Мбит/с, GigabitEthernet на скорости 1 Гбит/с и 10 GigabitEthernet на скорости 10 Гбит/с. Скорости в 1 и 10 Гбит/с подходят для транспортной сети. Существенным преимуществом систем Ethernet является широкая масштабируемость и максимальная приближенность к стеку протоколов IP.

В мире проектирования мобильных сетей существуют различные решения выбора оборудования как сети радиодоступа, так и транспортной сети. Компании - производители оборудования для сетей мобильной связи предоставляют операторам пакеты готовых решений, состоящих из подобранного по различным показателям стека аппаратуры. В пакеты готовых решений для реализации транспортной сети мобильного оператора могут входить рабочие станции, коммутаторы, маршрутизаторы, мультисервисные станции, а также специализированное оборудование для управления сетью. Для верного выбора оборудования была изучена структурная схема сети LTE (см. рисунок 4.1).

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		57

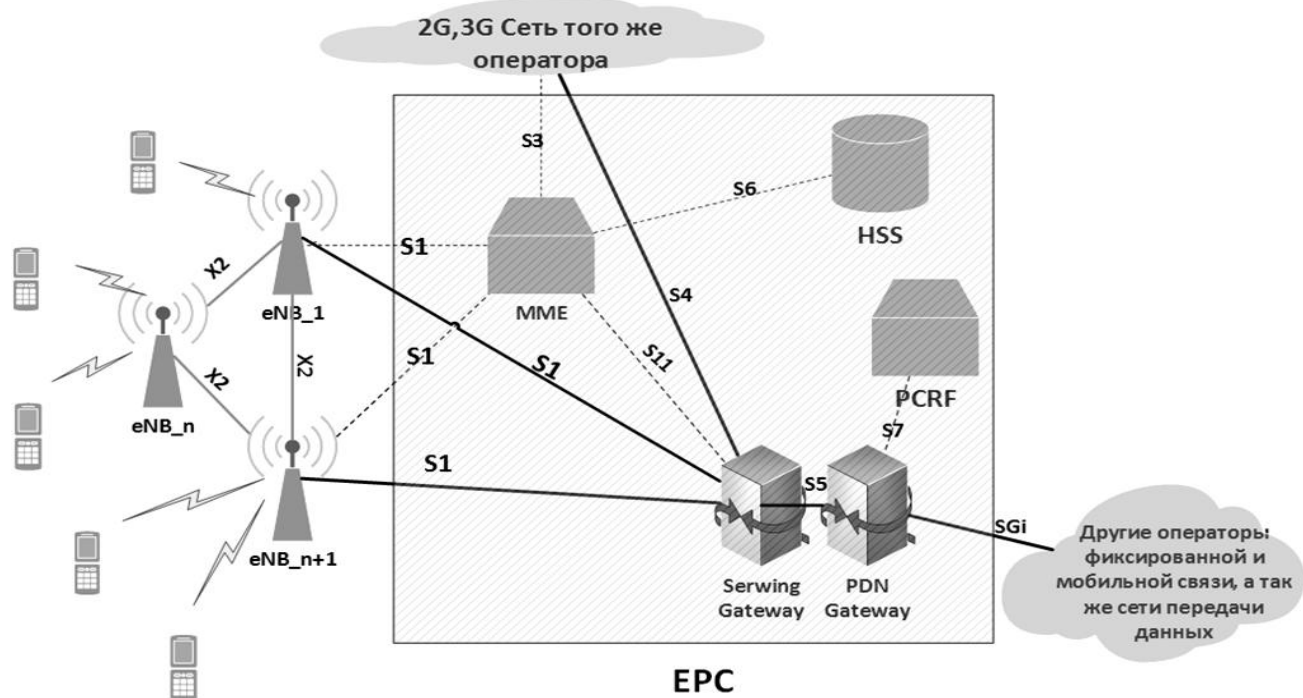


Рисунок 4.1– Структурная схема сети LTE

Из схемы сети LTE, представленной выше, уже видно, что структура сети сильно отличается от сетей стандартов 2G и 3G. Существенные изменения претерпела и подсистема базовых станций, и подсистема коммутации. Была изменена технология передачи данных между оборудованием пользователя и базовой станцией. Также подверглись изменению и протоколы передачи данных между сетевыми элементами. Вся информация (голос, данные) передается в виде пакетов. Таким образом, уже нет разделения на части обрабатывающие либо только голосовую информацию, либо только пакетные данные.

Можно выделить следующие основные элементы сети стандарта LTE:

Serving SAE Gateway или просто Serving Gateway (SGW) – обслуживающий шлюз сети LTE. Предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных поступающих из/в подсистему базовых станций. По сути, заменяет MSC, MGW и SGSN сети UMTS. SGW имеет прямое соединение с сетями второго и третьего поколений того же оператора, что упрощает передачу соединения в /из них по причинам ухудшения зоны покрытия, перегрузок и т.п.

Public Data Network (PDN) SAE Gateway или просто PDN Gateway (PGW) – шлюз к/от сетей других операторов. Если информация (голос, данные)

передаются из/в сети данного оператора, то они маршрутизируются именно через PGW.Mobility Management Entity (MME) – узел управления мобильностью. Предназначен для управления мобильностью абонентов сети LTE.

Home Subscriber Server (HSS) – сервер абонентских данных. HSS представляет собой объединение VLR, HLR, AUC выполненных в одном устройстве.

Policy and Charging Rules Function (PCRF) – узел выставления счетов абонентам за оказанные услуги связи.

Все перечисленные выше элементы относятся к системе коммутации сети LTE. В системе базовых станций остался лишь один знакомый нам элемент – базовая станция, которая получила название eNodeB. Этот элемент выполняет функции и базовой станции, и контроллера базовых станций сети LTE. За счет этого упрощается расширение сети, т.к. не требуется расширение емкости контроллеров или добавления новых.

На сегодняшний день среди всех решений различных компаний - производителей коммутационного оборудования для реализации транспортной сети LTE выделяются решения компании Huawei. Для реализации Evolved Packet Core (EPC) было принято решение использовать платформу базовой сети eCNS600 LTE. Это оборудование содержит все элементы коммутации сети LTE. Краткие характеристики занесены в таблицу 4.1 .

Таблица 4.1 –Описание и основные характеристики eCNS600

Название оборудования	eCNS600
Описание	Корпоративная система базовой сети 600 (eCNS600) разработана Huawei для корпоративной Модернизированной пакетной базовой сети (EPC), и применяется только для архитектуры типа LTE. Она интегрирует функции управления абонентом SAE-HSS, функции Элемента управления мобильностью (MME), функции Шлюза обслуживания (S-
1	2

Окончание таблицы 4.1

1	2	
	GW)/PDN шлюза (P-GW) и функцию Правил и политики тарификации. Управление и обслуживание сети eCNS600 производится централизованно.	
Основные характеристики	Число абонентов, поддерживаемых системой	200 тыс.
	Число операторов, поддерживаемых системой	600 тыс.
	Число операторов, одновременно активированных со стороны UE	11
	Число eNodeB, поддерживаемых системой	1,5 тыс.
	Пропускная способность, поддерживаемая системой	40 Гбит/с (1024 байтов на пакет)
	Входное электропитание	от -40В до -57В DC
	Доступность системы в типовой конфигурации	$\geq 99,999\%$
	Среднее время наработки на отказ (MTBF)	≥ 300 тыс. часов
	Среднее время ремонта (MTTR)	≤ 60 минут
	Механизм резервного копирования	1+1

Для эффективной эксплуатации и обслуживания мобильной сети предлагается использовать платформу Huawei iManagerM2000 (см. рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Внешний вид iManager M2000.

M2000 поддерживает функции, значительно повышающие эффективность работы инженеров по эксплуатации и обслуживанию, и снижает общие затраты. Эти функции включают проверку общей работоспособности сети, дистанционную модернизацию, пакетное обновление, автоматическое планирование базовых станций, автоматическую оптимизацию отношений соседних сот, дистанционный ввод в эксплуатацию базовых станций, настройки аварийной сигнализации режима обслуживания.

4.2 Выбор оборудования базовой станции eNodeBand LTE

При выборе оборудования базовой станции eNB LTE нужно руководствоваться, в первую очередь, способностью поддержки данным оборудованием других стандартов мобильной связи. Так же не стоит забывать о запланированной выходной мощности приемопередатчика TRX и других технических характеристиках.

Для планируемой сети, учитывая ее особенности, можно сделать выбор в пользу оборудования компании «Huawei». В качестве оборудования радиодоступа предлагается использовать базовую станцию «DBS3900 FDD».

DBS3900 состоит из BBU3900 и RRU. BBU3900 характеризуется небольшими размерами, простотой установки, а также низким энергопотреблением. Следовательно, для установки BBU3900 можно легко найти свободное место на существующем сайте. RRU характеризуется компактностью и небольшим весом. Его можно устанавливать в непосредственной близости от антенны, таким образом, сокращая длину фидерного кабеля и повышая зону покрытия системы.

Базовая станция «DBS3900 FDD» предлагает уникальные возможности по построению сайтов. При использовании данной eNB гарантируется низкое электропотребление, соответствие требованиям емкости при постоянно растущем мобильном трафике и высокая спектральная эффективность.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		61

«DBS3900» имеет два типа основных функциональных модулей, таким образом значительно сокращая затраты на запасные части и обслуживание. Имея великолепную приспособляемость к условиям среды, основные модули легко адаптируются к условиям площадки для эффективного развертывания. То есть отсутствуют дополнительные затраты на строительство помещения для размещения оборудования. Удаленный радиомодуль обеспечивает следующие преимущества:

- так как радиочастотный модуль DBS3900 может монтироваться на башне, длина питающей линии значительно сокращается и затраты на подводящие линии также сокращаются;
- сокращение потерь на питающих линиях приводит к увеличению коэффициента усиления мощности от 3 до 5 дБ и повышению радиуса покрытия более чем на 20 %;
- благодаря технологии удаленного радиомодуля, DBS3900 поддерживает распределенную установку радиомодулей, что значительно повышает гибкость при проектировании покрытия вдоль железнодорожных путей.

DBS в целом, как соединенные с ней BBU и все RRU, фактически представляют собой одну соту. Наиболее значимое преимущество подобной схемы заключается в снижении числа хендверов между сотами. По сравнению с репитером, каждый RRU может производить радиосигналы и управлять ими независимо, пассивные помехи в промежуточных узлах не накапливаются, и DBS может управляться целиком (BBU и все RRU) единым интерфейсом обслуживания. Данная базовая станция имеет следующие характеристики:

- Максимальная полоса частот одной соты (20 МГц):
- Пропускная способность нисходящего канала на уровне управления доступом к среде (MAC) составляет 150 Мбит/с (2x2 MIMO);

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		62

- Пропускная способность восходящего канала на уровне MAC составляет 70 Мбит/с (2x2 MU-MIMO или 2x4 MU-MIMO).
- Пропускная способность восходящего и нисходящего канала на уровне MAC равна 1500 Мбит/с.
- Максимальное количество UE в режиме RRC_CONNECTED на eNodeB:
 - на 1,4 МГц –3024 UE;
 - на 3 МГц –6480 UE;
 - на 5/10/15/20 МГц –до 10800 UE.
- Максимальное количество одновременных радионесущих частот для передачи пользовательских данных (DRB) на UE –8.
- Характеристики BBU3900:
 - на плате UMPT –один электрический порт FE/GE, один оптический порт FE/GE;
 - входная мощность – 48 В DC (диапазон напряжений: от минус 38,4 до минус 57 В DC);
 - размеры (высота x ширина x глубина) –86x442x310 мм;
 - вес составляет 12 кг при полной конфигурации;
 - рабочая температура от минус 20 до плюс 50 °С при длительной эксплуатации и от плюс 50 до плюс 55 °С при кратковременной эксплуатации;
 - относительная влажность от 5 до 95 %;
 - класс защиты от внешних воздействий (IP) – IP20;
 - атмосферное давление от 70 до 106 кПа.
- Характеристики удаленного радиоблока RRU:
 - входная мощность минус 48 В DC; диапазон напряжения от минус 57 до минус 36 В DC;
 - температура эксплуатации от минус 40 до плюс 50 °С (с учетом солнечного излучения 1120 Вт/м²), от минус 40 до плюс 55 °С (без учета солнечного излучения);

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		63

- относительная влажность от 5 до 100%;
- атмосферное давление от 70 до 106 кПа;
- класс защиты от внешних воздействий (IP) –IP65.

На рисунке 4.3 показан вариант установки DBS3900.

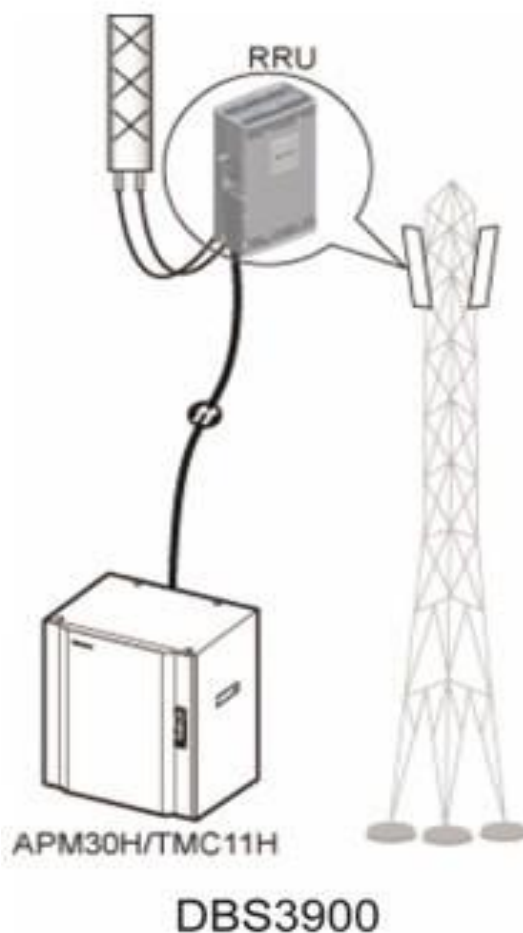


Рисунок 4.3 – Вариант установки DBS3900.

В состав оборудования базовой станции сети подвижной связи стандарта LTE входят:

- три антенны 80010674 («Kathrein» Германия);
- базовый блок BBU3900LTE («Huawei Technologies Co.,Ltd», Китай);
- панель распределения питания DCDU-03 («Huawei Technologies Co., Ltd», Китай);

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		64

- три радиомодуля RRU 3268 (800) («Huawei Technologies Co., Ltd», Китай).

На рисунке 4.4 представлены диаграммы направленности антенны 80010674 «Kathrein»

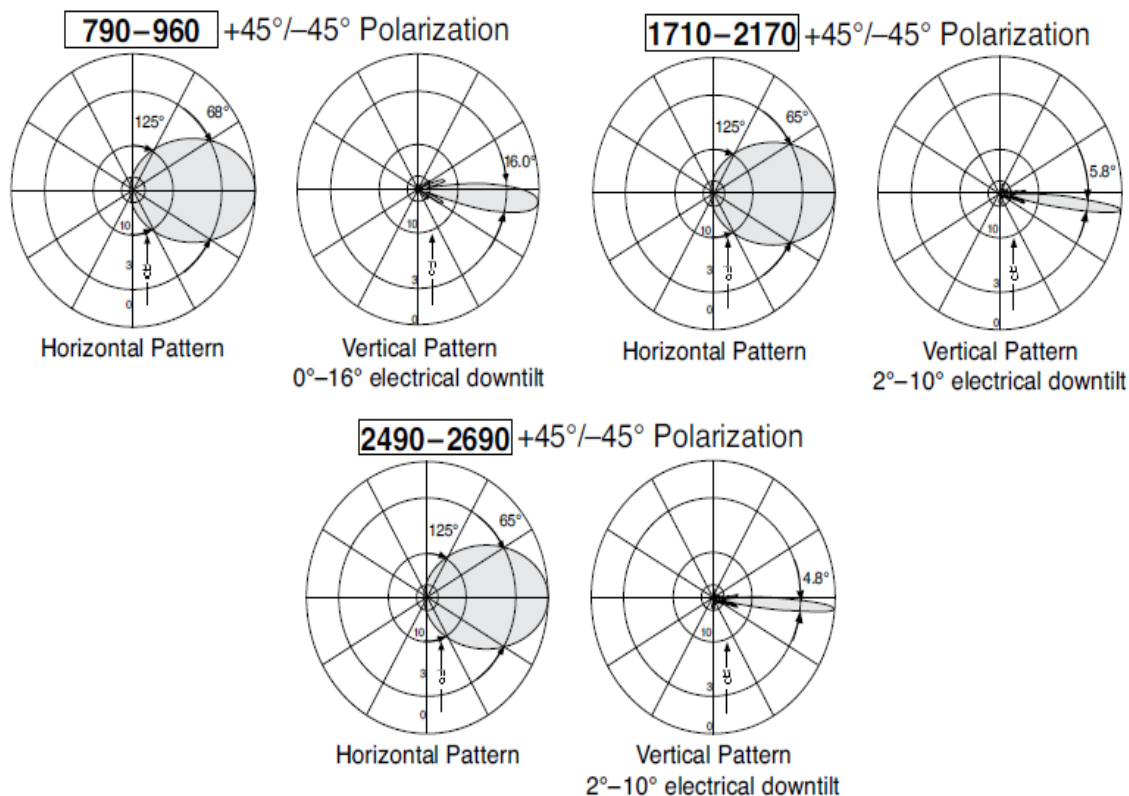


Рисунок 4.4 – диаграммы направленности антенны 80010674 «Kathrein».

Оборудование устанавливается в существующем контейнере аппаратной комнаты. Кабели от БС до антенн и внешних радиоблоков прокладываются по существующим металлоконструкциям. Прокладка ведется с использованием стандартных элементов крепления, на кабельростах кабели фиксируются при помощи стандартных креплений с шагом 0,8 м.

Ввод кабелей осуществляется через существующий кабельный ввод в стене помещения-аппаратной. После прокладки кабелей кабельный ввод герметизируется. Монтаж секторных антенн осуществляется на существующих трубостойках.

В проекте используются существующие системы кондиционирования и охранной пожарной сигнализации.

Согласно сделанному выбору оборудования, следующим этапом будет разработка схемы организации связи сети. Схема организации связи сети показана на рисунке 4.5.

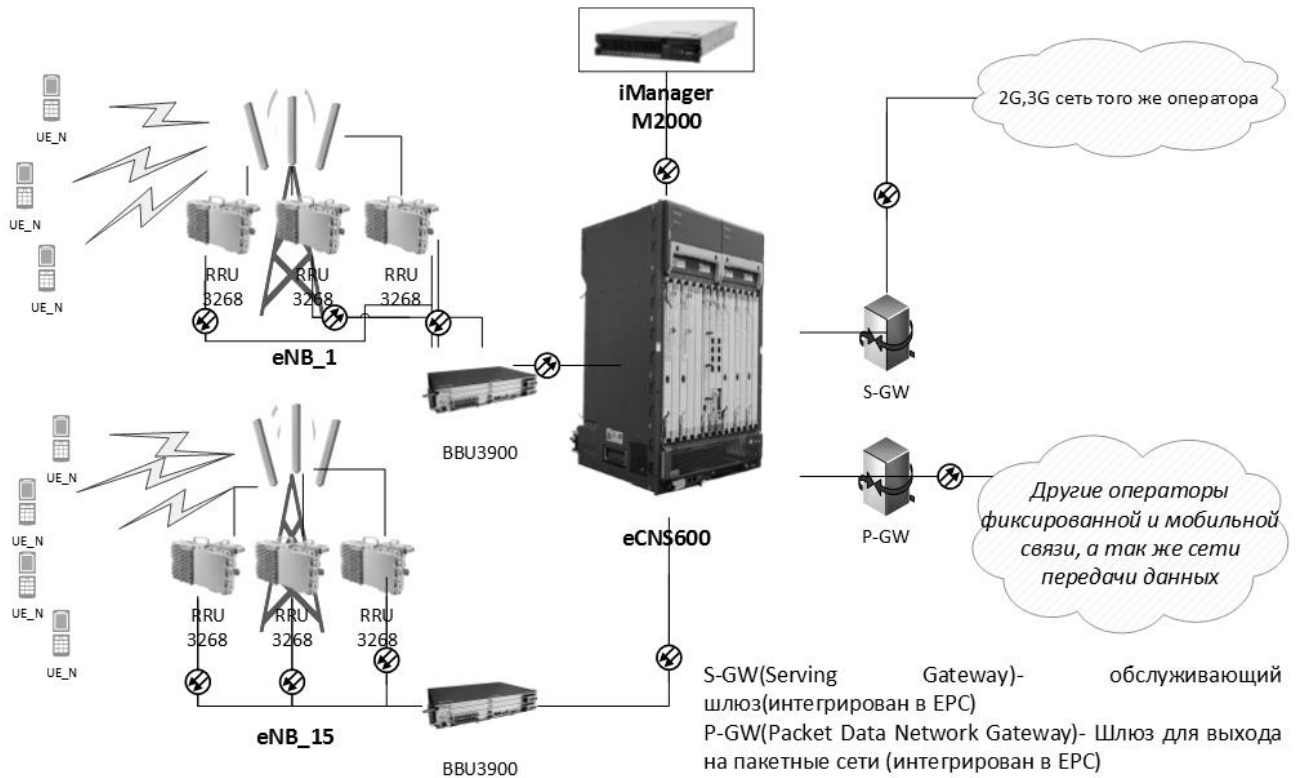


Рисунок 4.5 – Функциональная схема организации связи сети LTE.

Были учтены все нюансы построения сети по технологии LTE. Используемое оборудование даёт возможность , в дальнейшем модернизировать данную сеть без особой сложности.

4.3 Расчет бюджета радиолинии

К начавшемуся строительству сетей стандарта 4G целесообразно подходить исходя из его технических особенностей и специфичности назначения. Специфичность в назначении стандарта заключается в том, что на первом этапе своего развития он предназначен только для пакетной передачи

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		66

данных на скоростях до 150 Мбит/с. Если система связи основанная на GSM создавалась в основном для организации связи в движении, то стандарт LTE имеет некоторые ограничения его использования в движении.

На современном этапе может быть использовано два основных подхода к планированию 4G сетей – это с целью формирования максимальной площади покрытия или с целью обеспечения требуемой емкости. Задачи эти противоречат друг другу. Так, в городских условиях при высокой плотности абонентов зоны обслуживания БС по площади гораздо меньше максимально возможной, но оптимизированы по пропускной способности. В сельской местности наоборот, плотность абонентов – невысокая, и БС устанавливаются на максимальном удалении друг от друга так, чтобы обеспечить максимальное радиопокрытие. И в том и в другом случае оценивают, как радиопокрытие, так и емкость сети для того, чтобы выявить в проекте сети факторы, ограничивающие ее характеристики.

Планирование радиосети LTE будет производиться в городской местностис большой площадью, но небольшой плотностью абонентов, а это значит, что базовые станции должны устанавливаться на приличном удалении друг от друга с целью закрыть каждой eNB как можно большую территорию. В связи с этим нужно подобрать соответствующий частотный диапазон. В данном случае нужно руководствоваться правилом, что чем ниже частота, тем дальше распространение радиосигнала. Частотный диапазон(UL) 847-857(МГц), для (DL) 806-816(МГц) вполне подойдет для выполнения этой задачи. Тип дуплекса выберем частотный – FDD

Планирование радиопокрытия сети LTE начинается с расчёта энергетического бюджета, или максимально допустимых потерь на линии (МДП). МДП рассчитывается как разность между эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ) передатчика и минимально необходимой мощностью сигнала на входе приемника сопряженной стороны, при которой с учетом всех потерь в канале связи обеспечивается нормальная демодуляция сигнала в приемнике.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		67

Исходными данными будут являться:

- тип передаваемых данных – VoIP;
- высота абонентских станций 1,5 м;
- высота подвеса антенн базовых станций 30 м;

Максимально допустимые потери при распространении в канале равны:

$$L = P_{EIRP} - S_{RX} + G_{RX.A} - L_{RX.F} - M_{BUILD} - M_{INT} - M_{SHADE} + G_{HO}, \quad (4.1)$$

где P_{EIRP} – ЭИИМ передатчика;

S_{RX} – чувствительность приемника;

$G_{RX.A}$ – Коэффициент усиления антенны приемника, 18 дБи на линии UL и 0 дБи на линии DL;

$L_{RX.F}$ – потери в фидерном тракте приемника, 0,4 дБ в линии UL;

M_{BUILD} – Запас на проникновение в помещение, 17 дБ;

M_{INT} – запас на помехи, в направлении DL – 8,51 дБ, UL – 3,8 дБ;

M_{SHADE} – Запас на затенение, 8,7 дБ;

G_{HO} – выигрыш от хэндовера, 2,5 дБ.

В базовой станции радиочастотный блок каждого сектора оснащен двумя приемопередатчиками с выходной мощностью 20 Вт (46 дБм). Базовая станция работает на линии вниз в режиме MIMO 2x2 с использованием кросс-поляризованной антенны. Поскольку энергетический бюджет рассчитывается для абонентской станции (АС) на краю соты, то есть принимающей сигналы от БС с низким отношением сигнал/шум (ОСШ), то БС передает сигналы на эту АС в режиме разнесенной передачи. За счет сложения мощностей сигналов трех

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		68

передатчиков в пространстве можно получить энергетический выигрыш (3 дБ).

В качестве АС рассматривается сотовый телефон (ЭИИМ 23 дБм).

ЭИИМ для передатчика определяется формулой:

$$P_{EIRP} = P_{TX} + G_{TX.DIV} + G_{TX.A} - L_{TX.F} , \quad (4.2)$$

где P_{TX} – выходная мощность, равна 46дБм для линии DL и 30 дБм для UL;

$G_{TX.DIV}$ – выигрыш от сложения мощности передатчиков, 3 дБ на линии DL, в линии UL отсутствует;

$G_{TX.A}$ – коэффициент усиления антенны, в DL равен 18 дБи, в UL – 0 дБи;

$L_{TX.F}$ – потери в фидерном тракте, 0,4 дБ в линии DL, в UL отсутствуют.

Подставляя значения в формулу (4.2) ЭИИМ для линии DL равно:

$$P_{EIRP} = 47,8 + 3 + 18 - 0,4 = 68,4 \text{ дБ}$$

На линии UL ЭИИМ определяется выходной мощностью и равно 30 дБ.

Чувствительность приемника определяется по формуле:

$$S_{RX} = P_N + M_{SNR} + L_N , \quad (4.3)$$

где P_N – мощность теплового шума приемника, в линии DL равно минус 104,4 дБм, UL равно минус 118,4 дБм;

M_{SNR} – требуемое отношение сигнал/шум приемника, равно для линии DL – минус 0,24 дБ, UL – 0,61 дБ;

L_N – коэффициент шума приемника, в линии DL равный 7 дБ, UL – 2,5 дБ.

Чувствительность приемника для линии DL:

$$S_{RX} = -104,4 - 0,24 + 7 = -97,64 \text{ , дБм}$$

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Чувствительность приемника для линии UL:

$$S_{RX} = -118,4 + 0,61 + 2,5 = -115,29 \text{ , дБм}$$

В соответствии с формулой (4.1) максимально допустимые потери в направлении DL равны:

$$L = 68,4 - (-97,64) - 17 - 8,51 - 8,7 + 2,5 = 134,33 \text{ , дБ}$$

В направлении UL:

$$L = 30 - (-115,29) + 18 - 0,4 - 17 - 3,8 - 8,7 + 2,5 = 135,89 \text{ дБ}$$

Из двух значений МДП, полученных для UL и DL, выбирается минимальное, по которому производят дальнейший расчет радиуса действия базовой станции. Ограничивающей линией по дальности связи, как правило, является линия вверх (UL).

4.4 Расчет радиуса действия базовой станции

Потери на трассе определяются по модели COST 231-Хата. Они зависят от расстояния R, рабочей частоты F, высоты подвеса антенн базовой станции H_{BC} и абонентской станции H_{AC} . Данный метод основан на аналитической аппроксимации результатов практических измерений. Набор эмпирических формул и поправочных коэффициентов, полученный в результате такой аппроксимации, позволяет рассчитать средние потери для различных типов местности. Условия применимости модели:

- диапазон частот от 150 до 2000 МГц;

- высота базовой станции от 30 до 200 м;

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		70

- высота абонентской станции от 1 до 10 м.

Зная значение максимально допустимых потерь на трассе, можно рассчитать расстояние R.

Потери на трассе рассчитываются по формуле:

$$L = 69,55 + 22,16lgF - 13,82lgH_{BC} - aH_{AC} + (44,9 - 6,55lgH_{BC})lgR \quad (4.4)$$

где H_{BC} – эффективная высота подъема антенны базовой станции, м;

H_{AC} – высота антенны подвижной станции над землей, м;

R – расстояние между передатчиком и приемником, км;

F – частота сигнала, МГц.

aH_{AC} – корректировочный фактор.

Корректировочный фактор для малых и средних городов рассчитывается по формуле:

$$aH_{AC} = (1,1lgF - 0,7)H_{AC} - (1,56lgF - 0,8) \quad (4.5)$$

где H_{AC} – высота антенны подвижной станции над землей, м;

F – частота сигнала, МГц.

Расчеты производятся для следующих параметров:

- частота сигнала – 800 МГц;

- высота абонентской станции – 1,5 м;

- высота базовой станции – 30 м.

Корректировочный фактор, вычисленный по формуле (4.5), равен:

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		71

$$a_{H_{AC}} = (1,1 \lg 800 - 0,7) \times 1,5 - (1,56 \lg 800 - 0,8) = 0.01$$

Подставляя значение допустимых потерь в формулу (4.4), вычисляется расстояние между передатчиком и приемником (R), оно определяет радиус действия базовой станции:

$$\lg R = \frac{135.89 - 69.55 - 26.16 \lg 800 + 13.82 \lg 30 + 0.01}{44.9 - 6.55 \lg 30} = 0,307$$

отсюда радиус действия базовой станции (R) равен 2,02 км.

Площадь, покрываемая базовой станцией, рассчитывается, как площадь трёх шестиугольников по формуле $3 \frac{\sqrt{3}}{8} d^2$, соответственно получаем $S(bs)=7.95$ кв.км.

4.5 Расчет пропускной способности сети и количества eNodeBand

Для определения емкости сети необходимо рассчитать спектральную эффективность соты. Спектральная эффективность – отношение скорости передачи данных на 1 Гц используемой полосы частот (бит/с/Гц), она характеризует эффективность системы, в которой используются сложные методы модуляции. Для сети LTE, при использовании частотного дуплекса, средняя спектральная эффективность восходящего канала (UL) равна 1,829 бит/с/Гц, для нисходящего (DL) – 4,48 бит/с/Гц.

Средняя пропускная способность одного сектора может быть вычислена по формуле:

$$R = S \times W \quad (4.6)$$

где R – пропускная способность одного сектора (Мбит/с);

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		72

S– средняя спектральная эффективность (бит/с/Гц);

W – ширина канала, равная 10 МГц.

Для линии Uplink пропускная способность равна:

$$R = 1,829 \times 10 = 18,29 \text{ , Мбит/с}$$

Для линии Downlink:

$$R = 4,48 \times 10 = 44,8 \text{ , Мбит/с}$$

Средняя пропускная способность базовой станции (eNB) определяется умножением количества секторов на пропускную способность одного сектора. Количество секторов одной eNB равно трем.

$$R_{eNB} = R \times 3 \text{ , Мбит/с} \quad (4.7)$$

где R_{eNB} – пропускная способность базовой станции (Мбит/с);

R– пропускная способность одного сектора (Мбит/с).

Для Uplink:

$$R_{eNB} = 18,29 \times 3 = 54,87 \text{ , Мбит/с}$$

Для Downlink:

$$R_{eNB} = 44,8 \times 3 = 134,4 \text{ , Мбит/с}$$

Далее рассчитывается число eNB в сети, для этого определяется число каналов, выделенных для сети. Общее число каналов вычисляется по формуле:

$$N_k = \frac{\Delta f \Sigma}{\Delta f_k} \text{ , (каналов)} \quad (4.8)$$

где $\Delta f \Sigma$ –полоса частот, выделенная для работы сети, равная 20 МГц;

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		73

Δf_k – ширина ресурсного блока LTE, равна 180 кГц;

Общее число каналов:

$$N_k = \frac{20000}{180} = 111, \text{ (каналов)}$$

При частотном планировании будет использован метод мягкого повторного использования частот, и каждой соте будет выделяться вся полоса системы, тогда размерность кластера будет равна единице. Число каналов, необходимых для обслуживания абонентов в одном секторе одной соты вычисляется по формуле:

$$N_{\text{К.СЕК}} = \frac{N_k}{N_{\text{кл}}}, \text{ (каналов)} \quad (4.9)$$

где N_k – общее число каналов; 3

$N_{\text{кл}}$ – размерность кластера, равно единице;

Число каналов в одном секторе:

$$N_{\text{К.СЕК}} = \frac{111}{1} = 111, \text{ (каналов)}$$

Число каналов трафика в одном секторе одной соты определяется в соответствии со стандартом радиодоступа:

$$N_{\text{КТ.СЕК}} = N_{\text{КТ1}} \times N_{\text{К.СЕК}}, \text{ (каналов)} \quad (4.10)$$

где $N_{\text{КТ.СЕК}}$ – каналы трафика в одном секторе;

$N_{\text{КТ1}}$ – число каналов трафика в одном радиоканале, для OFDMA от одного до трех, принимается равным одному;

$N_{\text{К.СЕК}}$ – число каналов в одном секторе.

Число каналов трафика в одном секторе одной соты:

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		74

$$N_{\text{кт.сек}} = 1 \times 111, (\text{каналов})$$

Допустимая нагрузка в секторе одной соты определяется в соответствии с моделью Эрланга, представленной на рисунке 4.6.

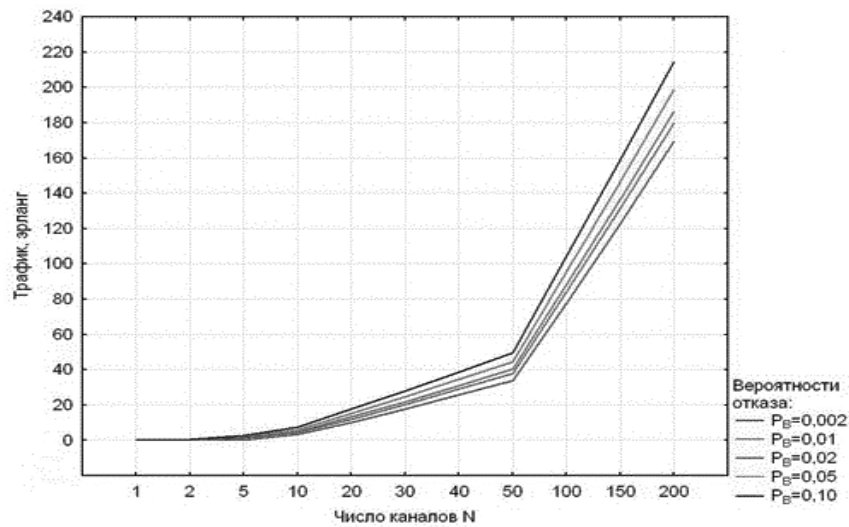


Рисунок 4.6 – Зависимость трафика от числа каналов для различных вероятностей отказа

Допустимая нагрузка принимается равной 80 Эрл.

Количество абонентов, которых способна обслуживать одна базовая станция определяется по формуле:

$$N_{\text{АБ.еNB}} = M_{\text{сек}} \times \frac{A_{\text{сек}}}{A_1}, \text{ абонентов} \quad (4.11)$$

где $N_{\text{АБ.еNB}}$ – количество абонентов, обслуживаемых одной еNB;

$M_{\text{сек}}$ – количество секторов еNB, равное трем;

$A_{\text{сек}}$ – допустимая нагрузка в секторе одной соты

где A_1 – средняя по всем видам трафика абонентская нагрузка от одного абонента; значение A_1 может составлять (0,04...0,2) Эрл Таким образом:

$$N_{ABeNB} = 3 \times \frac{80}{0,2} = 1200, \text{ абонентов}$$

Необходимое число базовых станций рассчитывается по формуле:

$$N_{eNB} = \frac{N_{AB}}{N_{AB.eNB}} \quad (4.12)$$

где N_{eNB} – необходимое число базовых станций;

N_{AB} – потенциальное количество абонентов, равное примерно 20 % от населения, и равное 16564 человек;

$N_{AB.eNB}$ – количество абонентов, обслуживаемых одной eNB.

Необходимое количество базовых станций:

$$N_{eNB} = \frac{16564}{1200} + 1 = 15, \text{ (eNB)}$$

Средняя пропускная способность сети определяется формулой:

$$R_N = (R_{eNB.(UPLINK)} + R_{eNB.(DOWNLINK)}) \times N_{eNB}, \text{ Мбит/с} \quad (4.13)$$

где R_N – пропускная способность сети (Мбит/с);

R_{eNB} – пропускная способность базовой станции (Мбит/с)

N_{eNB} – число базовых станций.

Пропускная способность сети:

$$R_N = (54.87 + 134.4) \times 15 = 2839, \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$$

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		76

Далее дадим проверочную оценку емкости проектируемой сети и сравним с рассчитанной. Определим усредненный трафик одного абонента в ЧНН (часы наибольшей нагрузки):

$$R_{m.чнн} = \frac{T_m}{N_{чнн} \times N_d} \quad (4.14)$$

где T_m - средний трафик одного абонента в месяц, $T_m = 30$ Гбайт/мес;

$N_{чнн}$ – число ЧНН в день, $N_{чнн} = 7$;

N_d – число дней в месяце, $N_d = 30$.

$$R_{т.чнн} = \frac{30}{7 \times 30} = 0.14 \text{ ,Мбит/с}$$

Определим общий трафик проектируемой сети в ЧНН $R_{общ./чнн}$ по формуле:

$$R_{общ./чнн} = R_{т.чнн} \times N_{акт.аб} \quad (4.15)$$

где $N_{акт.аб}$ – число активных абонентов в сети; определим число активных абонентов в сети как 80% от общего числа потенциальных абонентов $N_{аб}$, то есть $N_{акт.аб} = 16564 \times 80\% = 13250$ абонентов.

$$R_{общ./чнн} = 0,14 \times 13250 = 1855 \text{ (Мбит/с)}$$

Таким образом, $R_N > R_{общ./чнн}$. Это условие показывает, что проектируемая сеть не будет подвергаться перегрузкам в ЧНН.

4.6 Частотное планирование сети LTE в городе Усть-Илимск

Составим частотный план. Планируемая сеть будет использовать диапазон частот для линии «вверх» (UL) 847-857(МГц), для линии «вниз» (DL) 806-816(МГц). Ширина частотного спектра 20 МГц. Будет использован метод мягкого повторного использования частот. Каждому сектору eNB будет

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		77

выделено 20 МГц. Разделим полосу частот на 3 части и получим $f_1=6,66$; $f_2=6,66$; $f_3=6,66$.

Метод мягкого повторного использования частот изображен на рисунке 4.7.

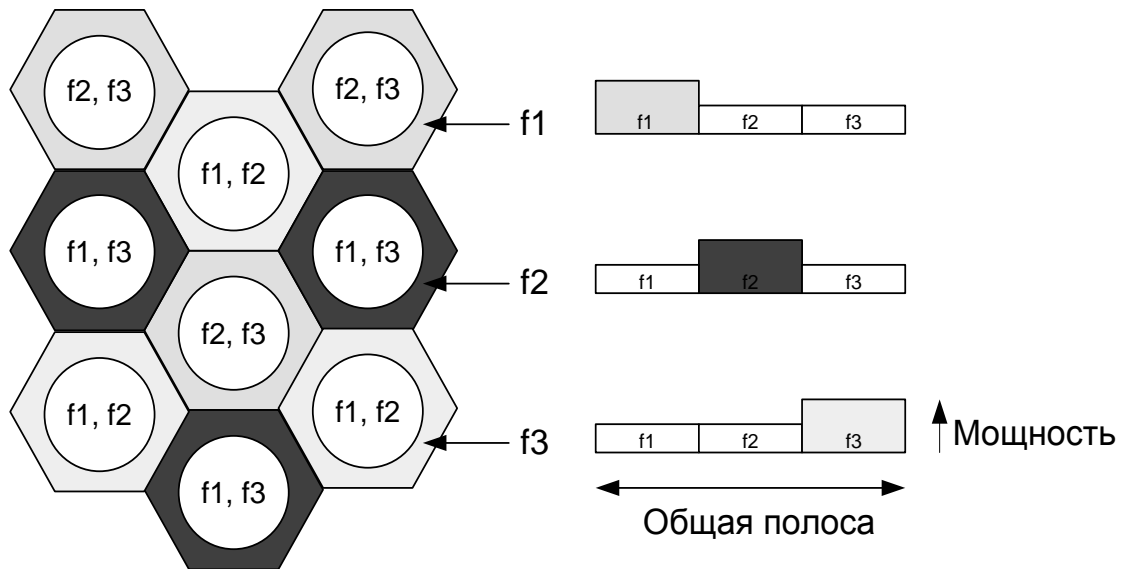


Рисунок 4.7– Метод мягкого повторного использования частот

Присвоим каждой из трех частей спектра условный номер и результаты составления частотного плана сведем в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Частотный план сети LTE в г. Усть-Илимск

Номер eNB	Сектор	Азимут	Радиус зоны обслуживания, км	Условный номер части частотного спектра
1	2	3	4	5
1	1.1	0	2,02	X
	1.2	120	2,02	Y
	1.3	240	2,02	Z
2	2.1	0	2,02	X
	2.2	120	2,02	Y
	2.3	240	2,02	Z
3	3.1	0	2,02	X
	3.2	120	2,02	Y
	3.3	240	2,02	Z
4	4.1	0	2,02	X
	4.2	120	2,02	Y
	4.3	240	2,02	Z

Окончание таблицы 4.2

1	2	3	4	5
5	5.1	0	2,02	X
	5.2	120	2,02	Y
	5.3	240	2,02	Z
6	6.1	0	2,02	X
	6.2	120	2,02	Y
	6.3	240	2,02	Z
7	7.1	0	2,02	X
	7.2	120	2,02	Y
	7.3	240	2,02	Z
8	8.1	0	2,02	X
	8.2	120	2,02	Y
	8.3	240	2,02	Z
9	9.1	0	2,02	X
	9.2	120	2,02	Y
	9.3	240	2,02	Z
10	10.1	0	2,02	X
	10.2	120	2,02	Y
	10.3	240	2,02	Z
11	11.1	0	2,02	X
	11.2	120	2,02	Y
	11.3	240	2,02	Z
12	12.1	0	2,02	X
	12.2	120	2,02	Y
	12.3	240	2,02	Z
13	13.1	0	2,02	X
	13.2	120	2,02	Y
	13.3	240	2,02	Z
14	14.1	0	2,02	X
	14.2	120	2,02	Y
	14.3	240	2,02	Z
15	15.1	0	2,02	X
	15.2	120	2,02	Y
	15.3	240	2,02	Z

4.7 Ситуационное расположение eNB на территории Усть-Илимска

Целью проектирования не является полный радиоохват территории района. Главное в данном проекте – это обеспечение устойчивым радиосигналом основной части населения Усть-Илимска. С учетом проведенного частотного планирования на карту были нанесены базовые станции с зонами покрытия (см. рисунок 4.8).

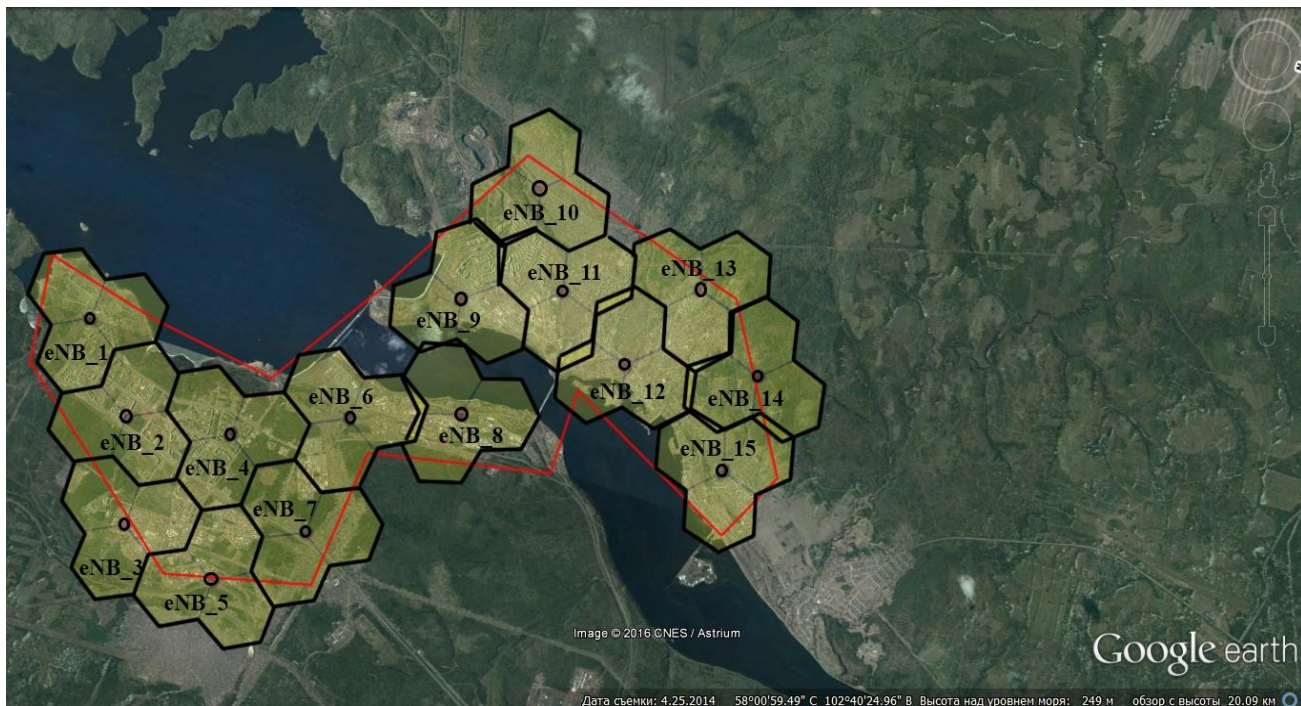


Рисунок 4.8 – Зоны покрытия eNodeB начального приближения сети LTE в городе Усть-Илимске.

На рисунке 4.9 представлен результат частотного планирования.



Рисунок 4.9 – Частотно-территориальный план, нанесенный на карту покрытия

Для объединения в сеть 15 базовых станций будет использована существующая ВОЛС, что значительно сократит расходы. При планировании расположений eNB были учтены местонахождения существующих площадок

БС, что также сокращает ОПЕХ (операционные расходы). Всё вышеуказанное оборудование будет располагаться в серверной принадлежащей компании МегаФон, что обеспечит должные условия для размещения телекоммуникационного оборудования.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		81

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА В ГОРОДЕ УСТЬ-ИЛИМСК

5.1 Расчет капиталовложений

Капитальные вложения представляют собой смету (таблица 5.1) затрат на реализацию проекта и включают в себя все необходимое коммуникационное оборудование, линию связи, стоимость лицензионного программного обеспечения и т.д.

Таблица 5.1– Смета затрат на оборудование

Наименование	Кол-во единиц	Стоимость (руб)	
		за единицу	всего
Базовый блок BBU3900 FDD	15	390 000	5 850 000
Радиомодуль RRU 3268 (800)	45	195 000	8 775 000
Панель распределения питания DCDU-03	15	30 000	450 000
Антенны 80010674 «Kathrein»	45	150 000	6 750 000
Платформа eCNS600	1	2 275 000	2 275 000
Статив под оборудование eCNS600	1	42 550	42 550
Маршрутизатор iManager M2000	1	615 000	615 000
Монтажные и пуско-наладочные работы			3 500 000
Оплата разработки проекта			1 500 000
Разовая плата за использование радиочастотного спектра		504 000	504 000
ИТОГО			23 781 550

При приобретении оборудования обычно предусматриваются следующие расходы: $K_{пр}$ – Затраты на приобретение оборудования; $K_{тр}$ – транспортные

расходы в т.ч. таможенные расходы (4% от $K_{пр}$); $K_{смп}$ – строительно-монтажные расходы (20% от $K_{пр}$); $K_{т/у}$ – расходы на тару и упаковку (0,5% от $K_{пр}$); $K_{зср}$ – заготовительно-складские расходы (1,2% от $K_{пр}$); $K_{пнр}$ – прочие непредвиденные расходы (3% от $K_{пр}$).

Таким образом, общие капитальные вложения рассчитываются как:

$$KB = K_{об} + (K_{пр} + K_{тр} + K_{смп} + K_{т/у} + K_{зср} + K_{пнр})K_{об}, \text{ руб} \quad (5.1)$$

$$KB=23781550+23781550*(0,04+0,2+0,03+0,012+0,005)=30\ 606\ 854 \text{ ,руб}$$

5.2. Калькуляция эксплуатационных расходов

Эксплуатационными расходами называются текущие расходы предприятия на производство или предоставление услуг. В состав эксплуатационных расходов входят все расходы на содержание и обслуживание сети. Эти расходы имеют текущий характер. Эксплуатационные расходы по своей экономической сущности выражают себестоимость услуг связи в денежном выражении.

Для определения эксплуатационных расходов по проекту используются следующие статьи:

1. затраты на оплату труда;
2. страховые взносы;
3. амортизация основных фондов;
4. материальные затраты;
5. прочие производственные расходы.

В связи с тем, что проект предполагает модернизацию существующей сети, то будет произведено увеличение персонала (таблица 5.2).

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		83

Таблица 5.2 – Состав персонала по обслуживанию оборудования

Наименование должности	Оклад	Количество, чел.	Сумма з/п, руб.
Ведущий инженер	40 000	1	40 000
Инженер 1 кат.	30 000	2	60 000
Инженер-программист.	25 000	2	50 000
Монтажник	20 000	3	60 000
ИТОГО		8	210 000

Годовой фонд оплаты труда для персонала рассчитывается как:

$$\text{ФОТ} = \sum_{i=1}^K (T * P_i * I_i) * 12, \text{ руб} \quad (5.2)$$

$$\text{ФОТ} = 2\,820\,000, \text{ руб}$$

где: I_i – количество работников каждой категории; P_i – заработная плата работника каждой категории, руб; 12 – количество месяцев; T – коэффициент премии (если премии не предусмотрены, то $T=1$).

Далее рассчитываются страховые взносы, которые составляют 30% от заработной платы сотрудника.

$$\text{СВ} = \text{ФОТ} * 0,3, \text{ руб} \quad (5.3)$$

$$\text{СВ} = 2\,820\,000 * 0,3 = 846\,000, \text{ руб}$$

Под амортизацией понимается процесс постепенного возмещения стоимости основных фондов, в целях накопления средств для реконструкции и приобретения основных средств. Самым распространенным способом оценки амортизации является учет амортизации, составленный исходя из общего срока службы основных фондов, в этом случае:

$$AO = T / F, \text{ руб} \quad (5.4)$$

где Т – стоимость оборудования,
F – срок службы этого оборудования.

$$AO = 24\,757\,550/10 = 2\,475\,755, \text{ руб}$$

Величина материальных затрат включает в себя оплату электроэнергии для производственных нужд, затраты на материалы и запасные части и др. Эти составляющие материальных затрат определяются следующим образом:

а) затраты на оплату электроэнергии определяются в зависимости от мощности стационарного оборудования:

$$Z_{\text{эн}} = T * 24 * 365 * P \quad (5.5)$$

где Т – тариф на электроэнергию (руб./кВт· час),
P – мощность установок (кВт).

$$Z_{\text{эн}} = 0.92 * 24 * 365 * 21 = 169243, \text{ руб}$$

б) затраты на материалы и запасные части составляют 3,5% от основных производственных фондов и определяются по формуле:

$$Z_{\text{мз}} = KB * 0,035 \quad (5.6)$$

где KB – капитальные вложения, затраты на оборудование.

$$Z_{\text{мз}} = 30606854 * 0,035 = 1071240, \text{ руб}$$

Общие материальные затраты равны:

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{эн}} + Z_{\text{мз}} \quad (5.7)$$

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		85

где $Z_{\text{эн}}$ – затраты на оплату электроэнергии;

$Z_{\text{м}}$ – материальные затраты.

Прочие расходы предусматривают общие производственные ($Z_{\text{пр}}$) и эксплуатационно-хозяйственные затраты ($Z_{\text{эк}}$):

$$Z_{\text{пр}} = \text{ФОТ} * 0,15 \quad (5.8)$$

$$Z_{\text{эк}} = \text{ФОТ} * 0,25 \quad (5.9)$$

где ФОТ – годовой фонд оплаты труда.

$$Z_{\text{пр}} = 2820000 * 0,15 = 423000 \text{ , руб}$$

$$Z_{\text{эк}} = 2820000 * 0,25 = 705000 \text{ , руб}$$

Расчет размера ежегодной платы за используемый спектр частот производится по формуле:

$$P_{\Gamma} = \sum_{i=1}^4 P_{\Gamma(KB)}^i \quad (5.10)$$

где:

$$P_{\Gamma(KB)} = C_{\Gamma} / 4 \times K_{\text{диап}} \times K_{\text{рч}} \times K_{\text{тех}} \times \text{ДР} / \text{ДК} \quad (5.11)$$

P_{Γ} - размер ежегодной платы, руб.;

$P_{\Gamma(KB)}$ - размер ежегодной платы за квартал, руб.;

C_{Γ} - ставка ежегодной платы, руб.;

$K_{\text{диап}}$ - коэффициент, учитывающий используемый диапазон радиочастот;

$K_{\text{рч}}$ - коэффициент, учитывающий количество используемых радиочастот (радиочастотных каналов);

$K_{\text{тех}}$ - коэффициент, учитывающий технологию, применяемую при использовании радиочастотного спектра;

ДР - количество дней действия разрешения в течение квартала;

ДК - количество дней в оплачиваемом квартале.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$П_r = 1900800, руб$$

Расчет стоимости аренды виртуальных каналов рассчитывается по формуле:

$$З_{кан} = T * N \quad (5.12)$$

где T – стоимость аренды одного канала;

N- количество арендуемых каналов

$$З_{кан} = 35000 * 16 = 560\,000, руб$$

Результаты расчетов годовых эксплуатационных расчетов приведены в таблице 5.3

Таблица 5.3 – Годовые эксплуатационные расходы

Наименование затрат	Сумма затрат, руб.	Удельный вес статей, %
1. ФОТ	2 820 000	26
2. Страховые взносы	846 000	8
3. Амортизационные отчисления	2 475 755	23
4. Материальные затраты	1 240 483	11
5. Прочие расходы	1 128 000	10
6. Ежегодная плата за аренду частот	1 900 800	17
7. Аренда виртуальных каналов	560 000	5
ИТОГО	10 971 038	100

5.3. Калькуляция доходов

Внедрение в сеть технологии LTE обеспечит пользователям высокоскоростной доступ в интернет. Основной доход будет складываться именно из доходов от предоставления этой услуги. Услуга безлимитного высокоскоростного доступа в интернет будет предоставляться в рамках нескольких тарифных планов, представленных в таблице 5.4.

Таблица 5.4 –Тарифные планы

Тарифный план	Абонентская плата, руб./мес.	Объем трафика на максимальной скорости	Доля абонентов, %
Интернет XS	180	1 ГБ	40
Интернет S	350	4 ГБ	30
Интернет M	450	10 ГБ	20
Интернет L	850	30 ГБ	8
Интернет XL	1190	Без ограничений	2

В таблице 5.5 представлено предполагаемое количество подключаемых абонентов в определенный период времени (год).

Таблица 5.5 – Предполагаемое количество подключаемых абонентов в определенный период времени (год).

Год	Количество подключаемых абонентов
1	4969 (30% от общего-16564)
2	4969 (42,5% от оставшихся-11595)
3	2451 (37% от оставшихся-6626)
4	1252 (30% от оставшихся-4174)
5	877 (30 от оставшихся-2922)
6	613 (30% от оставшихся-2045)
7	430 (30% от оставшихся-1432)
8	300 (30% от оставшихся-1002)
9	702 (100% от оставшихся 702)

Годовой доход за предоставление абонентам доступа к различным услугам рассчитывается как:

$$D_{\text{год}} = \sum_{i=1}^J N_i * B_i * 12, \quad (5.13)$$

В таблице 5.6 представлены доходы от абонентской платы по годам

Таблица 5.6 – Доходы за предоставление услуг

Год	Количество абонентов	Доход, руб
1	4969	21394526
2	4969	21394526
3	2451	10553026
4	1252	5390611
5	877	3776011
6	613	2639333
7	430	1851408
8	300	1291680
9	702	3022531

5.4 Определение оценочных показателей проекта

Среди основных показателей проекта можно выделить срок окупаемости, т.е. временной период, когда реализованный проект начинает приносить прибыль превосходящую ежегодные затраты.

Для оценки срока окупаемости можно воспользоваться принципом расчета чистого денежного дохода (NPV), который показывает величину дохода на конец i -го периода времени. Данный метод основан на сопоставлении величины исходных инвестиций (IC) с общей суммой дисконтированных чистых денежных поступлений (PV) за весь расчетный период. Иными словами этот показатель представляет собой разность дисконтированных показателей доходов и инвестиций, рассчитывается по формуле (5.14):

$$NPV = PV - IC \quad (5.14)$$

где PV – денежный доход, рассчитываемый по формуле (5.15); IC – отток денежных средств в начале n -го периода, рассчитываемый по формуле (5.16).

$$PV = \sum_{n=0}^T \frac{P_n}{(1+i)^n} \quad (5.15)$$

где P_n – доход, полученный в n -ом году, i – норма дисконта, T – количество лет, для которых производится расчет.

$$IC = \sum_{n=0}^m \frac{I_n}{(1+i)^n} \quad (5.16)$$

где I_n – инвестиции в n -ом году, i – норма дисконта равная 13%, m – количество лет, в которых производятся выплаты.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		90

В формулах (5.15) и (5.16) $n=0$, т.к. 0 год это год на ввод сети в эксплуатацию. В этот год доходы отсутствуют, а присутствуют только затраты на закупку оборудования и оплату годовых расходов. Оценка экономических показателей проекта представлена в таблице 5.7.

Таблица 5.7–Оценка экономических показателей проекта с учетом дисконта

Год	P	PV	I	IC	NPV
0	0	0	41 577 892	41 577 892	-41 577 892
1	21 394 526	18 933 209	10 971 038	51 286 775	-33 353 566
2	42 789 052	52 443 313	10 971 038	59 878 707	-7 435 394
3	53 342 078	89 412 049	10 971 038	67 482 187	21 929 862
4	58 732 689	125 433 907	10 971 038	74 210 930	51 222 977
5	62 508 700	159 361 125	10 971 038	80 165 570	79 195 555
6	65 148 033	190 652 932	10 971 038	85 435 163	105 217 770
7	66 999 441	219 131 758	10 971 038	90 098 519	129 033 239
8	68 291 121	244 820 136	10 971 038	94 225 383	150 594 753
9	71 313 652	268 559 370	10 971 038	101 109 415	170 681 894

Как видно из приведенных в таблице 5.7 рассчитанных значений, проект окупиться на 3 году эксплуатации, так как в конце 3 года мы имеет положительный NPV.

Срок окупаемости (PP) – показатель, наиболее часто принимаемый в аналитике, под которым понимается период времени от момента начала реализации проекта до того момента эксплуатации объекта, в который доходы

от эксплуатации становятся равными первоначальным инвестициям и может приниматься как с учетом фактора времени, так и без его участия. Точный срок окупаемости можно рассчитать по формуле:

$$PP = T + \frac{|NPV_{n-1}|}{(|NPV_{n-1}| + NPV_n)} \quad (5.17)$$

где T – значение периода, когда чистый денежный доход меняет знак с «-» на «+»; NPV_n – положительный чистый денежный доход в n году; NPV_{n-1} – отрицательный чистый денежный доход по модулю в $n-1$ году.

$$PP = 3 + 10016460 / (10016460 + 17947409) = 3,25 \text{ года}$$

Исходя из этого, срок окупаемости, отсчитанный от начала операционной деятельности (конец нулевого года), составляет 3,25 года.

Индекс рентабельности представляет собой относительный показатель, характеризующий отношение приведенных доходов приведенным на ту же дату инвестиционным расходам и рассчитывается по формуле:

$$PI = \frac{\sum_{n=1}^T \frac{P_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^m \frac{I_n}{(1+i)^{n-1}}} \quad (5.18)$$

$$PI = 125433907 / 74210930 = 1,69$$

Так как $PI > 1$, то проект следует принять.

Далее вычислим внутреннюю норму доходности (IRR). Внутренняя норма доходности – норма прибыли, порожденная инвестицией. Это та норма прибыли, при которой чистая текущая стоимость инвестиции равна нулю, или это та ставка дисконта, при которой дисконтированные доходы от проекта равны инвестиционным затратам. Внутренняя норма доходности определяет

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		92

максимально приемлемую ставку дисконта, при которой можно инвестировать средства без каких-либо потерь для собственника. IRR должен быть выше средневзвешенной цены инвестиционных ресурсов:

$$IRR > i \quad (5.19)$$

где i – ставка дисконтирования

Расчет показателя IRR осуществляется путем последовательных итераций. В этом случае выбираются такие значения нормы дисконта i_1 и i_2 , чтобы в их интервале функция NPV меняла свое значение с «+» на «-», или наоборот. Далее по формуле делается расчет внутренней нормы доходности:

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (i_2 - i_1) \quad (5.20)$$

где i_1 – значение табулированного коэффициента дисконтирования, при котором $NPV > 0$; i_2 – значение табулированного коэффициента дисконтирования, при котором $NPV < 0$.

Для описанного выше проекта будем иметь:

$i_1 = 13$, при котором $NPV_1 = 21\,929\,862$ руб.; $i_2 = 38$ при котором $NPV_2 = -1\,194\,527$ руб.

Следовательно, расчет внутренней нормы доходности будет иметь вид:

$$IRR = 13 + \frac{21929862}{21929862 + 1194527} * (38 - 13) = 36,75$$

Таким образом, внутренняя норма доходности проекта составляет 36,75 %, что больше цены капитала, которая рассматривается в качестве 13%, следовательно, проект следует принять.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		93

Итак, в данном разделе осуществлена оценка капитальных вложений в предлагаемый проект и калькуляция эксплуатационных расходов. Определен общий доход от реализации проекта, рассчитаны основные оценочные показатели проекта, характеризующие финансовый уровень решения задач. Рассчитанные технико-экономические показатели на конец расчетного периода сведены в таблицу 5.8.

Таблица 5.8 – Основные технико-экономические показатели проекта

Показатели	Численные значения
Количество абонентов, чел	16564
Капитальные затраты,руб	30 606 854
Ежегодные эксплуатационные расходы,руб, в том числе:	10 971 038
Фонд оплаты труда	2 820 000
Страховые взносы	846 000
Амортизационные отчисления	2 475 755
Материальные затраты	1 240 483
Прочие расходы	1 128 000
Ежегодная плата за аренду частот	1 900 800
Аренда виртуальных каналов	560 000
Доходы (NPV), руб	21 929 862
Внутренняя норма доходности (IRR)	36,75
Индекс рентабельности (PI)	69%
Срок окупаемости, год	3 года и 3 месяца

Можно с уверенностью сделать вывод, что проектирование данной сети с использованием технологий LTE является экономически целесообразным.

6 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА

Проектными решениями предусматривается и указывается на необходимость строгого соблюдения норм и правил по технике безопасности и охране труда в процессе строительного-монтажных работ и эксплуатации.

В качестве основных мероприятий по охране труда и техники безопасности в соответствии с требованиями ПУЭ, СНиП 12-03-2001, СНиП 12-03-2002, ПТЭЭП, ПОТ РО 45-002-94 (с изменениями 1998 года), ПОТ РО 45-008-97 предусмотрено:

- заземление (зануление) корпусов оборудования, элементов электроустановок;
- ограждение и изоляцию токоведущих частей;
- укладку диэлектрических ковров перед электрооборудованием;
- обеспечение условий труда персонала в соответствии с требованиями «Правил по охране труда на радиопредприятиях» ПОТ РО 45-002-94 (с изменениями 1998 года);
- обучение, с проверкой знаний, обслуживающего персонала в соответствии с «Правилами по охране труда на радиопредприятиях» ПОТ РО 45-002-94 (с изм. 1998 года);
- размещение радиотехнического оборудования с эксплуатационными проходами в соответствии с требованиями РД 45.162-2001 «Комплексы сетей сотовой и спутниковой подвижной связи общего пользования. Ведомственные нормы технологического проектирования»;
- использование специальной обуви и одежды в соответствии с требованиями «Правила по охране труда на центральных и базовых станциях радиотелефонной связи» ПОТ РО 45-008-97;
- соединение блоков, входящих в состав РТО, следует выполнять только при отключенном питании.

При работе на высоте строго соблюдать требования «Правил по охране труда на центральных и базовых станциях радиотелефонной связи» ПОТ РО 45-

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		95

008-97. К работам на высоте допускаются лица не моложе 18 лет и допущенные к высотным работам. Работы по монтажу на высоте должны производиться звеном из трех монтажников высотников четвертого или пятого разрядов с обеспечением требований по технике безопасности работ на высоте при монтаже стальных конструкций. Запрещается находиться на высоте во время грозы и при ее приближении, а также при силе ветра более 12 м/с, гололеде, дожде и снегопаде.

Электромонтажные работы необходимо производить в строгом соответствии с требованиями ПУЭ (издание 7), СНиП 3.05.06-85.

Ответственным за правильную организацию и безопасное проведение работ является руководитель работ.

При производстве ремонтных работ, для электропитания инструмента, обслуживающему персоналу следует использовать переносной понижающий трансформатор.

Пожарная безопасность в проекте обеспечивается следующими мерами:

- кровля здания для размещения оборудования соответствует требованиям СНиП21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений»;

- тип технологического оборудования соответствует категории и классу зоны здания, где оно планируется к установке;

- сечение электропитающих жил кабелей (в том числе в комбинированном оптическом кабеле) соответствуют требованиям ПУЭ;

-кабельный ввод после прокладки кабелей герметизируется негорючим материалом. Кабель покрыть двумя слоями противопожарной мастики МПВО на один метр в обе стороны от кабельного прохода.

Безопасность при эксплуатации оборудования обеспечивается:

- использованием быстродействующих отключающих устройств системы питания;

- заземлением всех металлических частей, не находящихся под напряжением;

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		96

- использованием резиновых диэлектрических ковриков и индивидуальных средств защиты в местах, подлежащих оперативному обслуживанию и профилактике.

При монтаже, эксплуатации, осмотрах и ремонте оборудования необходимо строго руководствоваться «Правилами по охране труда» (ПОТ РО-45-008-97, ПОТ РО-45-010-2002).

Устанавливаемое и существующее оборудование вредных веществ в окружающую среду не выделяет.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данного дипломного проекта был разработан проект сети беспроводного широкополосного доступа на базе технологии LTE в городе Усть-Илимске Иркутской области. Все поставленные задачи для достижения цели проекта были решены. Был проведен анализ существующей сети, в ходе которого было определено предполагаемое количество абонентов сети – 16564 пользователей. Так же был проведен глубокий анализ технологии LTE.

Для предоставления услуг высокого качества были выбраны технологии «GigabitEthernet» – для организации транспортной сети, и технология беспроводной передачи данных «LTE» – для радиодоступа. Сеть построена на оборудовании фирмы-производителя «Huawei».

Был произведен расчет бюджета радиолинии, зон радиопокрытия, емкости сети и количества eNodeB. Так же решен вопрос с частотным планированием. В проекте используется метод мягкого повторного использования частот. Для уменьшения расходов было принято решение аренды виртуальных каналов у регионального провайдера «Ростелеком».

При проектировании было произведено технико-экономическое обоснование, которое показала хорошую рентабельность и целесообразность данного проекта. Срок окупаемости составил 3 года и 3 месяца. Первоначальные капитальные затраты составили около 30 607 000 рублей.

Проектируемая сеть на начальном этапе разрабатывалась из расчета покрытия всей территории предполагаемого расположения абонентов. В дальнейшем, при увеличении числа пользователей или большой нагрузке сети, возможно добавление оборудования доступа, так как при проектировании использовались технологии и принципы построения, обеспечивающие гибкость и масштабируемость сети.

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		98

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сети LTE и LTE Advanced: Архитектура, технологии и регулирование [Текст]/ Тихвинский В.О. ,Терентьев С.В., Варукина Л.А., Высочин В.П. - М.: Эко-Трендз, 2011 – 411 с.
2. Системы цифровой радиосвязи [Текст]/ Волков Л.Н. , Немировский М.С. , Шинаков Ю.С. - М.: Эко Трендз, 2005. — 392 с.
3. Технология сотовой связи LTE – почти 4G[Текст]/ В.Вишневский, А.Красилов, И. Шахнович – М.: Первая миля, 2009 – 388 с.
4. Сети мобильной связи LTE, технологии и архитектурах [Текст]/ Тихвинский В.О. ,Терентьев С.В., Юрчук А.Б. - М.: Эко-Трендз, 2010 – 283 с.
5. Широкополосные беспроводные сети передачи информации [Текст]/ Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2005.
6. WiMAX и LTE – противостояние или эволюция.[Текст]/ Альшуллер М., Портной С. – М.: Первая миля 3/2010
7. Болдышев А.В., Методические рекомендации по написанию технико-экономической части дипломной работы для студентов технических вузов – М.: БелГУ 2013.
8. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G.[Текст]/ Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2009. – 465 с
9. Варукина Л.А., Координация помех в сетях LTE// Радиочастотный спектр. – 2010. - №2. - С. 30-33.
10. Варукина Л.А., Технология MIMO в системах LTE// Электросвязь. – 2009. - №11. - С. 52-55.
11. 3GPP Long Term Evolution [Электронный ресурс] / Википедия URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution.htm (дата обращения: 24.05.2016)

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		99

12. Кафедра MForum.ru: Лидия Варукина. Упражнение по планированию радиосетей LTE [Электронный ресурс]/ www.mforum.ru – форум о 4G// URL: <http://www.mforum.ru/news/article/097078.htm> (дата обращения 28.05.2016)
13. Сравнение WiMAX с HSPA и LTE[Электронный ресурс]/ Сайт Sit-Company // URL: http://www.sit-com.ru/sat/sravnenie_wimax_lte.html (дата обращения 14.05.2016)
14. WiMAX vs LTE: революция или эволюция[Электронный ресурс]/ Технологии и средства связи// URL: <http://www.tssonline.ru/articles2/fix-op/wimax-vs-lte-revoluciya-ili-evoluciya.html> (дата обращения 18.05.2016)
15. Как перевести LTE - эволюция в долгосрочной перспективе[Электронный ресурс]/ www.mforum – форум о 4G// URL: <http://www.mforum.ru/analit/LTE.htm> (дата обращения 2.05.2016)
16. Официальный сайт компании «Huawei» [Электронный ресурс] / Huawei.com оборудование LTE // URL:<http://www.huawei.com> (дата обращения 15.05.2016г).

					11070006.11.03.02.121.ПЗВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		100