

# Содержание

<b>1</b>	<b>Анализ методов повышения качества на границе проводной и беспроводной сети . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1	Анализ перспектив развития беспроводных сетей . . . . .	3
1.2	Конвергенция фиксированных и мобильных сетей . . . . .	8
1.3	Обзор технологии LTE . . . . .	11
1.3.1	Общая структура сети LTE . . . . .	11
1.3.2	Архитектура базовой сети SAE . . . . .	15
1.4	Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE (VoLTE) . . . . .	17
1.4.1	Предпосылки предоставления услуг передачи речи и видео поверх LTE . . . . .	17
1.4.2	Обзор системы IP-мультимедиа (IMS) . . . . .	19
1.4.3	Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE на основе CSFB . . . . .	21
1.4.4	Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE на основе IMS/VoLTE . . . . .	21
1.5	Выводы по 1 разделу . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Анализ основных причин джиттера в проводной и беспроводной сети . . . . .</b>	<b>25</b>
2.1	Анализ основных причин джиттера в проводной сети . . . . .	26
2.1.1	Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 2) . . . . .	26
2.1.2	Перегрузка в локальной сети (тип 2) . . . . .	26
2.1.3	Перегрузки в канале доступа (тип 3) . . . . .	26
2.1.4	Распределение нагрузки между несколькими линиями доступа или сервис провайдерами (тип 1) . . . . .	27
2.1.5	Распределение нагрузки (тип 1) . . . . .	27
2.1.6	Внутреннее разделение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1) . . . . .	28
2.1.7	Высоко приоритетный служебный трафик (тип 2) . . . . .	28
2.2	Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE . . . . .	29
2.2.1	Хэндовер . . . . .	29
2.2.2	Расстояния между абонентом и базовой станцией . . . . .	29
2.2.3	Внутрисистемные помехи . . . . .	32
2.2.4	Замирания в канале . . . . .	36
2.3	Выводы ко 2 разделу . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Синтез алгоритма буфера компенсации джиттера прибытия пакетов на основе робастного фильтра Калмана . . . . .</b>	<b>42</b>
3.1	Синтез математической модели процесса задержки . . . . .	42
3.2	Анализ работы буфера компенсации джиттера и рабочих характеристик применительно к передаче потокового трафика через IP сети . . . . .	43
3.3	Систематизация типов, параметров и моделей буферов компенсации джиттера . . . . .	46
3.4	Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера. . . . .	48
3.4.1	Модель фиксированного буфера компенсации джиттера. . . . .	48

3.4.2	Модель адаптивного буфера компенсации джиттера. . . . .	48
3.5	Анализ алгоритмов фильтрации помех содержащих выбросы и скачки . . . .	49
3.5.1	Робастный фильтр Калмана (РФК) для ситуации выброса . . . . .	53
3.5.2	Робастный фильтр Калмана для ситуации скачка . . . . .	53
3.5.3	Гибридный робастный фильтр Калмана (ГРФК) . . . . .	53
3.6	Получение оценки случайного процесса с выбросами и скачками с помощью робастных фильтров . . . . .	53
3.7	Синтез алгоритма буфера компенсатора джиттера . . . . .	57
3.8	Обзор концепции потоковых агентов . . . . .	57
3.9	Выводы ко 3 разделу . . . . .	59
<b>Литература . . . . .</b>		<b>59</b>
<b>Список рисунков . . . . .</b>		<b>63</b>
<b>Список таблиц . . . . .</b>		<b>64</b>
<b>А Формирование транспортного блока в LTE . . . . .</b>		<b>65</b>
<b>В Архитектура имитационной модели LTE в NS3 . . . . .</b>		<b>69</b>
B.1	Архитектура LTE модели . . . . .	69
B.2	Архитектура EPC модели . . . . .	70
<b>С Моделирование изменения задержки в сети LTE при хэндовере абонента</b>		<b>75</b>
<b>D Моделирование изменения задержки в сети LTE при изменении расстояния между абонентом и базовой станцией . . . . .</b>		<b>76</b>

# Глава 1

## Анализ методов повышения качества на границе проводной и беспроводной сети

### 1.1 Анализ перспектив развития беспроводных сетей

В этом разделе мы рассмотрим тенденции развития мобильной связи. Согласно отчета Ericsson [1] число абонентов мобильной связи во всем мире выросло примерно на 8 процентов в годовом исчислении в 1 квартале 2013 года. Число абонентов мобильной широкополосной связи выросло еще быстрее за этот период в размере 45 процентов в годовом исчислении, достигнув около 1,7 миллиарда. Количество данных, передаваемых каждым устройством, также неуклонно продолжает расти. Около 50 процентов всех проданных мобильных телефонов в 1 квартале 2013 были смартфонами. Все эти факторы привели к удвоению мобильного трафика между 1 кварталом 2012 и 1 кварталом 2013 года.

В 1 квартале 2013 года общее количество мобильных устройств превысило 6,4 миллиарда. К концу 2018 года ожидается 9,1 миллиард обслуживаемых устройств.

Глобальное количество обслуживаемых широкополосных устройств достигло в 1 квартал 2013 года 1,7 миллиарда и к концу 2018 года достигнет 7 миллиардов (рис. 1.1). Основными устройствами широкополосного доступа есть и будут смартфоны. Мобильный широкополосный доступ получит большую долю от общей широкополосной связи на многих рынках, дополняя XDSL в определенных сегментах и заменяя его в других.

Количество обслуживаемых мобильных устройств, таких как мобильные ПК, мобильные роутеры, планшеты, которые используют большой экран, увеличится с 300 млн в 2012 году до 850 млн в 2018 году, что привнесет число абонентов фиксированной широкополосной связи (рис. 1.2). Общее количество смартфонов достигло в 2012 году 1,2 млрд и, как ожидается, вырастет до 4,5 млрд в 2018 году. На сегодняшний день основным мобильным устройством является базовый телефон. Проникновение смартфонов будет быстро увеличиваться, в то время как, по оценкам, количество обслуживаемых базовых телефонов останется высоким, медленно снижаясь с 5 млрд сегодня до 4 млрд в 2018 году. Это связано с тем что базовые телефоны будут продолжать находиться в нижнем сегменте продаваемых абонентских устройств.



Рисунок 1.1: Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [1]

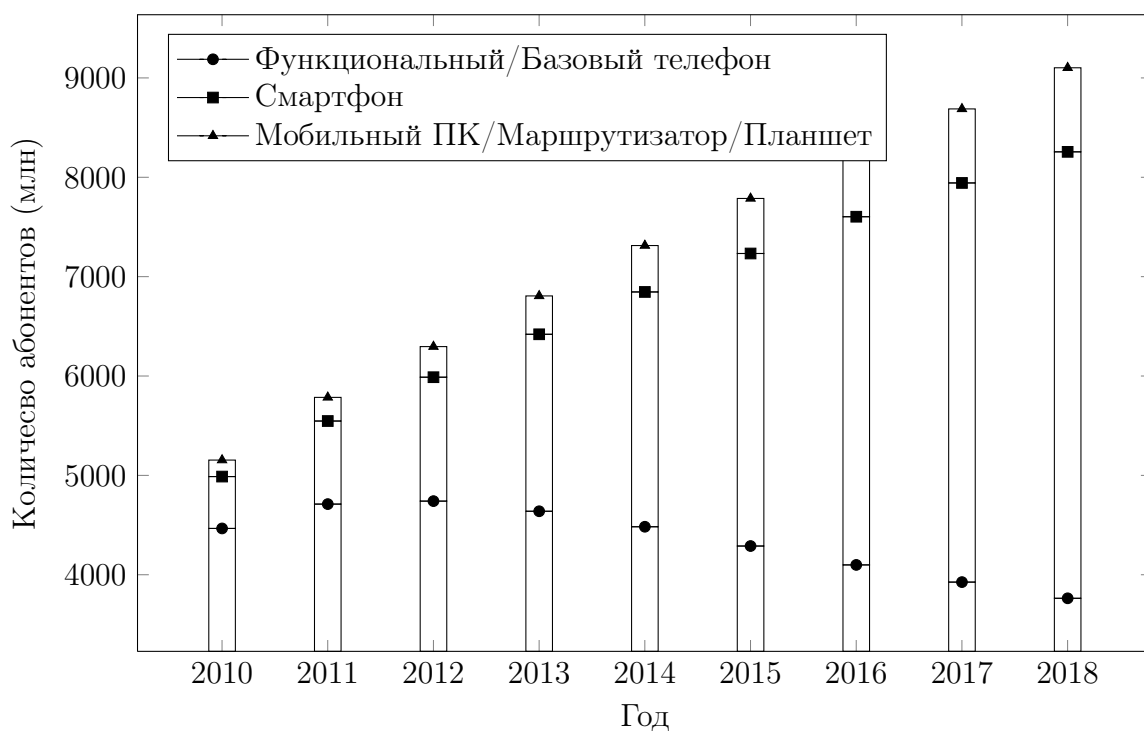


Рисунок 1.2: Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [1]

На рис. 1.3 иллюстрирован отчет по количеству обслуживаемых мобильных устройств различными технологиями: LTE, WCDMA/HSPA, GSM/EDGE, TD-SCDMA, CDMA и другими. Технология LTE, которая развернута и представлена во всех регионах, в 2018 году составит 2 млрд устройств. Эти устройства будут представлять лидирующую долю от общего количества устройств. Быстрый переход на более совершенные технологии в развитых странах, означает что мировое количество абонентов GSM/EDGE будет снижаться после 2012-2013 годов. Глобально, GSM/EDGE будет продолжать играть ведущую роль с точки зрения числа абонентов до посленних лет прогнозного периода. Это связано с тем что новые менее обеспеченные пользователи, вероятно будут использовать самые дешевые мобильные устройства и технологии мобильной связи. Кроме этого требуется время для обновления установленной базы мобильных устройств.

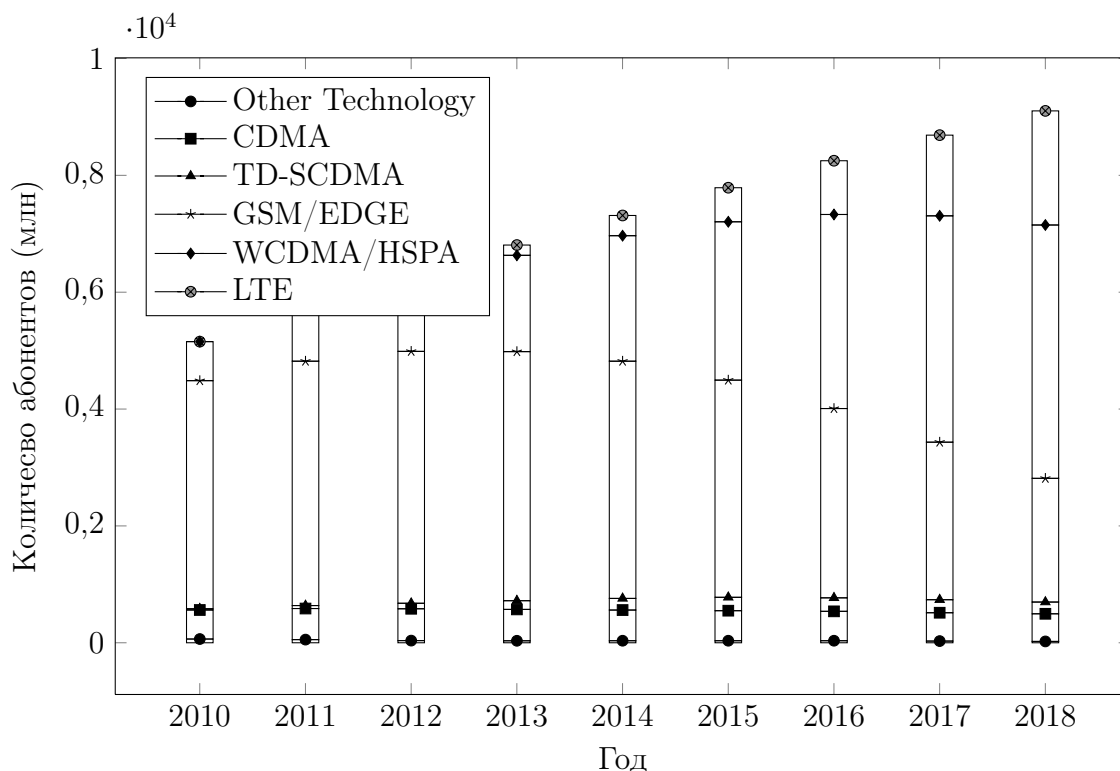


Рисунок 1.3: Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [1]

Мобильный трафик изменяется. На рис. 1.4 изображена устойчивая тенденция роста трафика данных с некоторыми сезонными колебаниями. Это показывает, что мобильные данные абонентов сильно вырастут. Ведущую роль в увеличении общего количества трафика данных сыграло непрерывное увеличение среднего объема данных передаваемое и принимаемое с каждого устройства.

В 2013 году, как и ожидалось, общий мобильный трафик продолжил тенденцию удвоения каждый год. Трафик от мобильных ПК доминирует в большинстве регионов. Тем не менее, трафик смартфонов растет быстрее за счет увеличения числа устройств. В последние годы прогнозного периода, трафик данных будет довольно равномерно разделен между мобильными телефонами, с одной стороны, планшетами, мобильными маршрутизаторами и мобильными ПК с другой (рис. 1.5). Мобильный трафик будет расти значительно быстрее, чем фиксированный трафик данных в течение прогнозируемого периода. Тем не менее, в абсолютном объеме, трафик в фиксированных сетях останется доминирующим за тот же период (рис. 1.6).

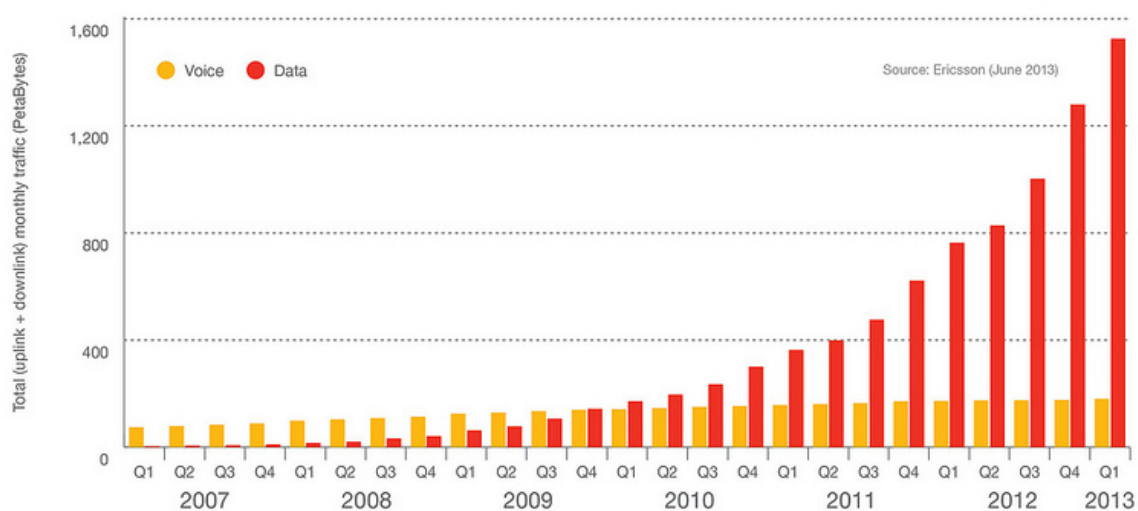


Рисунок 1.4: Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [1]

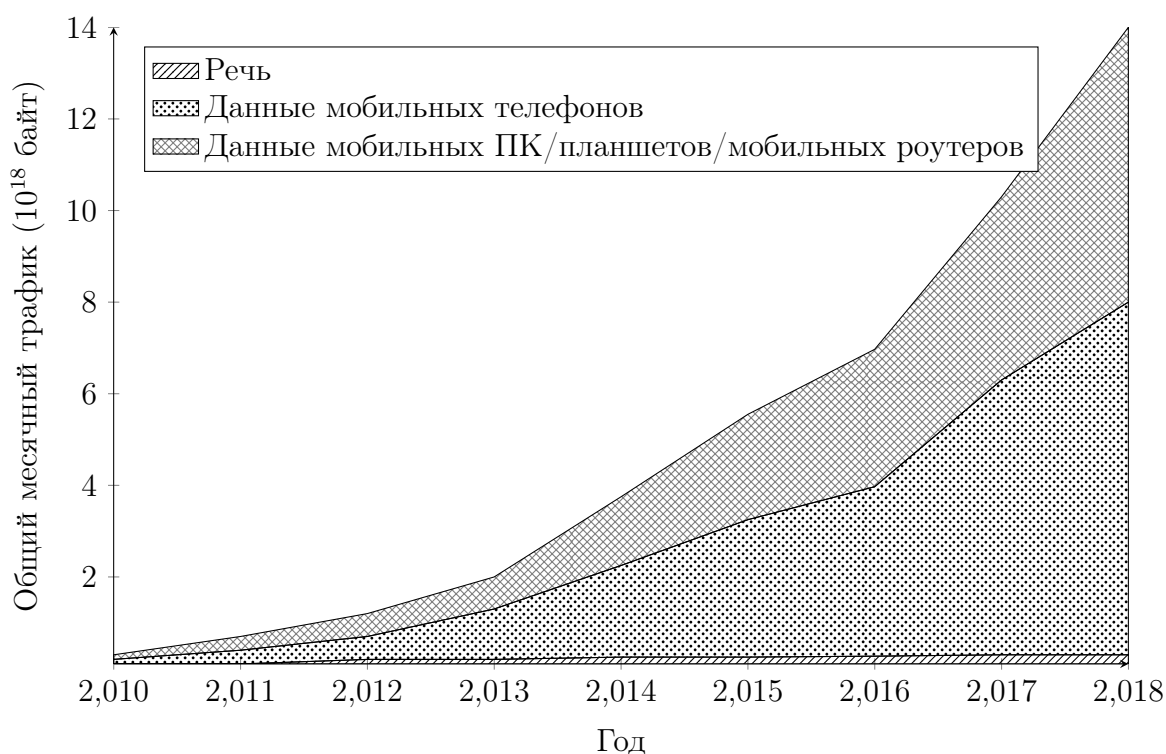


Рисунок 1.5: Глобальный трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2010-2018 [1]

Такие сервисы как социальные сети и сервисы с картинками и видео, являются драйверами роста мобильного трафика. В результате объем трафика возрастет к концу 2018 года в 12 раз. Рост трафика частично связан с размером экрана пользовательского устройства. Разрешение экрана также является фактором, влияющим на трафик. Современные смартфоны приблизились к уровню качества ПК экранов. В среднем один мобильный ПК генерирует приблизительно в 5 раз больше трафика чем смартфон. К концу 2012 года, средний мобильный ПК генерирует около 2,5 Гб трафика в месяц, по

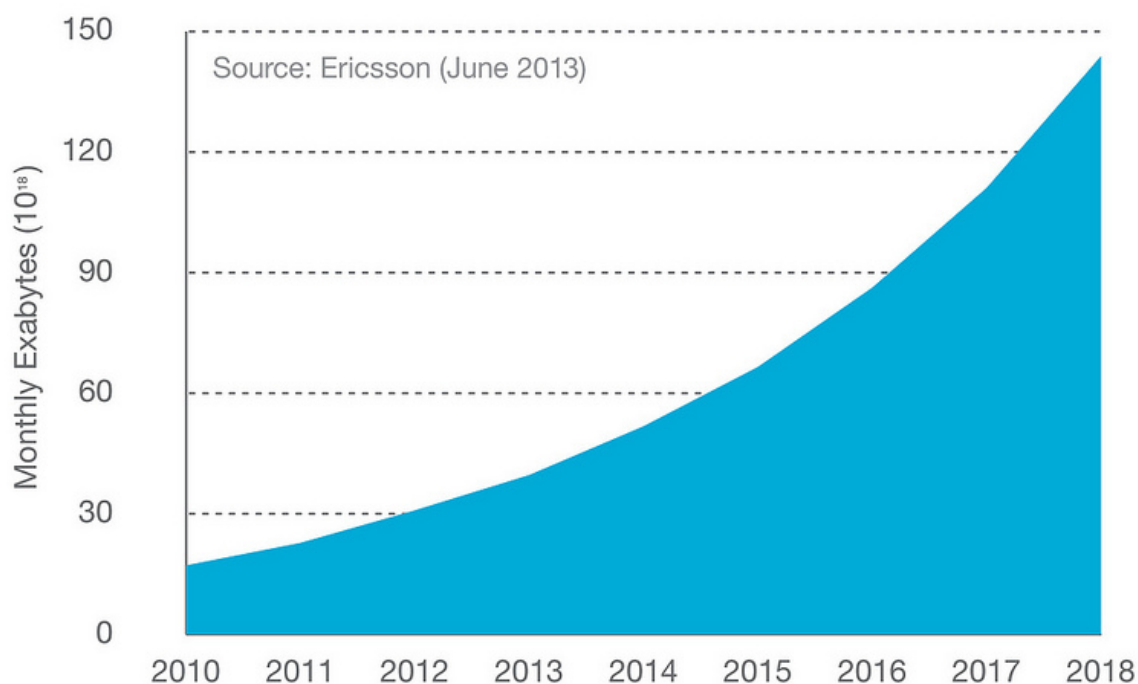


Рисунок 1.6: Глобальный трафик в фиксированных сетях, 2010-2018 [1]

сравнению со средним смартфоном - 450 МБ в месяц. К концу 2018 года, по оценкам, в среднем, мобильный ПК будет генерировать около 11 Гб в месяц и смартфон около 2 Гбайт. Следует отметить, что существуют большие различия в пользовательских шаблонах между различными сетями, рынками и пользователями.

Рост числа абонентов в широкополосной мобильной связи, является мощным стимулом роста для мобильного трафика. С увеличением числа пользователей, увеличивается количество устройств подключенных к сети, таких как смартфоны, планшеты, мобильные ПК, мобильные роутеры, электронные книги и камеры. Самым быстрорастущим сегментом в мобильном трафике является видео. Увеличение использования контента приводит в постоянный рост количество доступного контента, а так же к лучшим сетевым скоростям, которые приходят с развитием HSPA и LTE. Рост размеров экранов устройств и разрешения экранов, также будут драйвером увеличения мобильного трафика, так как они позволят смотреть видео высокой четкости, а в дальнейшем и сверх высокой.

Сервисы с потоковым видео так же показали высокую популярность. Люди используют эти сервисы на всех типах устройств. Так же видеоконференции при использовании мобильных устройств, будут стимулировать рост видео трафика в мобильных сетях. Сегодня видео составляет крупнейший сегмент трафика данных в мобильных сетях, и, как ожидается, будет расти примерно на 60 процентов в год вплоть до конца 2018 года, на этот момент, по прогнозам, объем видео трафика составит около половины от общего глобального трафика (рис. 1.7).

Потоковая музыка приобретает все большую популярность и аудио как ожидается, будет расти с годовым темпом роста около 50 процентов. Существует высокая степень неопределенности в прогнозе на аудио трафик на данном этапе, так как он очень сильно зависит от того, как сервисы потоковой музыки будут развиваться в ближайшие годы. Просмотр веб-страниц и социальных сетей будет каждый составлять около 10 процентов от общего объема трафика данных в 2018 году. Приход новых типов устройств или информационного контента способного быстро изменить трафик, в настоящее время, не

считается значимым. Кроме того, будет широкая вариация между сетями с различными профилями устройств, например, некоторые из них будут с доминированием РС в то время как другие будут способствовать использованию смартфонов. Трафик также будет меняться между рынками из-за различий в доступности контента и прав.

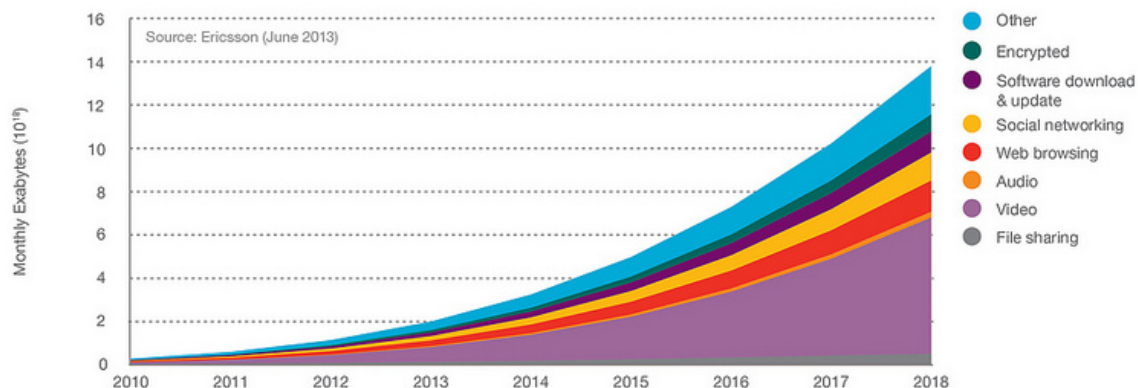


Рисунок 1.7: Мобильный трафик данных разбитый по приложениям, 2010-2018 [1]

Когда пользователь меняет свой телефон на смартфон, он все равно продолжает пользоваться голосовыми и текстовыми сообщениями. Пользователи склонны к развитию привычки использования приложения в течении некоторого времени после того как они открыли новое приложение или сервис. Рекомендации пользователей, семьи, рекламы и магазинов для новых и трендовых приложений играют значительную роль.

Со временем, пользователи, как правило, используют более современные услуги, которые ставят более высокие требования к возможностям устройства. Сегодня пользователи смартфонов, которые подключаются к сервисам с музыкой и потоковым видео уже потребляют больше, чем 2 Гб трафика в месяц в среднем. Это в четыре раза больше потребления среднего пользователя со смартфоном. Во многих магазинах, легальные потоковые сервисы для музыки и для видео набирают популярность. При достаточном контенте и правильном уровне цен эти услуги демонстрируют высокие темпы популяризации.

Прогнозы для каждой категории мобильных данных показывают значительный рост до 2018 года. Наибольший прирост ожидается от видео трафика, и, по оценкам, составит около половины всего мобильного трафика данных к концу прогнозируемого периода. Видео трафик, в том числе и часть зашифрованного и трафик совместного использования файлов, скорее всего, представит большую часть всего мобильного трафика данных к 2018 году.

## 1.2 Конвергенция фиксированный и мобильных сетей

Как мы уже рассмотрели, мобильные сети и трафик меняется и большинство операторов сталкиваются с такими проблемами, как насыщение рынка, ценовое давление и необходимостью снижения эксплуатационных затрат. Операторы фиксированной связи отмечают снижение доходов от предоставления традиционных услуг передачи речи и потерю доли наземных линий доступа. Для операторов продолжилась эпоха слияний и поглощений, для вендоров - слияний, поглощений и поиска взаимовыгодных альянсов (когда продуктовые линейки и маркетинговые возможности компаний взаимовыгодно дополняют друг друга). По ряду технических и административных причин продолжился



рост влияния на рынке компаний - системных интеграторов. Основными причинами этого является расширение абонентской базы мобильной связи и развитие услуг передачи речи через IP (Voice over IP - VoIP). В краткосрочной перспективе доходы провайдеров услуг фиксированной связи будут расти за счет доходов от услуг передачи данных IP, в частности, от широкополосных услуг для домашнего сектора. Многие операторы мобильной связи столкнулись с проблемой замедления темпов роста базы частных абонентов и вынуждены были уделить серьезное внимание повышению доходности в других областях, таких как услуги передачи данных и услуги на корпоративном рынке. В качестве одного из решений перечисленных проблем, является концепция конвергенции фиксированной и мобильной связи - Fixed Mobile Convergence (FMC), способствующая, с одной стороны, повышению доходов операторов, с другой - удовлетворению растущих требований конечных заказчиков, которые ориентированы на мобильные и IP-технологии. FMC будет способствовать принятию сетей нового поколения [2], в которых весь коммуникационный трафик использует IP. Существует несколько способов предоставления FMC услуг, некоторые из которых более технологически интегрированы, чем другие. Есть менее развитые формы FMC использующие двухрежимные телефоны сотовый/Wi-Fi, которые не имеют функции handover или имеют эту функцию, но не используют ее для передачи речи или для доступа к широкополосной сети в домашних условиях. Также существуют услуги соединяющие мобильную и фиксированную сеть, но в которых технологически не происходит конвергенция, такие как предложение единого голосового и почтового ящика поверх фиксированных и мобильных сетей. Концепция конвергенции фиксированных и мобильных сетей широка, многогранна и развивается.

Концепция FMC состоит из трех основных уровней: конвергенция сетей; конвергенция услуг; конвергенция приложений [3].

1. Сетевая конвергенция. На уровне сетевой конвергенции обеспечивается снижение эксплуатационных расходов за счет конвергенции различных сетей фиксированной и мобильной связи в единую магистральную сеть IP/MPLS, поддерживающую широкий спектр методов доступа: традиционной телефонии, DSL, выделенных каналов, беспроводных сетей (WLAN) и сетей радиодоступа (RAN) в сетях операторов мобильной связи. Конвергенция магистралей и сетей доступа является наиболее очевидным и проработанным этапом процесса слияния фиксированных и мобильных платформ. Эта концепция охватывает и конвергенцию магистралей фиксированных и мобильных сетей, в том числе для передачи значительных объемов речевого трафика по той же магистрали IP, по которой доставляются широкополосные данные, услуги GPRS и UMTS, - так называемый перевод транзитного трафика на сеть IP. Для операторов мобильной связи конвергентные сети обычно начинаются переводом трафика сервиса коротких сообщений (SMS) и сервиса мультимедийных сообщений (MMS) с традиционных платформ и сети сигнализации в сеть IP - это ускоряет конвергенцию протоколов сигнализации с IP. При передаче трафика сети радиодоступа 2.5G и 3G через оптимизированную сеть доступа IP сетевая конвергенция обеспечивает глубину проникновения вплоть до сети доступа оператора мобильной связи.
2. Конвергенция услуг. На уровне конвергенции услуг выполняются функции управления сессиями. Именно этот уровень делает возможным развертывание высокодоходных услуг нового поколения на основе IP, таких как мобильный доступ к данным, проведение аудио- и видеоконференций, передача речи и мгновенный обмен сообщениями. Осведомленность о каждой сессии и контроль над ними обеспечивает доступность услуги на любом абонентском терминале и через любой метод доступа, позволяя переключаться между различными типами доступа без негативного

воздействия на активные сессии. Кроме того, именно уровень конвергенции услуг гарантирует, что любой услуге IP выделяются соответствующие сетевые ресурсы, а любая услуга должным образом тарифицируется. Один из основных показателей функциональности конвергентной платформы, является обеспечение непрерывности услуги при пересечении границы между фиксированной и мобильной сетями. Концепция непрерывности услуги достаточно специфична для каждой из областей - передачи речи, передачи данных и передачи мультимедийного трафика. Однако такие технологии, как конвергентные речевые устройства (телефоны, смартфоны, КПК, ноутбуки и т. д.), архитектуры конвергенции речевых сессий и протоколы конвергенции сессий данных, являются связующим звеном между фиксированными и мобильными платформами. Другим ключевым элементом является осведомленность платформы, через которую доставляется услуга, о передаваемых сессиях и ее способность выполнять специфические действия по применению политик вне зависимости от местоположения участников сессии и их метода доступа, будь то проводной доступ по xDSL или мобильные данные в среде LTE. Конвергенция услуг - это тот основополагающий уровень, который в конечном счете обеспечивает потребителям удобство пользования услугами, выполняя незаметную для абонентов передачу сессий данных и речи между наземным и беспроводным широкополосными доменами. При этом сеть динамически адаптирует свои политики по выделению ресурсов и обеспечению качества обслуживания, учитывая факт мобильности терминала и то, в какой среде передачи терминал находится в данный момент.

3. Конвергенция приложений. Уровень конвергенции приложений включает собственно услуги, с которыми операторы выходят на рынок и которые они собираются рекламировать в качестве конечного продукта. В частности, непрерывные услуги передачи данных, предоставляемые через любую сеть доступа, речевые услуги для предприятий с двухрежимными терминалами (например, Wi-Fi/GSM) и т. д. Конвергенция приложений - это процесс доставки приложений через множество различных сред передачи в формате, учитывающем различие скоростей доступа, которые эти среды обеспечивают. Домен конвергентных приложений поддерживается и обеспечивается в основном функциональностью протокола SIP, учитывающего мобильность абонентов и динамичность их состояния (регистрации) на соответствующих серверах. Как один из примеров конвергентных приложений можно назвать одновременную доставку видеопотока на терминал 3G и персональный компьютер через сеть распространения контента из одного и того же сервисного центра. Более обобщенно, конвергенция приложений - это предоставление потребителям услуг передачи речи, данных и видео через все доступные типы сетей инновационными методами (WiFi, WiMax, LTE). Реализация каждого из рассмотренных уровней обеспечивает значительные преимущества. Сетевая конвергенция создает возможности для экономии эксплуатационных расходов и капитальных затрат, конвергенция приложений - для предложения новых пакетов услуг и совершенствования маркетинга.

Полная конвергенция - это совокупность всех перечисленных частей: сеть IP в качестве общей платформы, которая дает возможность предоставлять конвергентные приложения по конкурентоспособной цене и с непрерывностью услуги при пересечении границ сетей доступа. Побудительные причины для промышленного внедрения ФМС различаются в разных сегментах рынка. ФМС продолжает развиваться по отдельности по каждому из этих параметров. Поставщики услуг представляют решения, которые отвечают потребностям своих абонентов. Эти решения, по сути, следуют традиционному

жизненному циклу модели разработки программного обеспечения, который постепенно добавляет функциональности. FMC услуги представляет собой серьезную проблему для всех телекоммуникационных операторов в ближайшие несколько лет. Объединение разрозненных услуг по отдельным сетям стало рассматриваться как маркетинговый шаг, необходимый для поддержки заказчиков.

## 1.3 Обзор технологии LTE

LTE или Long Term Evolution, является мировым стандартом для четвертого поколения мобильных сетей (4G), который поддерживается всеми основными игроками в отрасли. LTE обеспечивает производительность и скорость обработки быстрого увеличения трафика данных. Согласно последнему докладу Ericsson [1], в 2018 году будет 7 миллиардов абонентов подвижной широкополосной связи. 60% населения в мире будет иметь LTE покрытие в 2018 году.

В настоящее время 175 LTE операторов запустили коммерческие услуги и 424 операторов публично привержены технологии в 126 различных странах.

Основной философией LTE является:

- Производительность и мощность - одно из требований LTE, является обеспечение нисходящей пиковой скорости не менее 100 Мбит/с. Эта технология позволяет скорость более 300 Мбит/с.
- Простота - LTE поддерживает гибкое разделение полосы пропускания, от 1.4MHz до 20 МГц. LTE также поддерживает дуплексный режим с частотным разделением каналов (FDD) и дуплексный режим с временным разделением каналов (TDD).
- Задержка - Задержка в плоскости передачи пользовательских данных в LTE меньше, чем в существующих 3G технологиях, обеспечивающих прямое преимущество для обслуживания интерактивных приложений, таких как многопользовательские игры и высококачественная мультимедийная связь.
- Широкий диапазон терминалов - LTE модуль встраивается во многие мобильные телефоны, компьютеры и другие электронные устройства, такие как ноутбуки, ультрапортативные ПК, игровые устройства и камеры.

### 1.3.1 Общая структура сети LTE

Сеть LTE состоит из двух важнейших компонентов [4]: сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE (System Architecture Evolution) (рис. 1.8). Основными требованиями проекта 3GPP к сети SAE были: максимально возможное упрощение структуры сети и исключение дублирующих функций сетевых протоколов, характерных для систем UMTS. Сети радиодоступа E-UTRAN рассмотрены в ряде технических спецификаций, согласно которым она состоит только из базовых станций eNB (evolved Node B). 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 хендовер мобильного терминала в состоянии LTE\_ACTIVE. Каждая базовая станция имеет интерфейс S1 с базовой сетью SAE, построенная по принципу коммутация пакетов. Базовая сеть SAE [4], иногда называемая сетью EPC (Evolved Packet Core), содержит узлы MME/UPE, состоящие из логических элементов MME и UPE. Логический элемент MME (Mobility Management Entity) отвечает за решение задач управления мобильностью абонентского терминала и взаимодействует с базовыми станциями eNB сети E-UTRAN

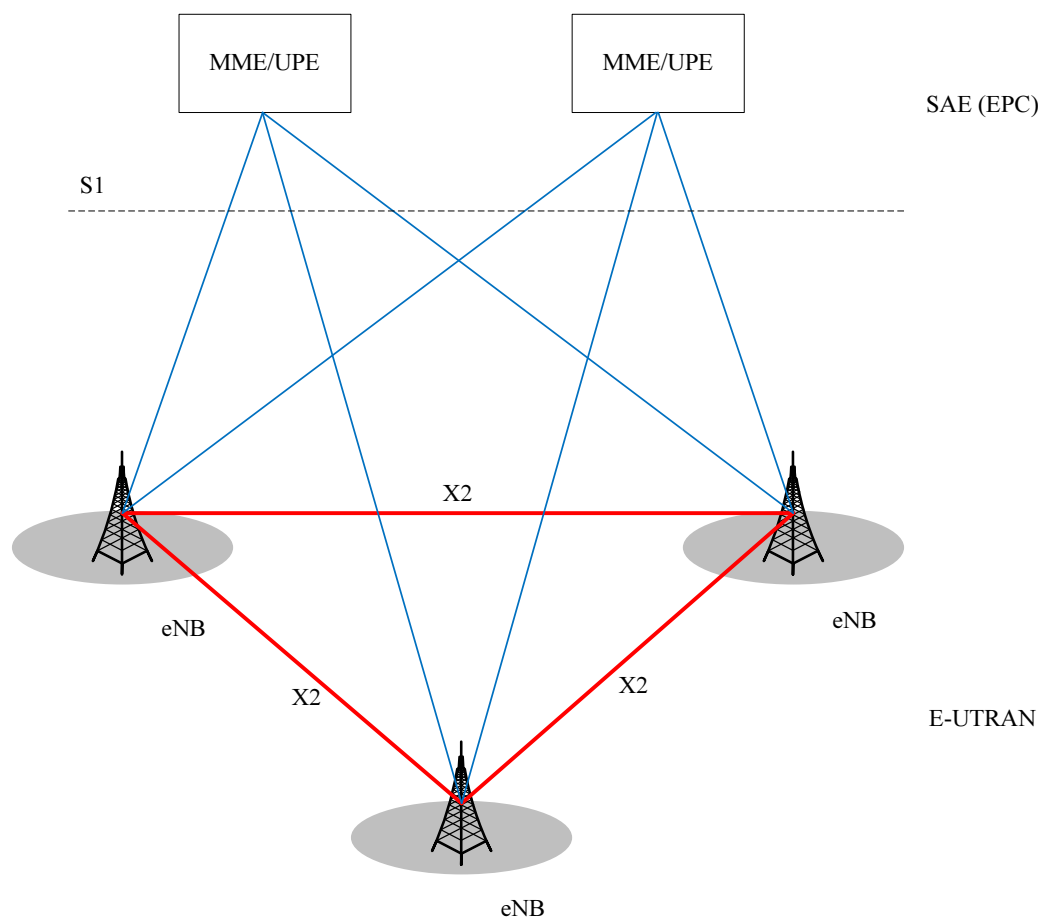


Рисунок 1.8: Взаимодействие сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE

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.

1. Базовые станции eNB выполняют функции управления радиоресурсами RRM (Radio Resource Management): управление радиоканалами (Radio Bearer Control), управление доступом (Radio Admission Control), управление мобильностью (Connection Mobility Control), динамическое распределение ресурсов (Dynamic Resource Allocation). Таким образом, в сети радиодоступа E-UTRAN базовые станции eNB управляют протоколами радиоинтерфейса, комбинируя выполнение функций базовых станций Node B и большинства функций контроллера RNC сети UMTS.
2. 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.
3. Сетевой элемент плоскости пользователя UPE выполняет сжатие заголовков IP-протоколов, шифрование потоков данных, терминацию пакетов данных плоскости пользователя, коммутацию пакетов данных при обеспечении мобильности

пользователя. Кроме того, UPE управляет протоколами пользовательского уровня, например, хранением текущего статуса абонентского терминала (АТ), прерыванием состояния LET\_IDLE на уровне абонентских терминалов.

Основные протоколы интерфейса S1 плоскостей C-plane и U-plane сети LTE представлены на рис. 1.9. Одной из важнейших задач управления в сети LTE является максимально

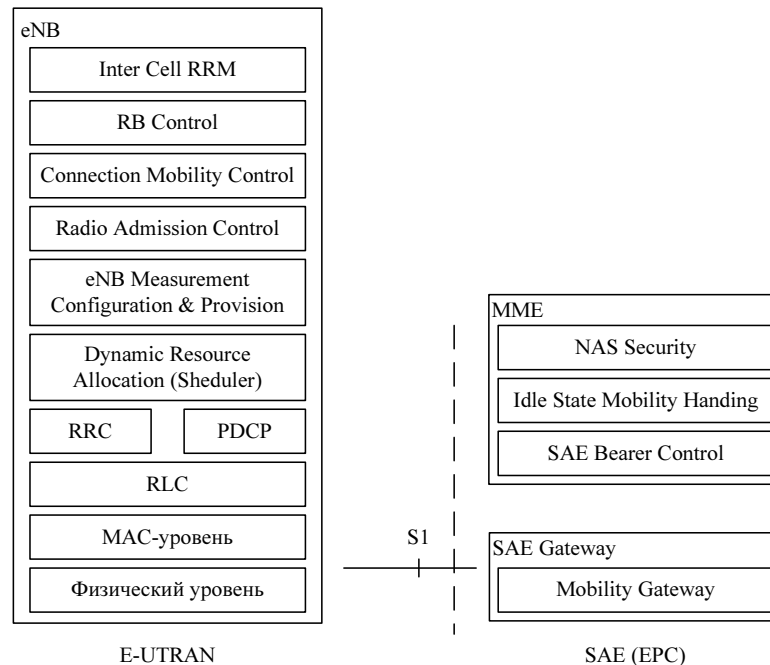


Рисунок 1.9: Протоколы интерфейса S1 сети LTE

эффективное использование радиоресурсов. Данная задача решается с помощью совокупности функций управления радиоресурсами RRM (управление радиоресурсами сети E-UTRAN, управление службой передачи данных в радиоканале, управление мобильностью, управление доступом, динамическое распределение ресурсов) и с помощью протокола управления радиоресурсами RRC. Управление радиоресурсами сети E-UTRAN (Inter Cell RRM) обеспечивает управление ресурсами группы сот в целях повышения эффективности использования частотного спектра и минимизации помехового взаимного влияния абонентских терминалов и базовых станций, а также поддержку мобильности. Управление службой передачи данных в радиоканале (RB Control) реализовано в базовых станциях eNB сети E-UTRAN и обеспечивает установление, поддержание и освобождение радиоканалов передачи данных с заданными параметрами в сети E-UTRAN. Основными задачами являются контроль и управление всеми активными сессиями передачи данных с учетом параметров качества услуг (QoS), выделение ресурсов для вновь активируемых сессий. Управление мобильностью (Connection Mobility Control) позволяет выбирать обслуживающую базовую станцию eNB для мобильного терминала, передавать обслуживание мобильного терминала от одной базовой станции eNB (хэндовер) к другой. Выбор обслуживающей eNB осуществляется мобильным терминалом на основе собственных измерений в состоянии RRC\_CONNECTED и сравнения полученных измерений с установленными пороговыми значениями. Хэндовер реализован на основе анализа измерений как мобильного терминала, так и базовой станции eNB, а также текущей загрузки обслуживающей и соседних сот, политикой оператора по регулированию трафика. Поддержку мобильности абонентского терминала в сети SAE обеспечивает логический элемент MME. Основными функциями MME являются:

- Управление мобильностью абонентского терминала, находящегося в состоянии RRC\_IDLE (Idle State Mobility Handling).
- Управление безопасностью мобильной связи (NAS Security) в соответствии с протоколами, относящимися к группе протоколов «уровня без доступа» и обеспечивающими, например, аутентификацию пользователей, управление ключами шифрования данных.
- Управление службой передачи данных сети SAE (SAE Bearer Control).

Параметры функций управления радиоресурсами сети E-UTRAN (Inter Cell RRM), управления службой передачи данных в радиоканале (RB Control) и управления мобильностью (Connection Mobility Control) могут быть кастомизированы в соответствии с требованиями оператора. Основной задачей по управлению доступом (Radio Admission Control) является формирование решений о предоставлении доступа мобильному терминалу к сети E-UTRAN. Данная задача решается на основе многокритериального анализа загрузки сети радиодоступа, требований мобильного терминала к параметрам QoS. Динамическое распределение ресурсов (Dynamic Resource Allocation Scheduler) отвечает за планирование очередности передачи пакетов данных и позволяет динамически выделять и перераспределять ресурсы сети радиодоступа, включая каналные ресурсы, мощность излучения базовых станций, ресурсы буферизации при обработке пакетов данных с учетом параметров QoS. Протокол управления радиоресурсами RRC плоскости C-plane обеспечивает:

- Вещание служебной информации в соответствии с протоколами, относящимися к группам протоколов «уровня с доступом» и «уровня без доступа» (соответственно AS - Access Stratum и NAS - Non-Access Stratum).
- Пейджинг мобильного терминала.
- Установление, поддержание и закрытие RRC-соединений между абонентским терминалом и сетью E-UTRAN.
- Управление ключами шифрования.
- Установление, поддержание и закрытие служб передачи данных в радиоканале (Radio Bearers) типа «точка-точка» и «точка-многоточка» с заданными параметрами QoS.
- Мобильность абонентских терминалов.

Кроме того, протокол RRC обеспечивает выполнение ряда других функций. Протокол сходимости пакетных данных PDCP (Packet Data Convergence Protocol) плоскостей U-plane и C-plane обеспечивает устранение избыточности (сжатие) служебной информации, объем которой может быть соизмерим с объемом полезной информации, передаваемой в пакетах данных, а также шифрование/дешифрование данных. Протокол управления радиоканалом RLC (Radio Link Control) обеспечивает:

- Сегментацию и компоновку пакетов данных протоколов более высокого уровня PDU (Protocol Data Unit) переменной длины в меньшие блоки полезной нагрузки PU (Packet Unit); размер блока PU определяется в соответствии со скоростью передачи информации в радиоканале.
- Конкатенцию (сочленение) коротких пакетов PDU верхнего уровня.

- Заполнение остатка поля данных блока PU, если сочленение неприемлемо.
- Передачу данных пользователя с подтверждением и неподтверждением приема в соответствии с параметрами QoS.
- Исправление ошибок методом повторной передачи (ARQ) пакетов данных.
- Сохранение на более высоком уровне порядка доставки пакетов PDU при передаче данных с подтверждением приема.
- Обнаружение дублирования пакетов PDU для доставки их на более высокий уровень только один раз.
- Управление скоростью передачи данных.
- Контроль порядковых номеров пакетов.

### 1.3.2 Архитектура базовой сети SAE

Архитектура базовой сети SAE позволяет осуществлять дальнейшую эволюцию сетей 3G в направлении получения более высоких скоростей передачи данных, обеспечения низких задержек, а также оптимизации передачи данных на основе разнообразных технологий радиодоступа. Основным отличием базовой сети SAE от базовой сети системы UMTS является максимально упрощенная структура и отсутствие дублирующих функций сетевых протоколов. Архитектура базовой сети SAE представляет собой PS-домен системы LTE, который предоставляет как услуги передачи речи, так и всю совокупность IP-услуг на основе технологий пакетной коммутации данных. В основу построения базовой сети SAE положена концепция «все через IP» (all-IP или AIPN — All over IP Network) и то обстоятельство, что доступ к базовой сети SAE может осуществляться как через сети радиодоступа второго и третьего поколений (например, сети UTRAN, GERAN), так и через сети радиодоступа не европейских технологий, не стандартизированные проектом 3GPP (сети Не-3GPP), например, сети IEEE: Wi-Fi, WiMAX, а также через сети, использующие проводные IP-технологии (например, сети ADSL+, FTTH и др.). Эталонная архитектура базовой сети SAE с указанием интерфейсов взаимодействия с внешними сетями показана на рис. 1.10. Согласно этой архитектуре функции протоколов плоскости управления узла SGSN сети UMTS становятся функциями элемента управления мобильностью MME. Функции контроллера RNC, которые не выполняет базовая станция eNB сети E-UTRAN, и функции протоколов плоскости пользователя узлов SGSN и GGSN реализуются модулем UPE и шлюзовым узлом «привязки» 3GPP Anchor сети SAE. Этот узел предназначен для присоединения сетей 2G/3G к сети LTE. В состав SAE входит также шлюзовый узел привязки SAE Anchor, который служит для присоединения к сети SAE сетей стандартов 3GPP (GSM/UMTS) и стандартов не-3GPP (Wi-Fi и WiMAX). Узлы привязки 3GPP Anchor и SAE Anchor образуют единый узел привязки IASA (Inter Access System Anchor) для присоединения внешних IP-сетей. Совокупность логических сетевых элементов MME/UPE, IASA, состоящего из узлов SAE Anchor и 3GPP Anchor (рис. 1.10), образует базовую пакетную сеть (Evolved Packet Core — EPC). Данные логические элементы рассматривались в основном на начальных стадиях разработки стандартов сети LTE. Более детальные исследования, направленные на практическую реализацию архитектуры EPC, определили новые сетевые элементы: обслуживающий шлюз S-GW (Serving GW) и шлюз взаимодействия с пакетными сетями P-GW (PDN GW), а также логический элемент MME, функционирующий отдельно от элемента UPE. Шлюзы S-GW и P-GW физически могут быть реализованы в составе одного сетевого элемента AGW (Access GW). Краткое описание основных интерфейсов сети SAE приведено в табл. 1.1.



Таблица 1.1: Основные интерфейсы сети SAE

Интерфейс	Описание интерфейса
S1	Интерфейс, предоставляющий доступ к сети радиодоступа E-UTRAN для передачи данных протоколов плоскостей пользователя и управления. Позволяет иметь отдельную и комбинированную аппаратную реализацию элементов MME и UPE
S2a	Интерфейс между узлом IASA и фиксированными IP-сетями стандарта не-3GPP. Обеспечивает передачу данных протоколов плоскости пользователя и поддержку функций управления и мобильности. Включает в себя интерфейсы S2a, S2b и S2c
S3	Интерфейс между элементами MME/UPE и узлом SGSN. Обеспечивает управление межсетевым хэндовером абонентских терминалов в сетях E-UTRAN и UTRAN
S4	Интерфейс между узлом 3GPP Anchor и узлом SGSN. Обеспечивает передачу данных плоскости пользователя и поддержку функций управления и мобильности. Основан на интерфейсе Gn между узлами SGSN и GGSN сети UMTS
S5a	Интерфейс между элементом MME/UPE и узлом 3GPP Anchor. Обеспечивает передачу данных протоколов плоскости пользователя и поддержку функций управления и мобильности
S5b	Интерфейс между узлами 3GPP Anchor и SAE Anchor. Обеспечивает передачу данных протоколов плоскости пользователя и поддержку функций управления и мобильности
S6	Интерфейс, обеспечивающий доступ к домашней базе данных пользователей (HSS) для аутентификации и авторизации пользователей (интерфейс AAA)
S7	Интерфейс, обеспечивающий управление установлением соединений с заданными параметрами QoS на основе политики сети и тарификацию (Policy and Charging Rules Function — PCRF)
SGi	Интерфейс между узлом IASA и внешними сетями с пакетной передачей данных. Эти сети могут принадлежать как разным операторам, так и одному оператору сотовой связи для предоставления, например, услуг подсистемы IMS. Этот интерфейс основан на интерфейсе Gi между узлами GGSN и внешними IP-сетями



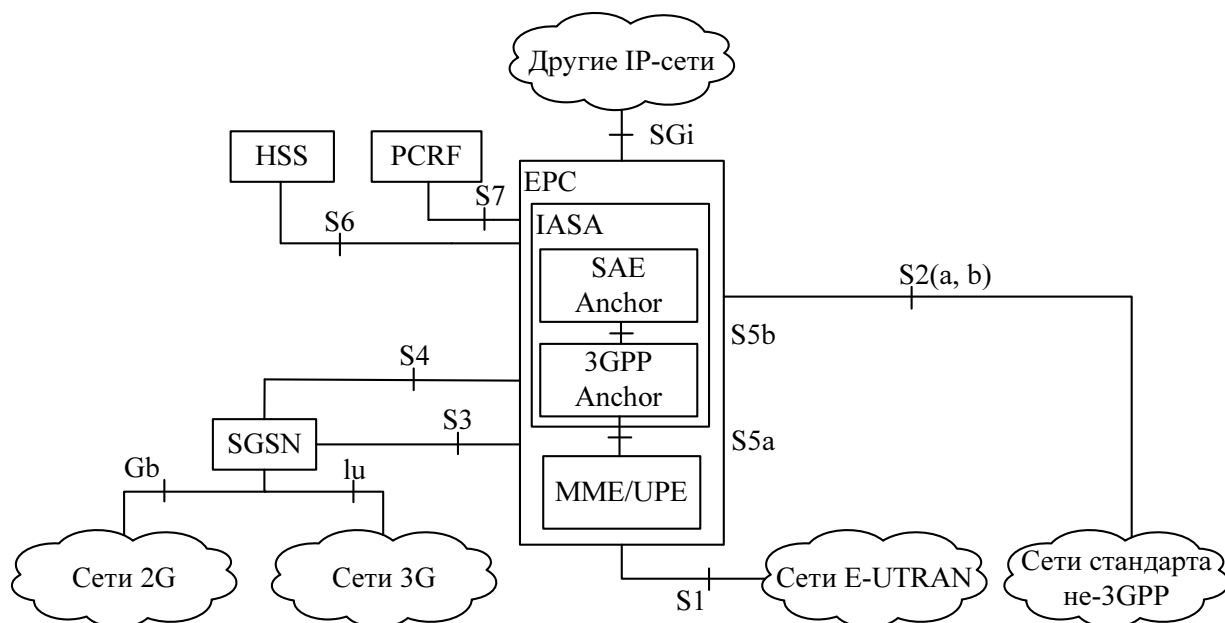


Рисунок 1.10: Эталонная архитектура базовой сети SAE

## 1.4 Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE (VoLTE)

### 1.4.1 Предпосылки предоставления услуг передачи речи и видео поверх LTE

Мобильная связь стандарта LTE оптимизирована для передачи данных и реализована в виде коммутации пакетов через IP. LTE не включает в себя домен с коммутацией каналов, который в настоящее время используется для предоставления услуг передачи речи и SMS услуг. Спрос на услуги мобильного широкополосного доступа растет и операторы запускают высокоскоростные сети на основе технологии LTE. Тем не менее, услуги передачи речи и SMS услуги приносят около 70% от общей выручки операторов и ясно что эта функциональность должна быть реализована в сетях LTE.

С передачей речи поверх LTE (GSMA VoLTE IR.92 спецификация, основанная на глобальных 3GPP стандартах) абоненты получают возможность голосовых и видео звонков и другие услуги для LTE смартфонов.

Для реализации услуг передачи речи поверх сети LTE, необходимо чтобы IMS (IP Multimedia System) ядро сети предоставляло сервис телефонии поверх IP. MMTEL (Multi Media Telephony, разработанная в IMS ядре) является решением, которое предоставляет услуги телефонии (включая видео звонки, чат и другое) как в LTE так и в фиксированной сети. LTE сеть радио доступа и EPC также должно поддерживать VoLTE, которое может быть достигнуто обновлением программного обеспечения.

Операторы могут использовать тоже самое ядро сетевой инфраструктуры IMS в VoLTE для развития мобильной и фиксированной конвергенции между любыми устройствами. Пользователи будут иметь возможность использовать предоставляемые оператором высококачественные голосовые и видео звонки и другие услуги связи на LTE смартфонах и других устройствах.

Эти услуги используют обычный номер мобильного телефона (MSISDN, Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network-Number), а VoLTE приносит функции мобильного оператора в мобильную широкополосную сеть основанную на IP. С помощью

VoLTE услуги передачи речи данный могут быть использованы одновременно на LTE устройства.

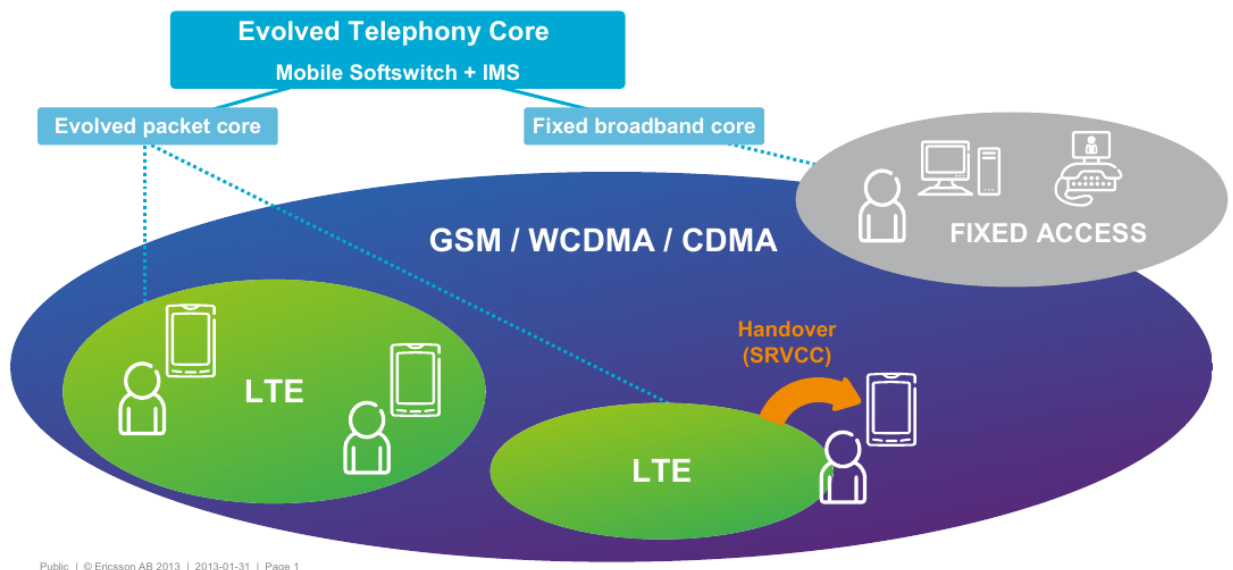


Рисунок 1.11: Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [5]

Мобильный широкополосный доступ создал целый мир возможностей и открыл новые источники дохода для операторов. Возможности часто сочетаются с проблемами. Решающий вопрос состоит в том, чтобы воспользоваться возможностями широкополосного доступа и в тоже время сохранить и увеличить доходы от услуг связи, таких как передача речи и SMS. Сети LTE могут предоставлять широкополосный доступ и услуги связи с большими возможностями и с меньшей задержкой.

Некоторые OTT (Over the Top) решения, такие как Skype, часто предустановленные на смартфоны, получили широкое распространение. Термин OTT означает доставку видео и аудио сигнала на приставку (компьютер, мобильный телефон) пользователя по сети Интернет без прямого контакта с оператором связи в отличие от услуг VoIP и IPTV, которые предоставляются через управляемую оператором сеть с гарантированным QoS. Тем не менее, OTT решения не могут полностью удовлетворить пользователей, так как предоставляются без гарантированного QoS, нет поддержки хэндовера в сеть с коммутацией каналов, нет широкого взаимодействия услуг между различными службами OTT и устройствами, нет поддержки вызова чрезвычайных служб, имеют проблемы с безопасностью. Следовательно, использование сервисов OTT клиентом напрямую зависит от покрытия мобильной широкополосной связи и готовностью абонентами использовать сервис, который испытывает недостаток в качестве, безопасности и гибкости.

Операторы уже сейчас могут начать глобальное развертывание коммерческих решений голосовых и видео звонков поверх LTE - еще до того, когда LTE сеть будет полностью развернута.

LTE и EPC архитектуры не включают поддержку коммутации голосовых и видео звонков. Перед началом использования LTE в телефонах, это ограничение должно быть решено. На данный момент существует два решения этой проблемы [5]: CS fallback (CSFB) и IMS/VoLTE. CSFB подходит для использования, когда LTE покрытие является неоднородным (как правило, на ранних этапах развертывания LTE), а IMS/VoLTE может быть реализована, когда покрытие практически однородно (как правило, когда сеть LTE уже в более зрелом состоянии).

## 1.4.2 Обзор системы IP-мультимедиа (IMS)

Подсистема IP-мультимедиа (IMS) разработана отраслевым комитетом 3GPP (3G Partnership Project) для использования IP-ядер в сетях 3G и сейчас применяется объединенным техническим комитетом TISPAN в качестве ключевого элемента инфраструктуры Сетей Следующего Поколения (NGN). IMS – это не только VoIP. Это возможность организации новых мультимедийных сервисов поверх стандартной IP-сети, требующая небольших затрат и позволяющая предоставить услуги абонентам по привлекательным ценам. Производители, выбравшие стратегию развития новых сервисов путем переноса несвязанного между собой частного ПО на одну платформу, не смогут достигнуть такого же уровня интеграции сервисов, развития новых услуг и поддержки клиентов, как поставщики решений, выбравшие стратегию IMS. IMS не только даст возможность пользователю работать с услугами, используя самый широкий спектр клиентских устройств, но и позволит оператору в интересах клиента формировать новые сервисы, используя существующие. Развертывание подсистемы IP-мультимедиа становится ключевым фактором создания комплексных персонализированных услуг. Ожидается, что уже в ближайшем будущем операторы приступят к полному использованию ее возможностей.

На рис. 1.12 представлена архитектура IMS, определенная в стандартах 3GPP (3rd Generation Partnership Project) и Европейского института стандартов связи ETSI.

Унифицированная сервисная архитектура IMS поддерживает широкий спектр сервисов, основанных на гибкости протокола SIP (Session Initiation Protocol). IMS поддерживает множество серверов приложений, предоставляющих как обычные телефонные услуги, так и новые сервисы (обмен мгновенными сообщениями, мгновенная многоточечная связь, передача видеопотоков, обмен мультимедийными сообщениями и т.д.). Сервисная архитектура представляет собой набор логических функций, которые можно разделить на три уровня: уровень абонентских устройств и шлюзов, уровень управления сеансами и уровень приложений.

### **Уровень абонентских устройств и транспорта.**

На этом уровне иницируется и завершается сигнализация SIP, необходимая для установления сеансов и предоставления базовых услуг, таких как преобразование речи из аналоговой или цифровой формы в IP-пакеты с использованием протокола RTP (Realtime Transport Protocol). На этом уровне функционируют медиашлюзы, преобразующие базовые потоки VoIP в телефонный формат TDM. Медиасервер предоставляет различные медиасервисы, в том числе конференц-связь, воспроизведение оповещений, сбор тоновых сигналов, распознавание речи, синтез речи и т.п. Ресурсы медиасервера доступны всем приложениям, т.е. любое приложение (голосовая почта, бесплатный номер 800, интерактивные VXML-сервисы и т.д.), которому необходимо воспроизвести оповещение или получить цифры набранного номера, может использовать общий сервер. Медиасерверы также поддерживают и нетелефонные функции, например, тиражирование речевых потоков для оказания сервиса мгновенной многоточечной связи (РТТ). При использовании для различных сервисов общего пула медиасерверов отпадает необходимость в планировании и инжиниринге медиаресурсов для каждого отдельного приложения.

### **Уровень управления вызовами и сеансами.**

На этом уровне располагается функция управления вызовами и сеансами CSCF (Call Session Control Function), которая регистрирует абонентские устройства и направляет сигнальные сообщения протокола SIP к соответствующим серверам приложений. Функция CSCF взаимодействует с уровнем транспорта и доступа для обеспечения качества обслуживания по всем сервисам. Уровень управления вызовами и сеансами включает сервер абонентских данных HSS (Home Subscriber Server), где централизованно

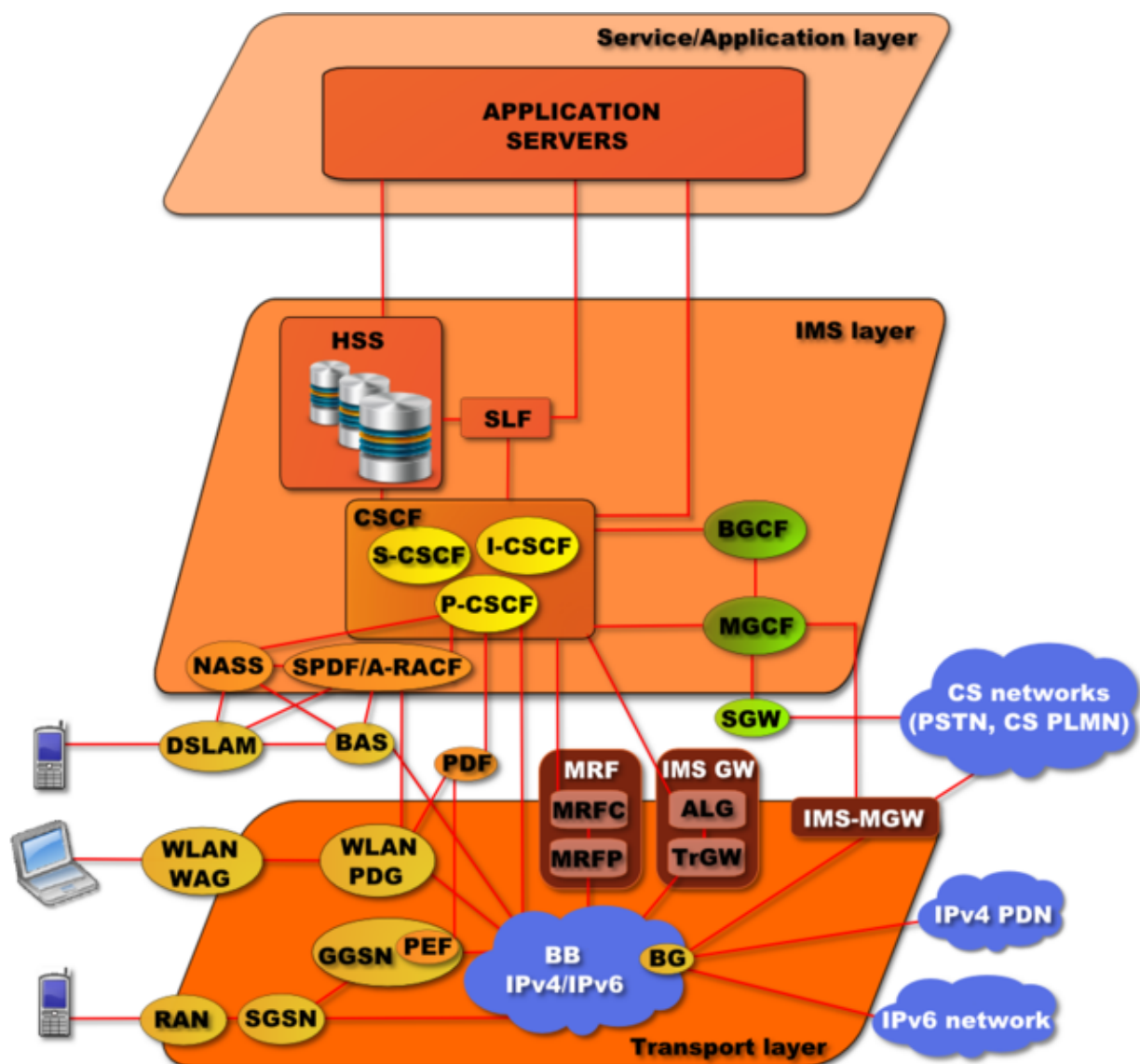


Рисунок 1.12: Архитектура IMS

хранятся уникальные сервисные профили всех абонентов. Профиль содержит текущую регистрационную информацию (например, IP-адрес), данные роуминга, данные по телефонным услугам (например, номер переадресации), данные по обмену мгновенными сообщениями (список абонентов), параметры голосовой почты (например, приветствия) и т.д. Централизованное хранение позволяет различным приложениям использовать эти данные для создания персональных справочников, информации о присутствии в сети абонентов различных категорий, а также совмещенных услуг. Централизация также существенно упрощает администрирование пользовательских данных и гарантирует однородное представление активных абонентов по всем сервисам.

На уровне управления вызовами и сеансами также располагается функция управления медиашлюзами **MGCF** (Media Gateway Control Function), которая обеспечивает взаимодействие сигнализации SIP с сигнализацией других медиашлюзов (например, H.248). Функция **MGCF** управляет распределением сеансов по множеству медиашлюзов, для медиасерверов это выполняется функцией **MSFC** (Media Server Function Control).

#### **Уровень серверов приложений.**

Этот уровень содержит серверы приложений, которые обеспечивают обслуживание конечных пользователей. Архитектура IMS и сигнализация SIP обеспечивают

достаточную гибкость для поддержки разнообразных телефонных и других серверов приложений. Так, разработаны стандарты SIP для сервисов телефонии и сервисов IM.

### 1.4.3 Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE на основе CSFB

Стандартизированным решением для предоставления услуг передачи речи в начале развертывания LTE, является CSFB [6]. При использовании, устройства перенаправленные на WCDMA/GSM (рис. 1.13) для инициализации или приема голосовых сообщений, остаются в области CS, пока не будут завершены. CSFB предоставляет поддержку услуг передачи речи и SMS, и считается первым шагом в эволюции направленной предоставление мультимедийных услуг связи.

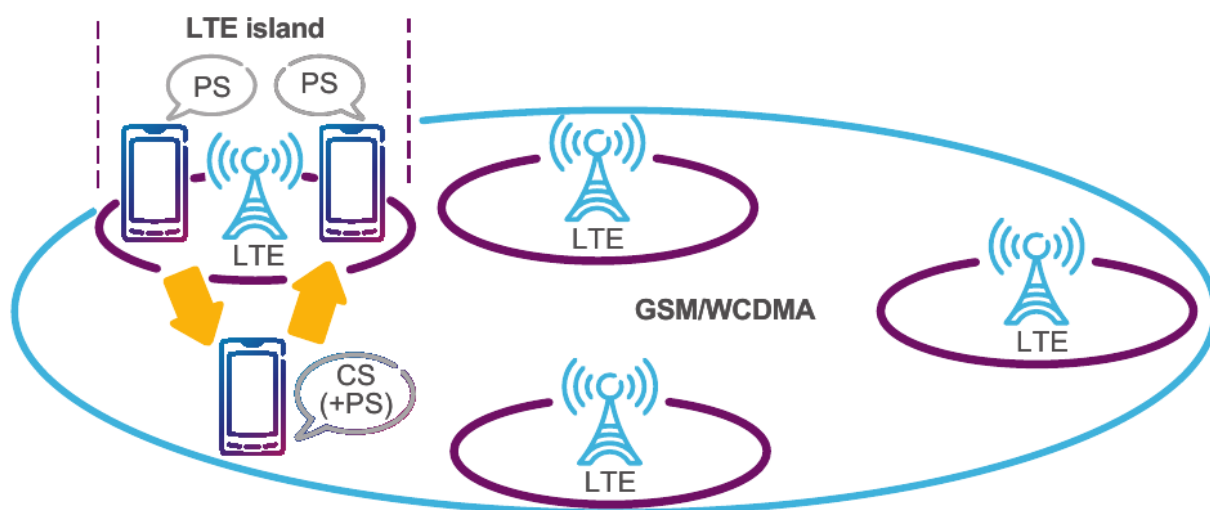


Рисунок 1.13: CSFB [6]

### 1.4.4 Предоставление услуг передачи речи и видео поверх LTE на основе IMS/VoLTE

Термин передача речи поверх LTE (VoLTE) используется для описания GSMA спецификацию [7] для предоставления услуг передачи речи и SMS в LTE, которая берет свое начало с 3GPP IMS-based multimedia telephony (MMTel) решения. С MMTel операторы могут развивать свои голосовые и мультимедийные сервисы, такие как видео звонки — описанные в спецификации GSMA для IMS видео связи [8].

Хотя MMTel лежит в основе решения VoLTE, EPC и LTE являются неотъемлемой частью его. Вместе они обеспечивают совместимость на всех интерфейсах между устройствами и сетями. Рис. 1.14 иллюстрирует важность принятия сквозного подхода к реализации передачи речи в LTE, для обеспечения классических телекоммуникационных принципов, таких как наивысшие требования QoS к передаче речи (LTE), управление мобильностью (EPC), использование MSISDN для обеспечения глобальной совместимости и различных видов нормативных и дополнительных услуг (IMS и MMTel).

VoLTE включает передачу речи с полудуплексном режиме с форматом связи точка-точка или точка-многоточка. На рис. 1.15 показана упрощенная версия VoLTE архитектуры связи.

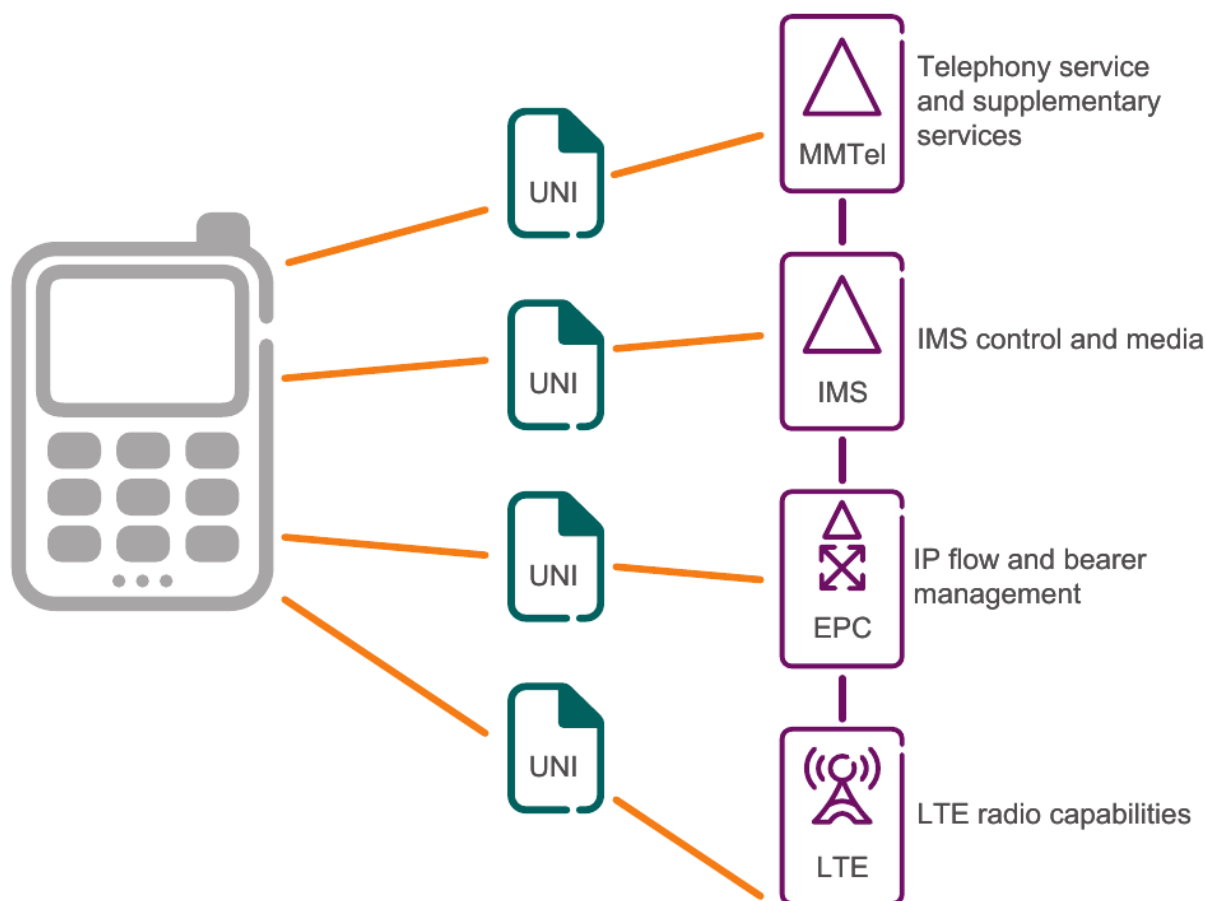


Рисунок 1.14: VoLTE интерфейсы через пользовательский сетевой интерфейс (UNI) между устройством и сетью [6]

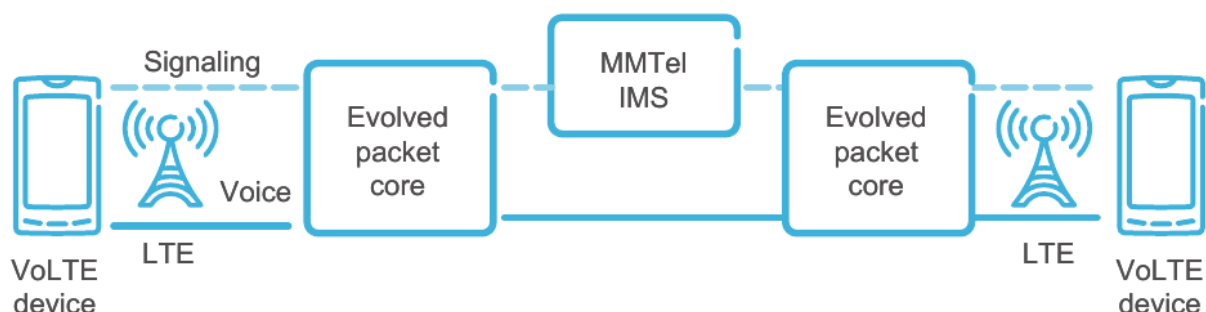


Рисунок 1.15: VoLTE (упрощенный вид) [6]

Когда устройство включается, оно прикрепляется к LTE/EPC сети и применяет IMS Access Point Name (APN) для облегчения роуминга и для получения ссылки на домен IMS, а также для выделения канала для SIP сигнализации (рис. 1.16). Затем устройство инициализирует процесс регистрации в домене IMS с идентификатором MMTel и опционально SMS-over-IP идентификатором. Во время этого процесса устройство будет проходить проверку подлинности.

Сигнал INVITE содержит Session Description Protocol (SDP), который описывает желаемую среду передачи, и содержит такую информацию, как стандарт кодирования htxb - Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB, используемый для HD речи) или Adaptive Multi-Rate Narrowband (AMR-NB) - IP адрес и порт для использования. Домен IMS передает эту информацию через стандартизированные интерфейсы в EPC's Policy и Charging Enforcement Function (PCEF), которые в свою очередь выполняют QoS требования и



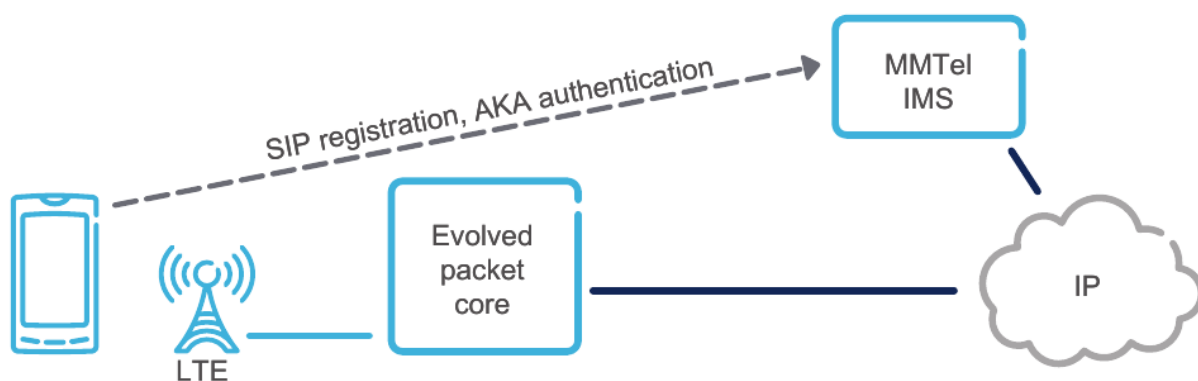


Рисунок 1.16: Регистрация и аутентификация устройства [6]

анализ загруженных правил. Типичный результат этого анализа может быть - выделение EPC и радиоканала для данных - с гарантированной скоростью передачи VoIP среды. Рис. 1.17 иллюстрирует SIP сигнализацию и речевой поток по выделенному каналу.

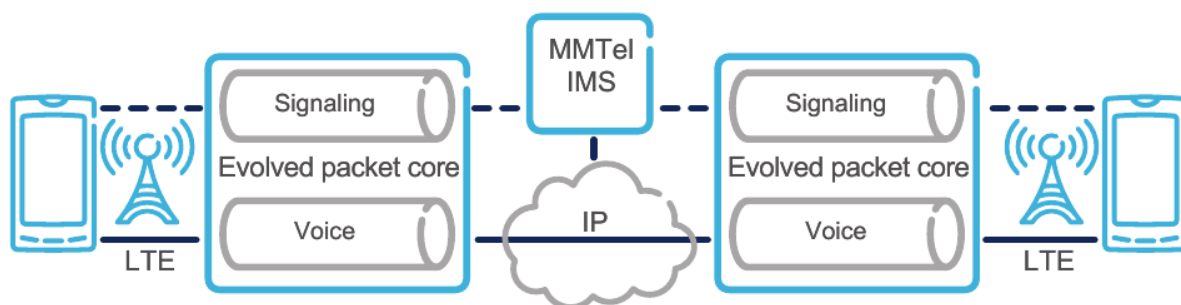


Рисунок 1.17: Канал для передачи сигнальной информации и канал для передачи речи [6]

Технология LTE создала огромное количество возможностей, но возможности часто сочетаются с проблемами. Услуги реального времени, которые позволяет внедрять технология VoLTE (такие как голосовые звонки в HD качестве, видео звонки, организация конференций с эффектом присутствия и т. д.) критичны к джиттеру задержки. Беспроводные сети LTE и проводные сети, которые соединяют LTE сеть с контент серверами или другими беспроводными сетями, подвержены задержке, джиттеру и потери пакетов. Для решения этой проблемы предложено использовать потоковый агент, основные функции которого будут рассмотрены следующем подразделе 3.8.

## 1.5 Выводы по 1 разделу

1. Согласно прогнозу [1] 60% людей в конце 2018 года будут иметь широкополосное мобильное покрытие LTE. Поэтому развитие и оптимизация технологии LTE, на сегодня является актуальной задачей.
2. Сети LTE с помощью технологии VoLTE, позволяют предоставлять услуги реального времени, такие как голосовые звонки в HD качестве, видео звонки, организация конференций с эффектом присутствия и т. д., которые критичны к джиттеру задержки. Беспроводные сети LTE и проводные сети, через которые передаются пакеты этих услуг, могут быть подвержены различным факторам, которые увеличивают джиттер задержки. Поэтому для разработки методов борьбы

с джиттером задержки и соответственно улучшения качества предоставления услуг реального времени в сетях LTE, в разделе 2 будут рассмотрены основные факторы, влияющие на джиттер задержки.



## Глава 2

# Анализ основных причин джиттера в проводной и беспроводной сети

Выделяют три типа джиттера [12], которые могут быть вызваны различными причинами (рис. 2.1):

1. Постоянный джиттер - это стандартная передача пакетов с примерно постоянным изменением задержки.
2. Джиттер содержащий выбросы<sup>1</sup> задержки возникает, когда один пакет в потоке оказывается задержанным на значительно больший интервал времени по отношению к другим. Это может произойти в тех случаях, когда осуществляется передача высокоприоритетного служебного трафика, когда возникают сетевые перегрузки, изменение маршрута и др. Эти случаи могут привести к проблеме неограниченного изменения оценки управляющей системы за один шаг.
3. Джиттер содержащий скачки изменения<sup>2</sup> задержки может возникнуть из-за всплеска пакетной активности. Это явление, как правило, связано с перегрузками линии доступа или изменением маршрута. Скачок задержки может привести систему управления в неустойчивое состояние, что приводит к нежелательным последствиям.

Различные типы джиттера, являются следствием различных сетевых ситуаций. В этом разделе будут рассмотрены основные причины возникновения различных типов джиттера в проводной и беспроводной сети. Для более простой записи в дальнейшем вместо названия типов джиттера, определенных выше, будем использовать «тип 1», «тип 2» и «тип 3» соответственно.

---

<sup>1</sup>Под термином выброс задержки понимается увеличение задержки единичного пакета в потоке. В этом случае распределение вероятностей задержек имеет более «тяжелые хвосты» по сравнению с нормальным распределением [13]

<sup>2</sup>Под термином скачек задержки понимается увеличение или уменьшение задержки целого ряда пакетов в потоке [12]

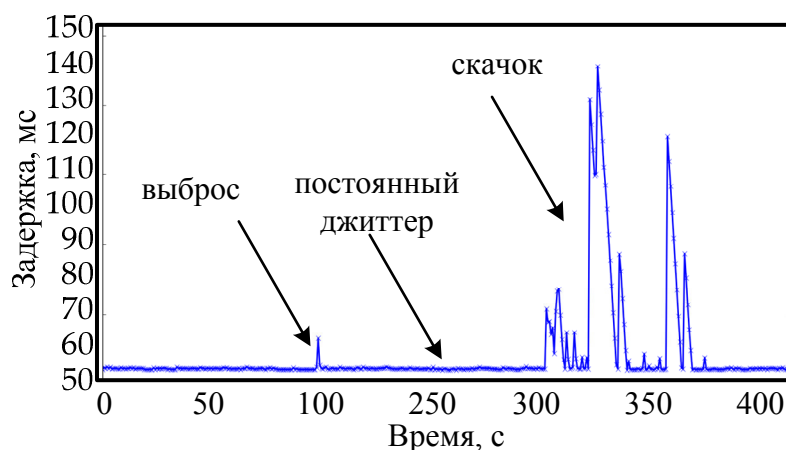


Рисунок 2.1: Основные типы джиттера пакетной задержки

## 2.1 Анализ основных причин джиттера в проводной сети

### 2.1.1 Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 2)

Когда оконечное устройство связи реализовано программно и является частью более общей многофункциональной системы, процессу VoIP приходится бороться за процессорное время с другими процессами и, следовательно, это может привести к некоторому постоянному джиттеру времени передачи.

### 2.1.2 Перегрузка в локальной сети (тип 2)

Хотя средняя нагрузка локальной сети обычно не высокая, локальные перегрузки происходят в течение короткого периода времени. В худшем случае, изменение задержки ограничено максимальным временем повторной попытки использовать сеть Ethernet, а в некоторых системах, также ограничено межпакетным интервалом. Если VoIP оконечное устройство не было в состоянии получить доступ к локальной сети в течении максимального времени отсрочки или до запланированного момента передачи следующего пакета, то пакет может быть отброшен. В случае 100 Мбит Ethernet максимальное время отсрочки находится в диапазоне миллисекунд и, следовательно, не должны быть основным источником джиттера. В случае 10 Мбит Ethernet максимальное время отсрочки значительно выше, чем временной интервал между голосовыми пакетами и, следовательно, джиттер может быть ограничен временным интервалом между пакетами (обычно около 10-30 мс). Перегрузки в локальной сети обычно приводят к выбросам задержки так, как если один пакет не получит доступ к сети и будет задержан, следующий пакет сразу может получить доступ к локальной сети (рис. 2.2).

### 2.1.3 Перегрузки в канале доступа (тип 3)

Доступ к каналу передачи, как правило, является одним из основных источников джиттера, поскольку представляет собой одно из узких мест на пути пакета (рис. 2.3). Например, задержка сериализации IP-пакета в 1500 байт, посланного через T1 (1.544Mbit), будет около 8 миллисекунд, поэтому если в очереди перед речевым пакетом находятся пять пакетов данных, то вводится дополнительная задержка в 40 мс. Проблема перегрузок

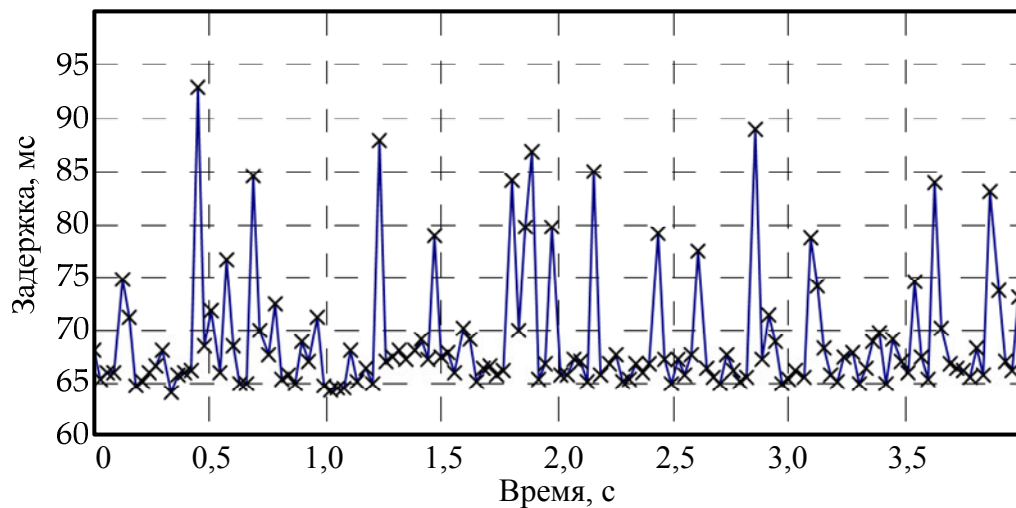


Рисунок 2.2: Пример перегрузки в локальной сети [12]

канала доступа может быть еще более серьезной в случае ISDN, ADSL или в случае кабельных модемов, у которых пропускная способность исходящего канала дополнительно ограничена, например, если пропускная способность исходящего канала составляет 384кбит/в секунду, то каждый 1500 байтовый IP пакет в очереди введет дополнительную задержку в 30 мс.

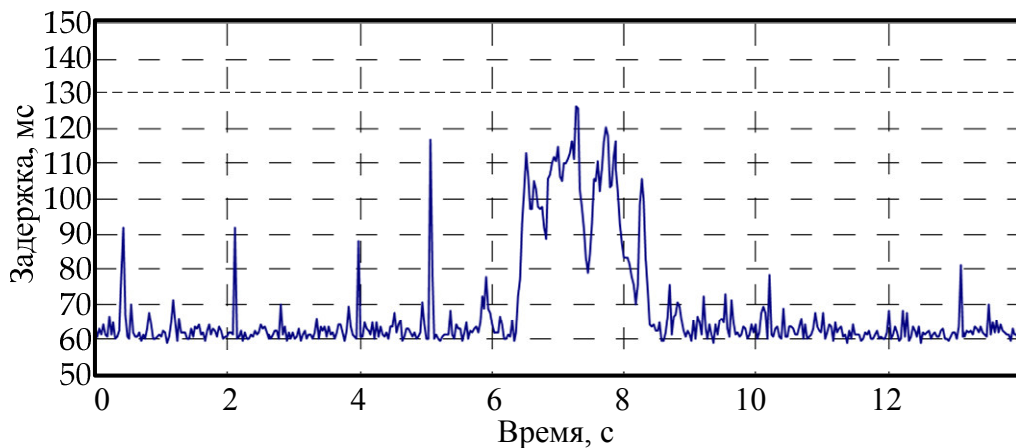


Рисунок 2.3: Пример перегрузки сети доступа [12]

#### 2.1.4 Распределение нагрузки между несколькими линиями доступа или сервис провайдерами (тип 1)

В целях предоставления предприятию VoIP доступа, предприятие может быть подключено через несколько сетей доступа к одному сервис провайдеру или направлять VoIP трафик через несколько независимых провайдеров. Это может привести к джиттеру если задержки на каждом канале доступа существенно различаются.

#### 2.1.5 Распределение нагрузки (тип 1)

Некоторые сервис провайдеры распределяют трафик через несколько внутренних маршрутов в пределах их сетей в целях повышения устойчивости и обеспечения более равномерной загрузки на сеть. Это вносит джиттер в результате разницы в задержке на каждом маршруте.

## 2.1.6 Внутреннее разделение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1)

Для того чтобы поддерживать высокую скорость обработки некоторые маршрутизаторы используют многопроцессорный подход, при котором пакеты обрабатываются в нескольких параллельных очередях. Это может привести к небольшому уровню джиттера из-за различия в размере очереди.

## 2.1.7 Высоко приоритетный служебный трафик (тип 2)

Маршрутизаторы периодически генерируют трафик обновления с высоким приоритетом (рис. 2.4) и выполняют обновления таблицы маршрутизации. Каждое такое событие может привести к задержке небольшого количества пакетов. Кроме того во время обновления таблицы маршрутизации могут существовать кратковременные петли, что может привести к чрезвычайно высокой задержке для отдельных пакетов (рис. 2.5).

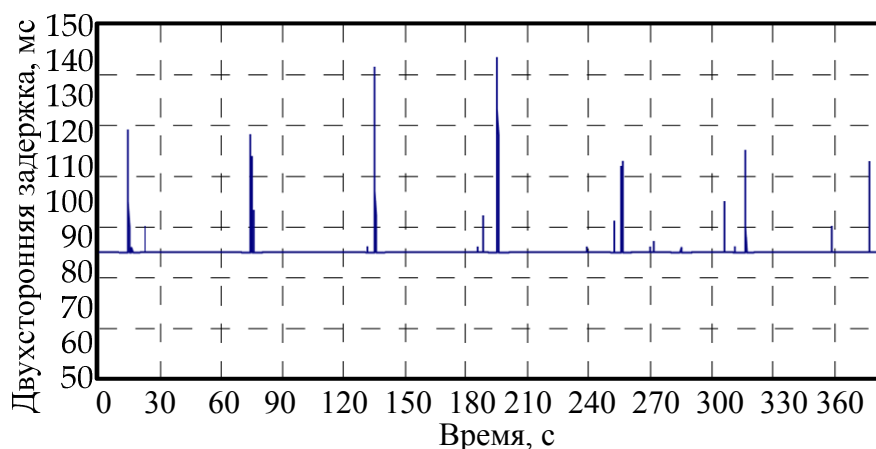


Рисунок 2.4: Периодическое обновление таблицы маршрутизации без изменения маршрута [12]

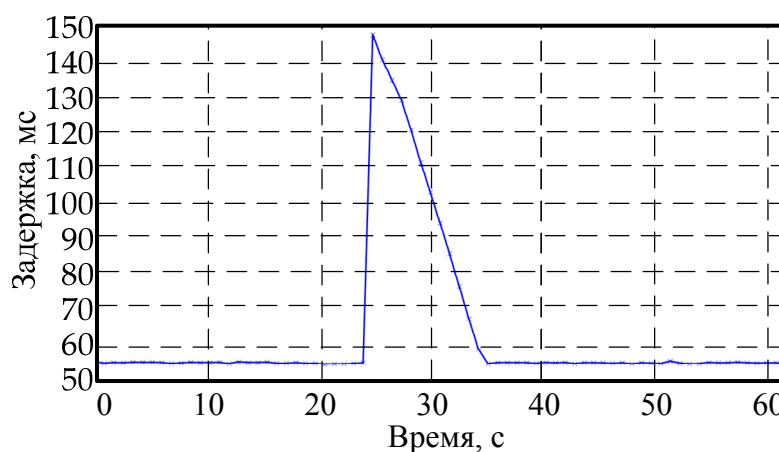


Рисунок 2.5: Периодическое обновление таблицы маршрутизации при изменении маршрута [12]

## 2.2 Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE

Беспроводная сеть налагает дополнительные факторы ухудшающие качество передачи. Далее рассмотрим влияние различных факторов на качество обслуживания, для услуг реального времени поверх сети LTE. Для моделирования и анализа ухудшающих факторов воспользуемся сетевым симмулятором NS3.

### 2.2.1 Хэндовер

Хэндовер (англ. Handover), является процессом передачи сессии абонента от одной базовой станции к другой. Может быть несколько причин для проведения передачи сессии:

- Когда абонент уходит с зоны покрытия одной ячейкой сети и входит в зону покрытия другой ячейкой. Хэндовер позволяет абонентам не быть привязанным к какой-либо географической точке и дает возможность передвигаться в пределах сети оператора без разрыва соединения.
- Когда ёмкость сети в текущей ячейке израсходована при существовании соединения, которое находится в зоне, перекрытой другой ячейкой, передаётся к этой ячейке в порядке освобождения ёмкости первой ячейки для других ее пользователей, которые могут быть соединены только с первой ячейкой.
- Когда канал используемый абонентом сильно зашумлён помехами, соединение передаётся другому каналу в той же ячейке или другому каналу в другой ячейке для устранения помех.
- Когда абонент входит в зону микроячейки, соединение может быть передано для освобождения емкости большой сети.

Проведем моделирование влияния хэндовера на сквозную задержку в сети LTE в сетевом симмуляторе NS3. Детали стенда для моделирования описаны в Приложение С. На рис. 2.6 изображено изменение сквозной сетевой задержки прибытия пакетов из-за 3-х переключений сессии абонента между базовыми станциями выполненными через некоторый промежуток времени. Также стоит заметить что при первой установке соединения задержка прибытия пакетов тоже была не стационарна.

### 2.2.2 Расстояния между абонентом и базовой станцией

Проведем моделирование влияния расстояния между абонентом и базовой станцией на скорость передачи в канале сети LTE в сетевом симмуляторе NS3. Детали стенда для моделирования описаны в Приложение D.

Уравнение передачи для радиолинии протяженностью  $d$  [14]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}, \quad (2.1)$$

где  $P_r$  - мощность полученного сигнала (Вт),  $P_t$  - мощность отправленного сигнала (Вт),  $G_t$  - коэффициент передачи,  $G_r$  - коэффициент приема,  $\lambda$  - длина волны (м),  $d$  - расстояние (м),  $L$  - системные потери. Очевидно (рис. 2.7 (а)) с увеличением расстояния между абонентом и базовой станцией уменьшается отношение сигнал шум с внутрисистемными помехами включительно (SINR). Вместе с тем, с уменьшением SINR также уменьшается и MCS и TBS (рис. 2.7 (b,c))

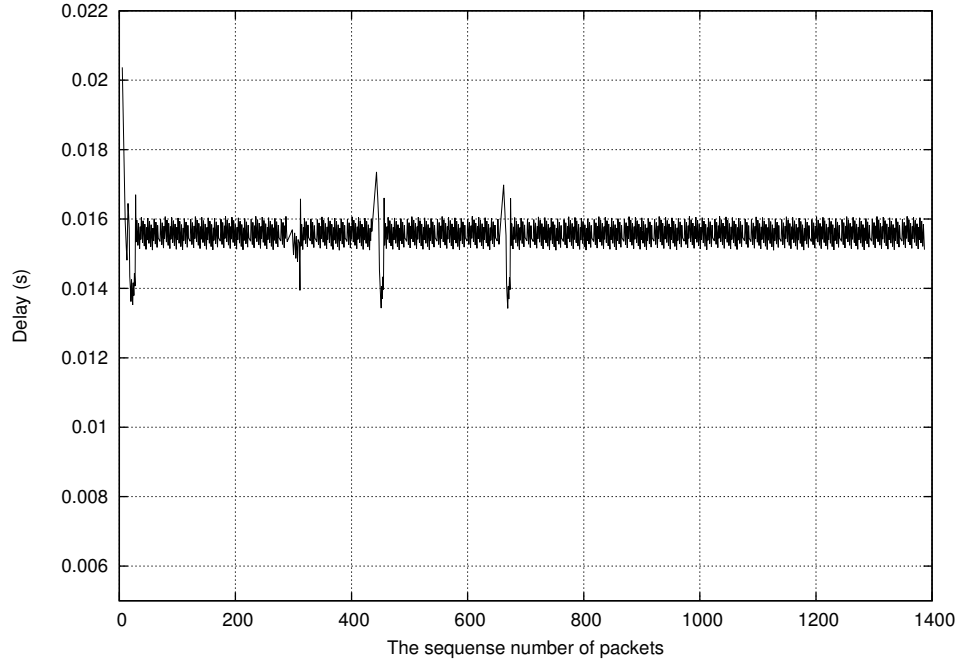


Рисунок 2.6: Изменение задержки прибытия пакетов при хэндовере между базовыми станциями

Для расчета пропускной способности канала воспользуемся спектральной эффективностью  $\eta_i$  из табл. 2.1 [15]. Которая рассчитывается по формуле:

$$\eta_i = \log_2\left(1 + \frac{\gamma_i}{\Gamma}\right), \quad (2.2)$$

$$\Gamma = \frac{-\ln(5 \times BER)}{1.5}, \quad (2.3)$$

$$BER = 0.00005. \quad (2.4)$$

Расчитанная пропускная способность канала при ширине спектра канала 20МГц изображена на рис. 2.7 (d).

Таблица 2.1: Соотношение спектральной эффективности ( $\eta_i$ ) к индексу MCS ( $I_{MCS}$ )

Спектральная эффективность( $\eta_i$ )	$Q_m$	$R$	MCS индекс ( $I_{MCS}$ )
Reserved			0
0.15234375	2	0.076172	1
0.193359375	2	0.09668	2
0.234375	2	0.117188	3
0.305664063	2	0.152832	4
0.376953125	2	0.188477	5
0.489257813	2	0.244629	6
0.6015625	2	0.300781	7
0.739257813	2	0.369629	8
0.876953125	2	0.438477	9
1.026367188	2	0.513184	10
1.17578125	2	0.587891	11
1.326171875	4	0.331543	12
1.4765625	4	0.369141	13
1.6953125	4	0.423828	14
1.9140625	4	0.478516	15
2.16015625	4	0.540039	16
2.40625	4	0.601563	17
2.568359375	4	0.64209	18
2.73046875	6	0.455078	19
3.026367188	6	0.504395	20
3.322265625	6	0.553711	21
3.612304688	6	0.602051	22
3.90234375	6	0.650391	23
4.212890625	6	0.702148	24
4.5234375	6	0.753906	25
4.819335938	6	0.803223	26
5.115234375	6	0.852539	27
5.334960938	6	0.88916	28
5.5546875	6	0.925781	29
2.4	2	1.2	30
Reserved			31

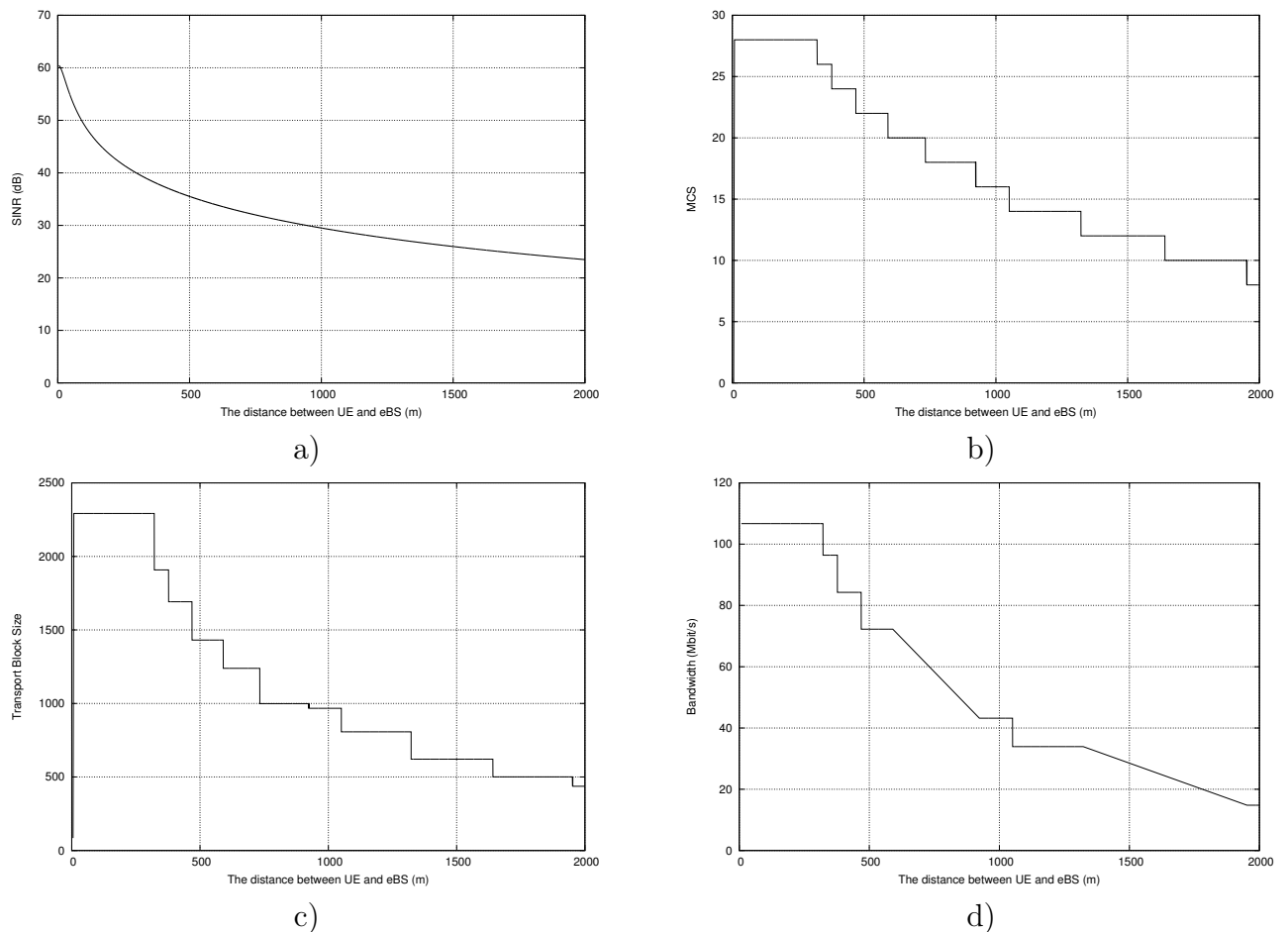


Рисунок 2.7: Зависимость а) SINR б) MCS в) размера TBS г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и базовой станцией

### 2.2.3 Внутрисистемные помехи

Рассмотрим влияние всплесков внутрисистемных помех на характеристики канала передачи в сети LTE. Наличие этих помех определяет суть проблемы электромагнитной совместимости. Выброс внутрисистемных помех может быть вызван влиянием соседней базовой станции, которая работает в том же диапазоне. Анализ показывает, что выбросы помех влияют на характеристики канала в том числе на джиттер и потери пакетов.

Для борьбы с внутрисистемными помехами используются различные методы: уход на другую частоту, помехоустойчивое кодирование и перемежение. Тем не менее, с ухудшением условий распространения волны возникают блоковые ошибки. Это приводит к потере пакетов для IP услуг, таких как FTP и VoIP. В технологии LTE приходится использовать повторные передачи чтобы потери пакетов не снижались ниже определенного уровня, однако эта мера может быть не достаточно эффективной, чтобы предоставить хорошее качество для соответствующей услуги. В результате использования повторных передач появляется джиттер задержки. LTE передачи обычно планируются таким образом, чтобы быть синхронизированными с качеством канала. При этом пакеты передаются к и от пользователей, имеющих наилучшие каналные условия, а пользователи, которые испытывают провалы качества канала, будут ожидать пока условия канала не будут улучшены. Это означает, что пакеты в очереди передачи будут испытывать различные задержки из-за планирования. LTE также ограничивает количество повторных передач, чтобы избежать расхода слишком большого количества



ресурсов передачи для тех пользователей, которые испытывают деградацию условий канала. Это означает, что потери пакетов могут происходить в дополнение к джиттеру задержки. Для услуг реального времени, характерно чтобы пакеты могли быть повторно переданы со сквозной задержкой до 50-100 мс. Пример задержек пакетов, которые могут произойти в присутствии внутрисистемных помех, показан на рис 2.8.

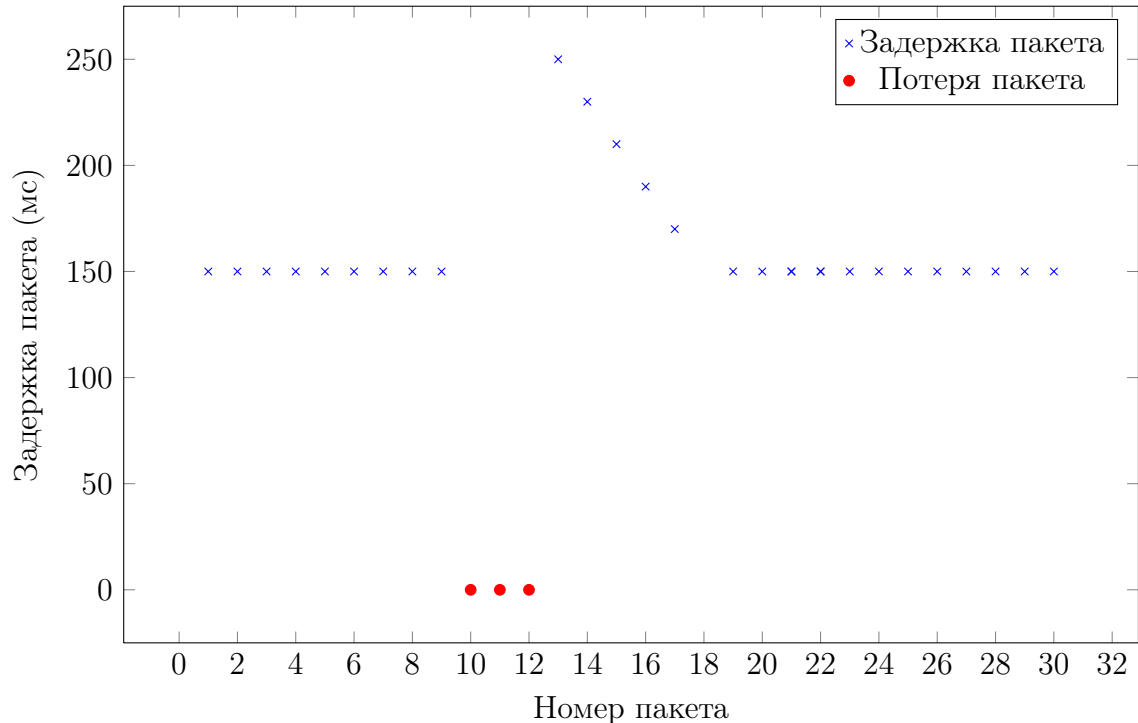


Рисунок 2.8: Пример времени прибытия IP пакетов (синие маркеры), потерь пакетов (красные маркеры) и джиттера задержки в присутствии сильного всплеска внутрисистемных помех.

До воздействия внутрисистемной помехи пакеты передаются без или почти без джиттера. В этом примере предполагается что постоянный джиттер отсутствует, чтобы выделить влияние помехи на задержку прибытия пакетов. На начальном этапе воздействия помехи пакеты обычно теряются. Это происходит из-за ограничений в планировании передачи пакетов и ограничений времени повторной передачи, как описано выше. Пакеты сгенерированные в конце периода воздействия помехи будут поставлены в очередь. Вероятней всего, отправка пакетов будет успешной только после окончания периода влияния помехи. Это может привести к большим задержкам этих пакетов. Вероятным следствием длительных задержек пакетов является то, что буфер компенсации джиттера отбросит пакеты, которые пришли слишком поздно. После периода воздействия помехи задержки пакетов медленно снижаются. Это потому, что пакеты, которые сгенерированные непосредственно после помехи еще ожидают в очереди передачи. Передача вернется к нормальному состоянию, когда передатчик очистит очередь передачи. Скачок задержки после влияния помехи является довольно частым явлением в пакетно коммутируемой сотовой сети, которая использует повторные передачи. Величина потерь пакетов и размер скачка задержки зависит как от помехи так и от того как система настроена.

Проведем моделирование влияния внутрисистемных помех на параметры передачи пакетов в сети LTE. Схема моделирования в NS3 изображена на рис. 2.9. С уменьшением расстояния до источника помехи, мощность помехи увеличивается и характеристики канала начинают деградировать, когда SINR достигает некоего критического уровня (рис. 2.10).

Из рис. 2.11-2.12 видно, что чем больше скорость передачи потока, тем значительно увеличивается джиттер и пакетные потери из-за влияния внутрисистемной помехи.

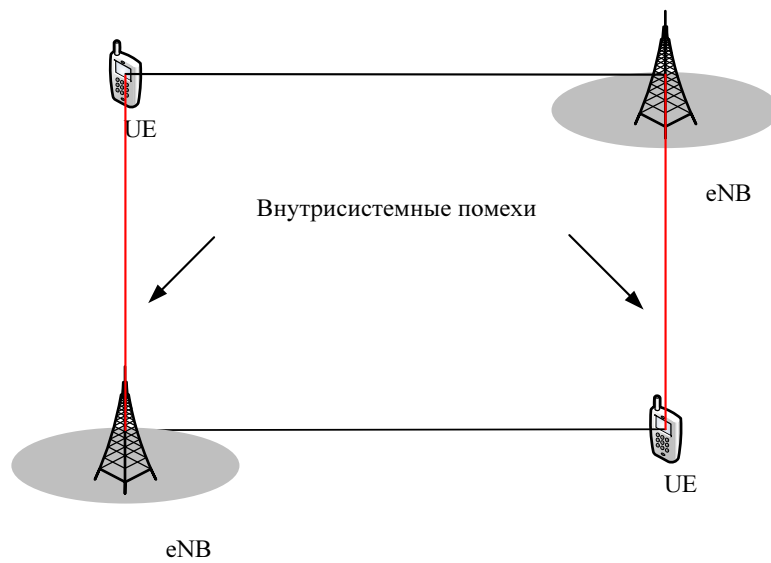


Рисунок 2.9: Схема моделирования влияния внутрисистемных помех в NS3

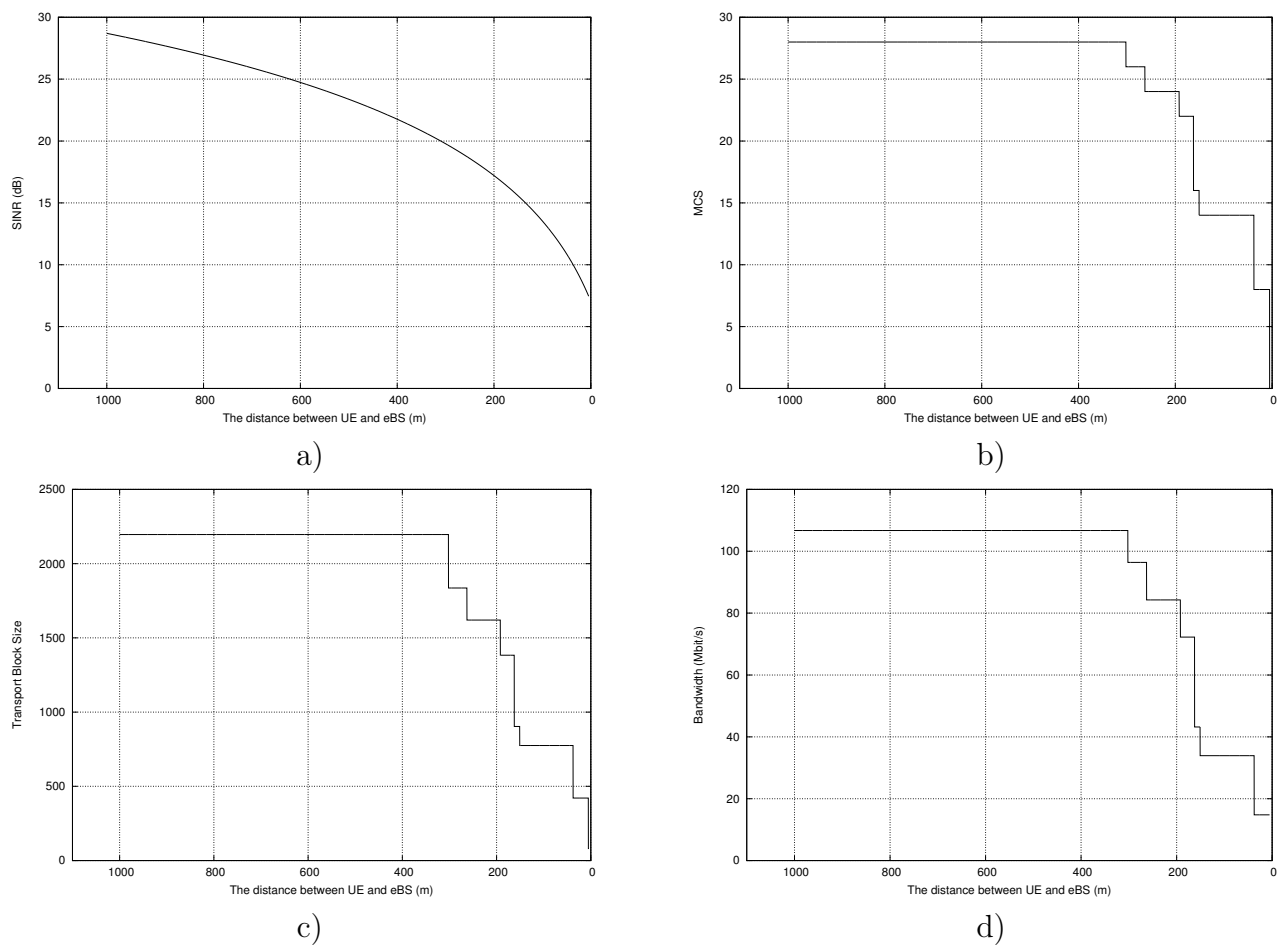


Рисунок 2.10: Зависимость а) SINR б) MCS в) размера ТВ г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и помеховой базовой станцией

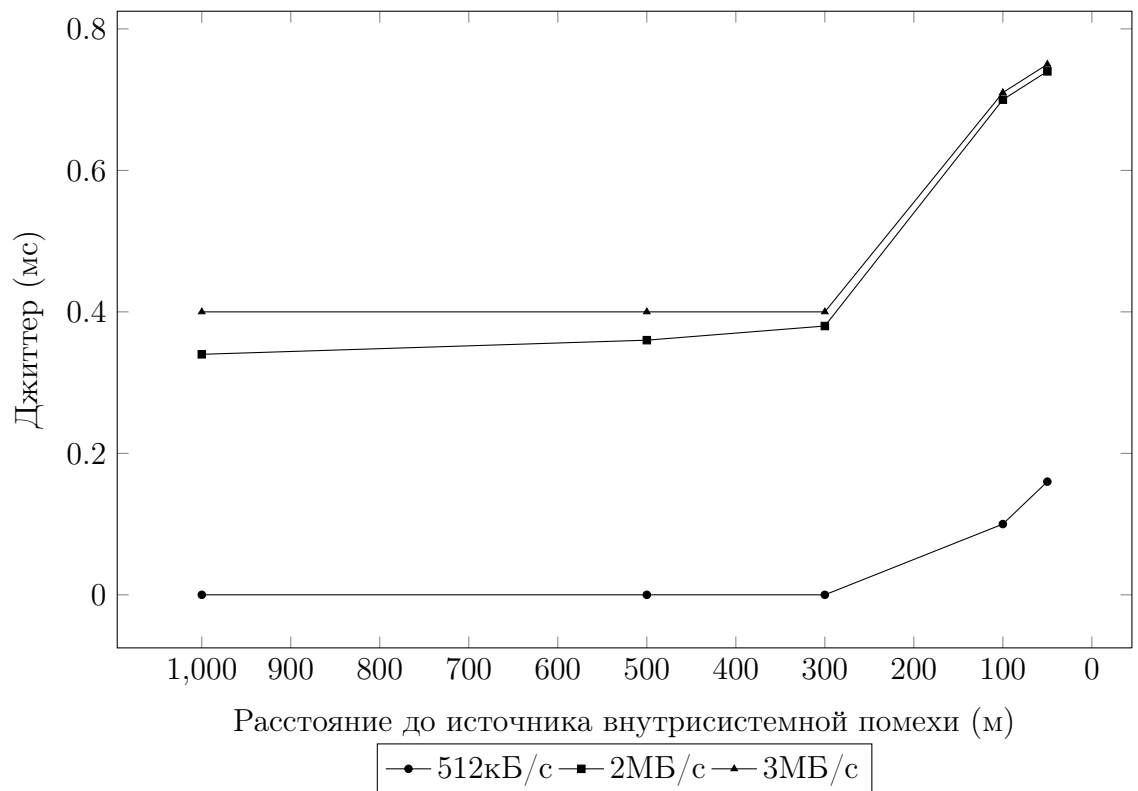


Рисунок 2.11: Зависимость джиттера от расстояния до источника внутрисистемной помехи

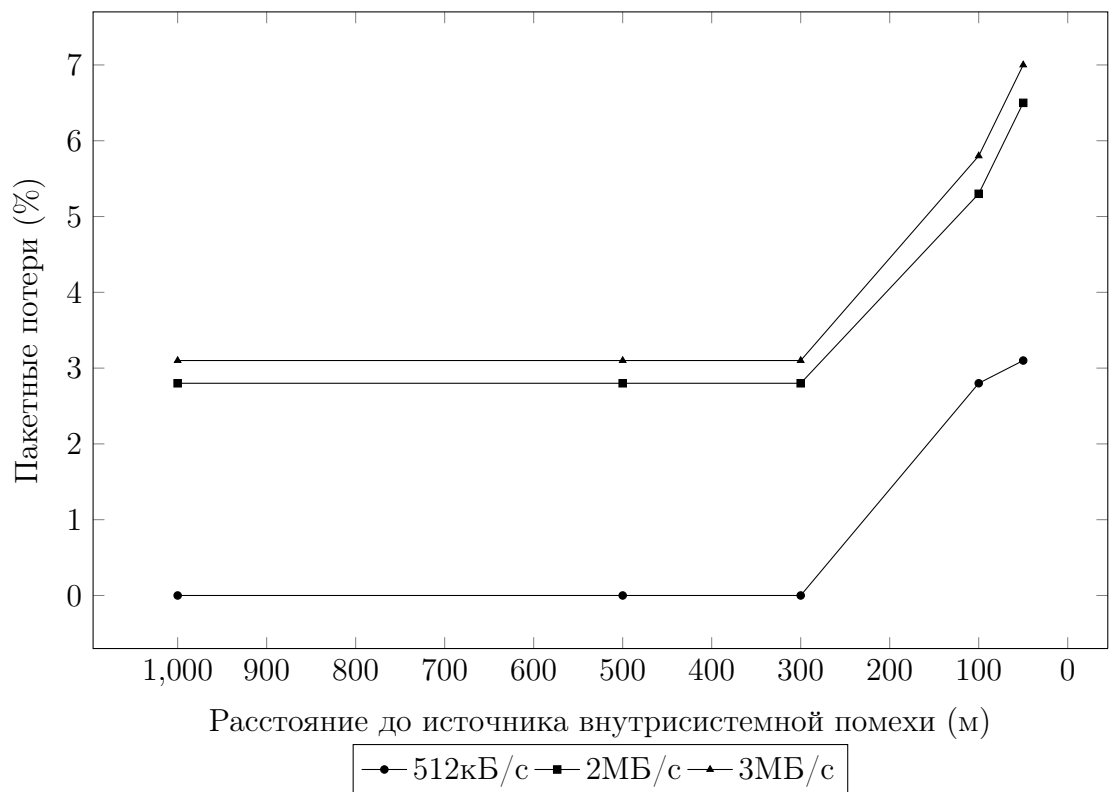


Рисунок 2.12: Зависимость пакетных потерь от расстояния до источника внутрисистемной помехи

## 2.2.4 Замирания в канале

Работа LTE-приемника зависит от разных факторов: конкретного частотного диапазона, многолучевых задержек, доплеровских сдвигов частоты, реализации технологии множественного приема/передачи (MIMO) и т.д.

В реальной среде такие объекты, как горы, здания и машины, отражают, преломляют или не пропускают передаваемые радиосигналы. Эти объекты могут располагаться на различном расстоянии от передатчика – одни ближе, другие дальше. Вследствие этого множество копий сигнала достигают антенны приемника за разное время. У таких запаздывающих копий разные фазовые соотношения, которые при приеме дают как положительный, так и отрицательный эффект. Незначительные отклонения в фазовых соотношениях вызывают пешеходы и машины. Если абонентский терминал перемещается, то изменение фазы увеличивается с ростом его скорости.

Эксперименты показывают колебания уровня принимаемого сигнала выше или ниже его номинала; иногда он снижается до очень низких, почти нулевых значений.

При движении передатчика или приемника проявляется другой эффект – доплеровский сдвиг частоты. Так как запаздывающие копии сигнала поступают на приемник с разных относительно вектора движения направлений, частоты некоторых из них сдвигаются – одни выше, другие ниже реальной частоты сигнала. Этот эффект вызывает особые сложности в OFDM-системах, поскольку для устранения интерференции внутренних поднесущих нельзя использовать простой сдвиг частоты.

По мере увеличения количества путей распространения сигнала растет и число наложений его копий с разными синхронизацией, амплитудой, частотой и фазой. В результате сигнал становится стохастическим (недетерминированным) с рэлеевским распределением. Как известно, рэлеевское распределение достаточно точно отображает колебания амплитуды и изменения частоты (называемые еще доплеровским расширением), характерные для городской застройки.

Условия распространения характеризуются тремя факторами: профилем многолучевой задержки, доплеровским расширением и, в случае применения нескольких антенн, – набором коррелирующих матриц, задающих соотношения для передающей и приемной антенн.

Профиль задержки определяет количество путей распространения, саму задержку и ослабление сигнала. Кроме того, по этому профилю можно вычислить среднеквадратичное отклонение (разброс) задержки. Для технологии LTE выбраны три профиля: для пешехода (табл. 2.2), мобильного пользователя в автомобиле (табл. 2.3) и для типовой городской застройки (табл. 2.4). Сумарная информация по профилям задержек для технологии LTE находится в табл. 2.5.

Таблица 2.2: Расширенная А модель пешехода (ЕРА) [16]

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	0.0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0
190	-17.2
410	-20.8

Еще один параметр – максимальная величина доплеровского сдвига частоты. Он имеет частотный сдвиг:

Таблица 2.3: Расширенная А-модель при движении при движении в автомобиле (EVA) [16]

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	0.0
30	-1.5
150	-1.4
310	-3.6
370	-0.6
710	-9.1
1090	-7.0
1730	-12.0
2510	-16.9

Таблица 2.4: Расширенная модель для типовой городской застройки (ETU) [16]

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	-1.0
50	-1.0
120	-1.0
200	0.0
230	0.0
500	0.0
1600	-3.0
2300	-5.0
5000	-7.0

$$f_D = \frac{\mathcal{V}}{c} - f_c, \quad (2.5)$$

где  $f_c$  является несущей частотой,  $\mathcal{V}$  - скорость движения антенны и  $c$  - скорость света. Все пути в канале имеют классический доплеровский спектр плотности мощности:

$$S(f) = \frac{1}{\pi f_D \sqrt{1 - (\frac{f}{f_D})^2}}, \quad (2.6)$$

где  $f \in [-f_D; f_D]$ . Для LTE-сетей обычно применяются три значения: 5 Гц, 70 Гц и 300 Гц – для низко, средне и высокоскоростных объектов. При работе в диапазоне 2 ГГц эти частоты соответствуют следующим скоростям движения пользователя терминала: 2,7 км/ч, 38,4 км/ч и 162 км/ч. Требования к работе приемника формируются с учетом комбинации этих доплеровских сдвигов частоты с профилями задержки. И хотя существуют три профиля и три доплеровских сдвига частоты, из возможных сочетаний используются пять (табл. 2.6). Профиль пешехода как низкоскоростного объекта определен только для частоты 5 Гц; профиль пользователя в автомобиле – для 5 и 70 Гц, а типовой профиль для города не включает частоту 5 Гц.

Проведем моделирование влияния замираний сигнала в LTE. Влияние замираний на характеристики нисходящего канала передачи при пешеходном сценарии (0-3 км/ч) изображено на рис. 2.13. Влияние замираний на характеристики нисходящего канала передачи при автомобильном сценарии (30-60 км/ч) изображено на рис. 2.14.

Таблица 2.5: Профили задержки для технологии LTE [17]

Модель	Количество путей в канале	Разброс задержки в нс	Максимальная задержка по траектории в нс
Расширенная А-модель пешехода (EPA)	7	45	410
Расширенная А-модель при движении при движении в автомобиле (EVA)	9	367	2510
Расширенная модель для типовой городской застройки (ETU)	9	991	5000

Замирания в канале в конечном счете влияют на прикладной уровень услуг. Далее представим результаты моделирующего эксперимента, проводимого в сетевом симуляторе NS3, который демонстрирует влияние различных типов замирания на задержку, джиттер и пакетные потери в зависимости от расстояния между абонентом и базовой станцией (рис. 2.15-2.17).

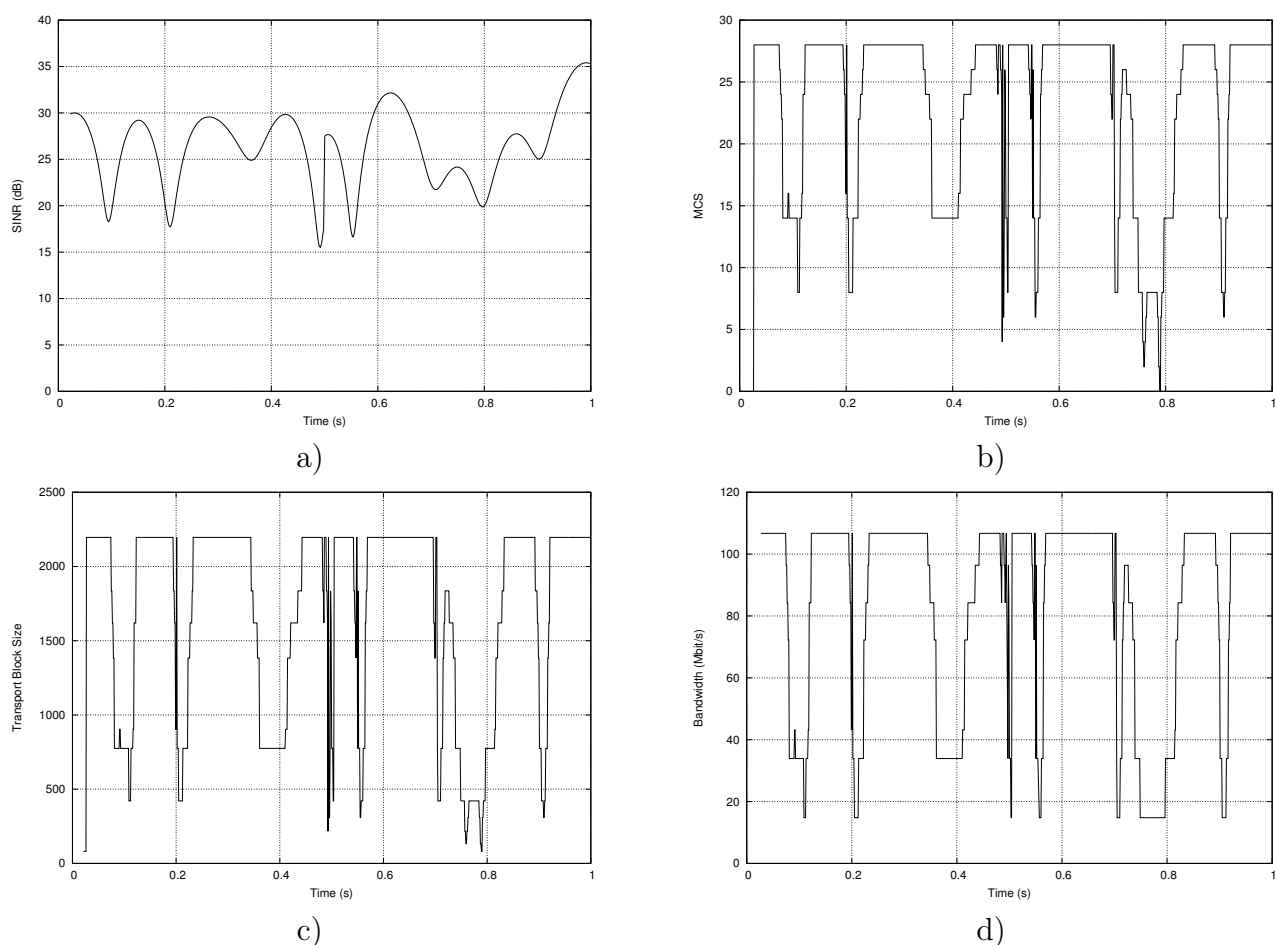


Рисунок 2.13: Влияние замираний на а) SINR б) MCS в) размер TB г) скорость передачи нисходящего канала передачи при пешеходном сценарии (EPA 0-3 км/ч)

Таблица 2.6: Параметры модели канала [17]

Модель	Максимальный доплеровский сдвиг частоты, Гц
EPA 5 Гц	5
EVA 5 Гц	5
EVA 70 Гц	70
ETU 70 Гц	70
ETU 300 Гц	300

На рис. 2.16 изображено изменение джиттера в зависимости от расстояния для трех профилей задержки: EPA, EVA, ETU. При моделировании между абонентом и базовой станцией передается поток со скоростью 512кБ/с. Как мы видим в нашем случае, джиттер и пакетные потери, существенно увеличиваются с увеличением расстояния и при замираниях в канале, которые соответствуют профилю EVA и ETU, даже на небольшом расстоянии предоставление каких либо услуг становится невозможным.

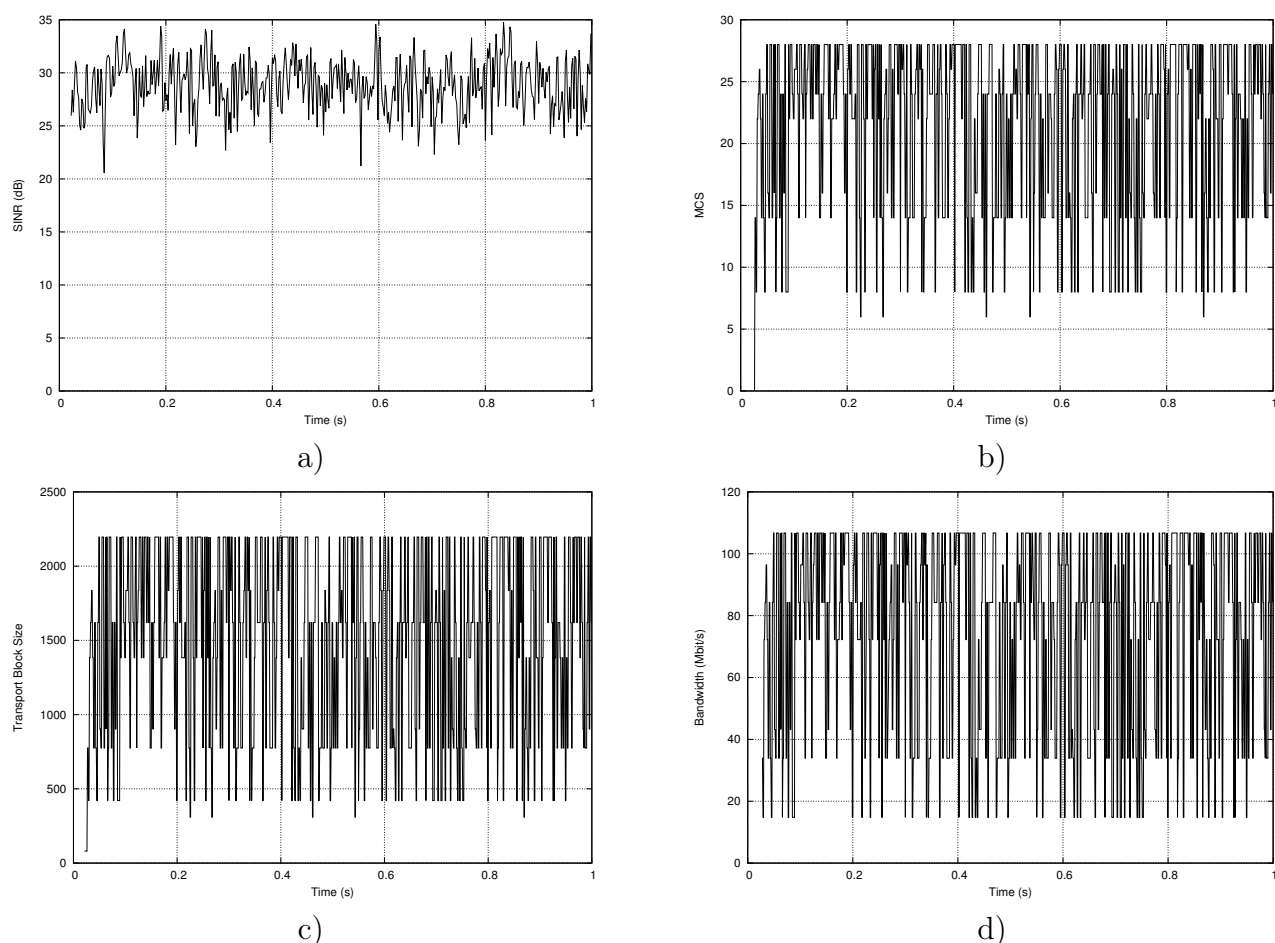


Рисунок 2.14: Влияние замираний на а) SINR б) MCS в) размер TB г) скорость передачи нисходящего канала передачи при автомобильном сценарии (EVA 30-60 км/ч)

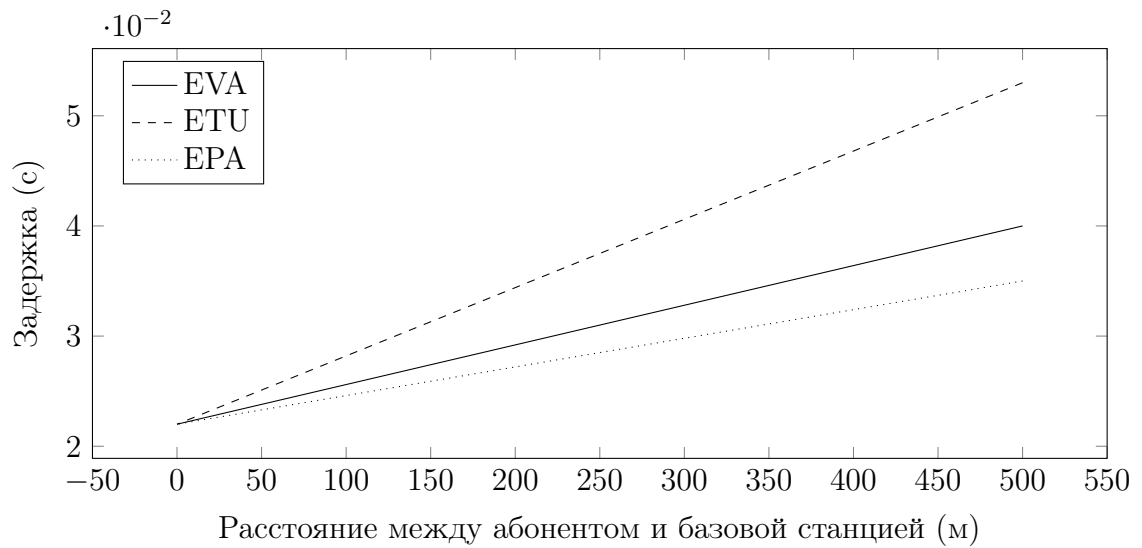


Рисунок 2.15: Зависимость задержки пакетов от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях

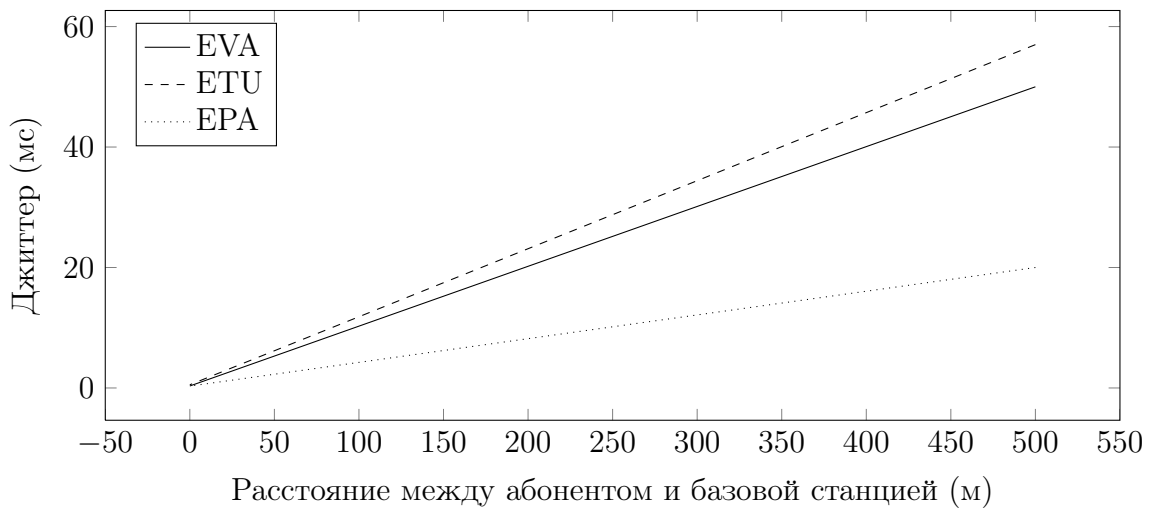


Рисунок 2.16: Зависимость джиттера от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях

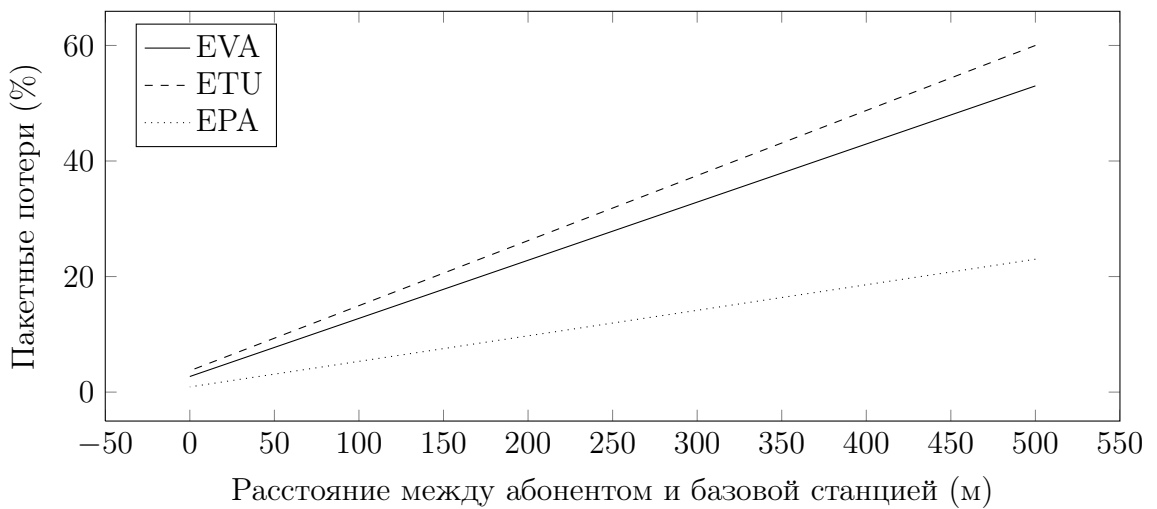


Рисунок 2.17: Зависимость пакетных потерь от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях



## 2.3 Выводы ко 2 разделу

1. Проведен анализ основных причин джиттера в проводной и беспроводной сети, который включает анализ таких причин, как перегрузки в канале доступа, внутрисистемные помехи, замирания в канале связи и т. д. Все это показывает, что в таких современных сетях как LTE до сих пор не решена проблема с джиттером и сети LTE подвержены его влиянию. На данный момент разработка алгоритмов, которые позволяют мониторить текущее состояние и решать проблему с джиттером и пакетными потерями для трафика реального времени является актуальной задачей.
2. Предложено использовать градацию джиттера по 3 основным типам: постоянный джиттер, джиттер содержащий выбросы задержки и джиттер содержащий скачки задержки. Подобная градация позволит разработать дифференцированный подход к компенсации джиттера, вызванного различными факторами. Такой подход дает преимущество в том, что для этих трех типов джиттера необходим различный подход для его компенсации. Например, единичный выброс задержки необходимо проигнорировать, так как этот выброс вероятней всего является ложным и пакет все равно будет потерян, а при скачке задержки компенсатор джиттера должен как можно быстрее перестроиться на новое значение задержки, чтобы как можно меньше пакетов были отброшены буфером из-за скачка джиттера.
3. На основе выше изложенного анализа, предлагаем разработать алгоритм компенсации джиттера и способ его эффективного внедрения в LTE сеть в разделе 3.

## Глава 3

# Синтез алгоритма буфера компенсации джиттера прибытия пакетов на основе робастного фильтра Калмана

### 3.1 Синтез математической модели процесса задержки

Перед синтезом алгоритма буфера компенсации джиттера необходимо определиться с моделью задержки, которая представляет собой случайный гауссовый процесс. Достаточно конструктивной моделью случайного динамического процесса, является формирующий фильтр, описываемый уравнением состояния:

$$dx(t)/dt = \Phi(t)x(t) + G(t)\xi(t). \quad (3.1)$$

Учитывая то, что мы рассматриваем информационный обмен в цифровой форме в виде пакетов, уравнение состояния, описывающее случайные изменения задержки на каждом из  $k$  шагов дискретизации, представляется в виде:

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + G(k)\xi(k), \quad (3.2)$$

где  $\Phi(k+1, k)$  - матрица перехода;  $G(k)$  - порождающий коэффициент;  $\xi(k)$  - порождающая последовательность выборки из гауссовского белого шума (ГБШ), со спектральной плотностью мощности  $N_\xi$ .

Процесс измерения задержки будем считать линейным. Уравнение наблюдения в линейном приближении представляется в виде:

$$y(k) = Hx(k) + \nu(k), \quad (3.3)$$

где  $\nu(k)$  - фазовый шум ошибки измерения, являющийся порождающей последовательностью выборки из гауссовского белого шума со спектральной плотностью мощности  $N_\nu$ , некоррелированный с процессом  $\xi(k)$ . Модель описанная, уравнением (3.2), является стационарной, в реальных же ситуациях процесс задержки претерпевает различные случайные скачки и выбросы, обусловленные наличием инерционных элементов, таких как буферы, маршрутизаторы и др. Таким образом, могут быть выделены участки квазистационарности и определенные временные промежутки, где процесс  $x(t)$  нестационарен.

Как мы видим из раздела 2, процесс задержки имеет различные возмущения, вызванные различными причинами и, следовательно, математическая модель задержки должна учитывать все эти возмущения. Очевидно, указанные выбросы и скачки задержки можно учитывать, как в уравнении состояния (3.2) так и в уравнении наблюдения (3.3).

Но смотря на то, что выбросы существенно ухудшают качество оценок, получаемых с помощью алгоритмов, оптимальных для гауссовского распределения. Разрабатываемый алгоритм компенсации джиттера должен будет игнорировать единичные выбросы. Тогда логичнее ввести выбросы задержки в уравнение наблюдения для того чтобы принимать выброс как ошибку наблюдения. И наоборот, при скачке задержки алгоритм компенсации джиттера должен, как можно раньше, увеличить размер буфера до необходимого значения, чтобы снизить пакетные потери. Тогда логичнее ввести скачки задержки в уравнение состояния.

Для описания помех  $\xi(k)$ , содержащие выбросы, могут быть использованы различные модели. Алгоритмы фильтрации, представленные в [18–21], основаны на описании помех в виде:

$$\xi(k) = (1 - r_v(k))\xi(k) + r_v(k)\xi_v(k), \quad (3.4)$$

$$P[\xi(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_1(k)] + \varepsilon N[0, R_2(k)], \quad (3.5)$$

где  $\xi_v(k)$  - случайный процесс выброса,  $P$  - плотность распределения вероятностей,  $r_v(k)$  - случайная величина, принимающая значения 0 и 1 с вероятностями:

$$P[r_v(k) = 1] = \varepsilon, P[r_v(k) = 0] = 1 - \varepsilon, \|R_2\| \gg \|R_1\|, \quad (3.6)$$

Для описания случайного процесса, содержащего скачки, воспользуемся следующей моделью:

$$x(k) = (1 - r_s(k))x(k) + r_s(k)x_s(k), \quad (3.7)$$

$$P[x(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_1(k)] + \varepsilon N[0, R_2(k)], \quad (3.8)$$

где  $x_s(k)$  - случайный процесс скачка,  $r_s(k)$  - случайная величина, принимающая значения 0 и 1 с вероятностями:

$$P[r_s(k) = 1] = \varepsilon, P[r_s(k) = 0] = 1 - \varepsilon, \|R_2\| \gg \|R_1\|, \quad (3.9)$$

где  $x_s(k)$  представляет собой уравнение состояния случайного процесса скачка, а  $r_s(k)$  представляет собой последовательностью случайных величин с двумя значениями на каждом шаге: «ноль» или «единица». Вероятности появления этих значений определяют долю засоренности скачками уравнения состояния. Учитывая то, что в рассматриваемой модели имеет место два типа уравнения состояния: для выброса и для скачка, необходимо дополнительное устройство, предназначенное для идентификации типа изменений, которое будет рассмотрено дальше. С помощью предложенной модели случайного процесса сгенерируем ряд задержек с выбросами на рис. 3.1 а) и ряд задержек со скачками задержки на рис. 3.1 б).

В результате была получена математическая модель изменения задержки, которая будет использоваться в дальнейшем для моделирования буфера компенсации джиттера.

## 3.2 Анализ работы буфера компенсации джиттера и рабочих характеристик применительно к передаче потокового трафика через IP сети

Буфер воспроизведения в приемнике удерживает каждый принятый пакет на величину времени буфера, в котором компенсируется джиттер без чрезмерной задержки

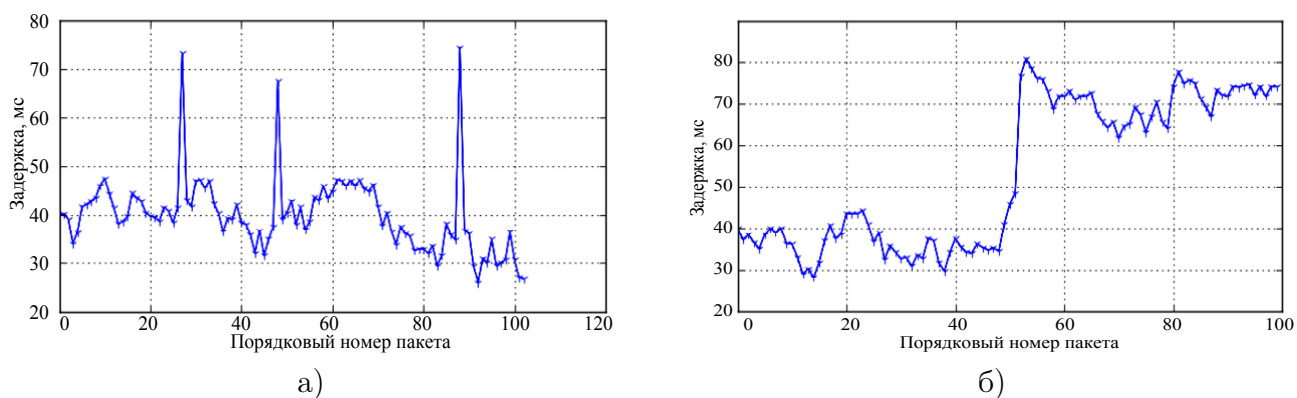


Рисунок 3.1: Моделирование ряда задержек а) с выбросами, б) со скачками

воспроизведения. Если межпакетная задержка будет превышать буферное время, буфер будет истощаться, и декодеру не будет хватать пакетов, чтобы воспроизводить речь. Это приводит к неравномерности воспроизведения речи. Согласно рекомендации ITU G.1020 [22] пакеты, прибывающие к получателю, обрабатываются согласно процессу, изображенному на рис. 3.2.

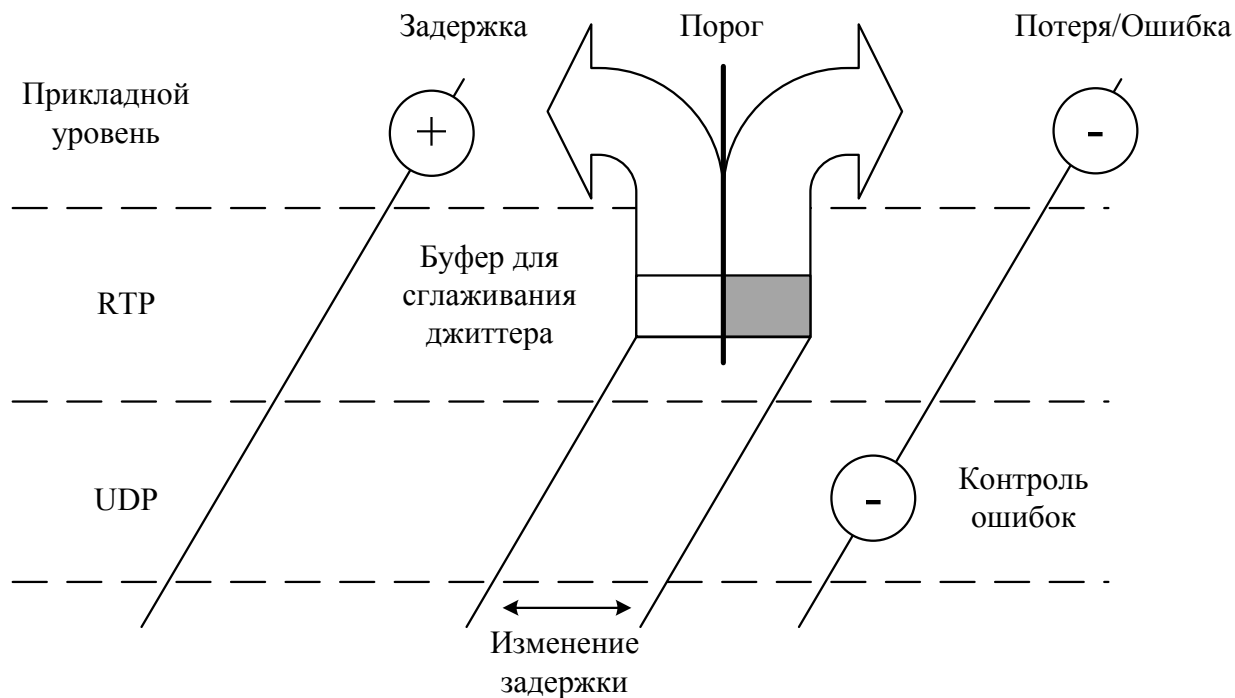


Рисунок 3.2: Алгоритм обработки сетевых пакетов

Прибывающие пакеты обрабатываются по мере их продвижения по стеку протокола. Показано, что некоторые виды ухудшений, такие как ошибки и джиттер преобразуются в другие ухудшения, такие как общие потери и общие ошибки. На рис. 3.7 показан компромисс между задержкой и потерями, представленные в виде порога в диапазоне изменения задержки, основанном на размере буфера для сглаживания джиттера. Пакеты с задержкой находящейся в белой зоне будут приняты, тогда как пакеты с задержкой находящейся в черной зоне будут отброшены. Ясно, что чем дольше задержка, тем больше пакетов прибудет до их времени воспроизведения и тем лучше будет компенсация джиттера. В тоже время, длительные задержки нежелательны, так как они ухудшают интерактивность человеческого общения. Отметим, что человеческое ухо терпимо относится к максимальным задержкам от 150 до 400 миллисекунд [23].

Различные схемы кодирования также могут иметь различные допуски к потерям. Как следствие, хороший алгоритм компенсации джиттера основан на компромиссе между задержкой воспроизведения и потерями пакетов. Рассмотрим изменение процесса потерь во время взаимодействия пакетов с буфером компенсации джиттера. В зависимости от критерия, определяющего решение принимать или отбрасывать каждый конкретный пакет из потока, в результате может полностью измениться распределение общих потерь и общей задержки. Например, если случайные битовые ошибки вызывают ошибки в контрольной сумме UDP, то потери пакетов будут иметь случайное распределение, по мере того как они поступают на прикладной уровень. Но, если несколько последовательных пакетов испытывают чрезмерные задержки, то дополнительные отбрасывания, вызванные ограничениями буфера компенсации джиттера, сделают общее распределение потерь еще и прерывистым. Существуют обстоятельства, при которых порядок следования пакетов может изменяться во время их прохождения через сеть. При определенных условиях некоторые буферы компенсации джиттера неспособны восстановить порядок следования переупорядоченных пакетов и, в этом случае, они обозначаются как отброшенные пакеты. Также рассмотрим влияние буфера компенсации джиттера на процесс задержки. На рис. 3.3 показаны основные элементы тракта передачи речи, которые вносят вклад в речевую задержку. Задержка сети переменна и для компенсации джиттера и восстановления допустимого интервала между пакетами используют буфер компенсации джиттера. Заметим, что пакеты с минимальной задержкой на стороне отправителя и сети, проводят максимальное время в буфере компенсации джиттера; и наоборот, пакеты, которые задерживаются дольше минимального времени, проводят затем в данном буфере меньшее время. Кроме того, существует еще, и некоторое минимальное количество времени, которое каждый пакет должен проводить в буфере на стороне получателя, которое может быть столь же велико, как и целый пакет.

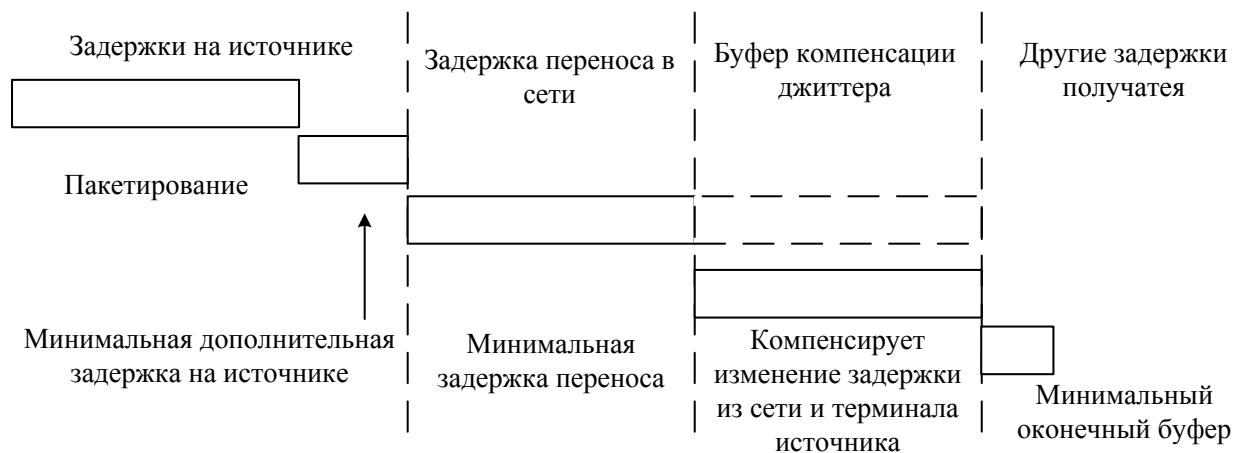


Рисунок 3.3: Задержка в пакетных сетях и сетевых элементах

Правильное значение задержки буфера для объединения с другими задержками зависит от наличия описательной статистики. Например, среднюю задержку в сети следует суммировать со средним временем использования буфера компенсации джиттера, чтобы получить общую среднюю задержку. Этот метод предусматривает адаптацию буфера, требуя знания только среднего времени пребывания всех пакетов в очереди в оцениваемом временном интервале. С другой стороны, если известна только минимальная задержка в сети, то ее следует суммировать с максимальным временем использования буфера компенсации джиттера, чтобы дать общую задержку. Далее рассмотрим инициализацию буфера компенсации джиттера фиксированного размера. Если первый прибывающий пакет имеет минимальную задержку передачи, то получатель будет сохранять этот пакет в буфере все необходимое время, и размер буферизации будет

равен ожидаемому. К счастью, многие пакеты прибывают за время, равное или близкое к минимальному времени передачи, поэтому этот случай весьма правдоподобен. С другой стороны, если первый пакет имеет довольно большую задержку, то для размещения ранее принятых пакетов со временем передачи, равным или близким к минимальному времени передачи, потребуется больше буферного пространства, а буфер для сглаживания фазового дрожания будет вносить в общий расчет задержку, превышающую ожидаемую.

### 3.3 Систематизация типов, параметров и моделей буферов компенсации джиттера

Существуют два основных типа буферов компенсации джиттера – фиксированной длины и адаптивной длины. Буферы компенсации джиттера, согласно рекомендации [22], могут быть построены с использованием разных способов, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1: Типы и параметры буфера компенсации джиттера

Тип	Атрибуты	Возможности	
Фиксированный и адаптивный	Размер (конфигурируется максимальная и номинальная или минимальная)	Целое количество пакетов	Дробное количество пакетов
Адаптивный	Управление	Синхронизированное ослабление при отсутствии переполнения / антипереполнения	Оценить коэффициент потерь (конфигурировать приемлемый наименьший порог и минимальный счет пакетов между подстройками)
	Подстройка	Синхронизированная	Только в промежутках молчания
	Инициализация	Первый пакет	Малая выборка
	Неравномерность подстройки	Размер пакета	Дробная часть пакета
	Восстановление порядка пакетов	Да	Нет
	Режим передачи данных в полосе тональных частот	Обнаружение тональной частоты 2100 Гц; установка максимальной длины	Нет

Более подробно рассмотрим параметры построения алгоритма адаптивного буфера компенсации джиттера по методу подстройки задержки воспроизведения, такие как алгоритмы выполняющие коррекцию синхронно и алгоритмы выполняющие коррекцию в промежутках между речевыми потоками. В схеме с синхронизированной подстройкой задержки воспроизведения (рис. 3.4 а) время воспроизведения всех последующих пакетов

растягивается всякий раз, когда пакет чрезмерно задерживается в сети. Во втором случае, показанном на рис. 3.4 б, производится корректировка первого пакета речевого потока, а все остальные пакеты воспроизводятся через фиксированный интервал после первого пакета. Пакеты, прибывшие позже, отбрасываются, и кодек может либо повторить последний принятый пакет или вставить паузу или проиграть другие экстраполированные звуки.

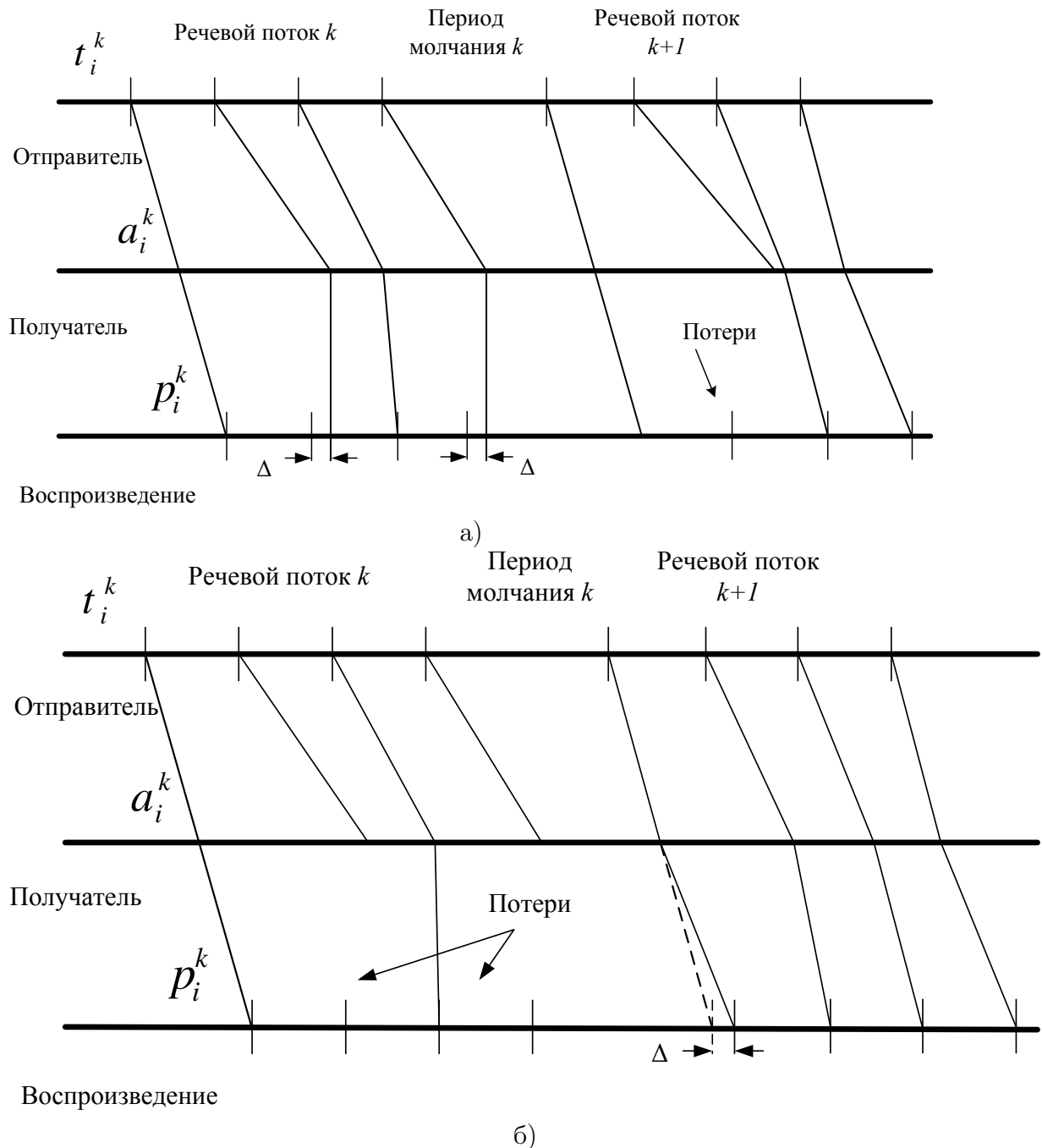


Рисунок 3.4: Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками а) с синхронной подстройкой б) с подстройкой первого пакета речевого потока

Синхронизированный способ сводит к минимуму потери пакетов, но влияет на длину исходного речевого потока, что приводит к проблемам с разборчивостью восстановленной речи. По этой причине разрабатываемый буфер компенсации джиттера будет основан на алгоритме с подстройкой задержки только в периоды молчания.



## 3.4 Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера.

### 3.4.1 Модель фиксированного буфера компенсации джиттера.

Наиболее простой и эффективной моделью отбрасывания пакетов является фиксированный буфер компенсации джиттера, который обозначает, как отбрасываемые, все пакеты, задержка которых больше чем минимальная задержка передачи потока пакетов плюс фиксированная длина буфера для сглаживания джиттера. Рассмотрим пример алгоритма от сетевого до прикладного уровня, предполагая что на терминале получателя используется буфер компенсации джиттера с фиксированной длиной:

1. Отметить как потерянные все пакеты с неверной контрольной суммой UDP.
2. Отметить как отбрасываемые все пакеты, задержка которых больше, чем минимальная задержка передачи потока пакетов плюс (фиксированная) длина буфера для сглаживания джиттера, или задержка которых меньше чем установленный минимум.
3. Суммировать среднюю задержку в сети со средней задержкой терминала источника и терминала получателя, чтобы получить общую среднюю задержку, или суммировать минимальную задержку в терминале источника и минимальную задержку в сети с максимальной задержкой терминала получателя (отражающую максимальное время использования буфера для сглаживания джиттера).

В вышеприведенном шаге 2 минимальную задержку передачи следует оценивать на коротких интервалах, например 10 секунд. Данное минимальное значение первого интервала используется всегда, не считая краткосрочного увеличения минимума вне диапазона адаптации буфера. В этом случае ни один из пакетов не будет доставлен на верхние уровни и буфер компенсации джиттера должен быть переустановлен на новый минимум, что вероятно будет происходить на практике. Или же, если краткосрочное значение минимума уменьшится до величины, при которой высокий процент (временно 50%) пакетов были бы помечены как потерянные из-за раннего поступления, то буфер компенсации джиттера должен быть переустановлен на новый минимум.

### 3.4.2 Модель адаптивного буфера компенсации джиттера.

Фиксированный буфер компенсации джиттера может быть заменен эмуляцией адаптивного буфера компенсации джиттера, как описано в данном пункте, когда имеется информация о временной последовательности потока пакетов. Временные последовательности поступления пакетов могут быть использованы эмулятором адаптивного буфера компенсации джиттера при определении динамики размера буфера и среднего времени использования буфера (задержка) для этой последовательности. Эта средняя задержка может быть объединена с другими константами задержки в терминале получателя для получения оценки средней задержки в терминале получателя. Рассмотрим пример эмулятора адаптивного буфера для сглаживания джиттера с коррекцией задержки в промежутках молчания [24]. Чтобы определить время воспроизведения для пакета  $k$ -ого, мы рассмотрим два случая, в зависимости от того является  $k$ -ый пакет первым в речевом потоке или нет: Если  $k$ -ый пакет является первым в речевом потоке  $i$ , то его время воспроизведения рассчитывается как:

$$p(k) = t(k) + \hat{x}(k) + \gamma \cdot \hat{\nu}(k), \quad (3.10)$$



где  $\hat{x}(k)$  - оценка среднего значения сквозной задержки,  $\hat{v}(k)$  - оценка отклонения от среднего значения сквозной сетевой задержки,  $\gamma$  - константа, используемая для установки времени воспроизведения так чтобы только небольшая часть поступающих пакетов была потеряна [24]. Эта константа равна 4 во всех экспериментах, выполняемых в [24]. В [23] это значение варьируют от 1 до 20, что бы добиться различного процента потерь. Чтобы пересчитать среднюю сетевую задержку и его отклонение, используются следующие уравнения:

$$\hat{x}^i(k) = \alpha \cdot \hat{x}^i(k-1) + (1 - \alpha) \cdot x^i(k), \quad (3.11)$$

$$\hat{v}^i(k) = \alpha \cdot \hat{v}^i(k-1) + (1 - \alpha) \cdot |\hat{x}^i(k) - x^i(k)|. \quad (3.12)$$

Эти уравнения представляю собой линейные рекурсивные фильтры, где коэффициент  $\alpha$  называется шаговой постоянной,  $\alpha \leq 1$  и обеспечивает устойчивость процедуры. В работе [24] значение  $\alpha$  выбрано равным 0.98002.

Очевидно, что эти уравнения являются преобразованными уравнениями стохастической аппроксимации типа Роббинса-Монро и получаемая оценка  $\hat{x}^i(k)$  и  $\hat{v}^i(k)$ , является оптимальной для оценивания случайной величины для которых уравнение состояния  $x(k) = x(k-1)$ . В нашем случае сетевая задержка представляет случайный процесс, поэтому оценки (3.11), (3.12) позволяют получить лишь среднии значения задержек. Нас же интересуют их текущие значения. Адекватной процедурой для оценки текущих парпметров случайного процесса является процедура Калмана-Бьюси.

### 3.5 Анализ алгоритмов фильтрации помех содержащих выбросы и скачки

Фильтр Калмана-Бьюси дает решение задачи оптимального оценивания в линейных динамических системах при гауссовском распределение помех. Однако в нашей прикладной задаче, распределение шумов не является гауссовским, причем распространенной причиной отклонения распределения вероятностей помех от гауссовского является наличие выбросов и скачков в оцениваемом процессе. Хорошо известно [25], что такие отклонения существенно ухудшают качество оценок, получаемых с помощью алгоритмов, оптимальных для гауссовских помех. Поэтому не случайно большое внимание удуляется разработке робастных алгоритмов фильтрации, стабильно работающих в условиях, когда помехи содержат выбросы или скачки [13, 18–21, 26]. В [18] задача фильтрации при наличие выбросов решалась, как задача негауссовской фильтрации, однако реализация полученного алгоритма на ЭВМ представляет затруднительные трудности. Дальнейшее развитие этот подход получил в [19]. Однако этот алгоритм фильтрации имеет ряд недостатков: для его построения необходимо знать вероятность появления выброса, что не подходит для решения нашей задачи, так как задержка в телекоммуникационной системе нестационарна, и распределение вероятностей помех должно быть симметричным.

Другой подход к решению задачи фильтрации помех, содержащих выбросы, представлен в [20, 21]. В представлении шумов предполагается, что с большей вероятностью помехи измерения распределены нормально с нулевым средним и заданной ковариационной матрицей и с малой вероятностью распределены также нормально, но с ковариационной матрицей, имеющей большую норму. Алгоритм фильтрации основан на обнаружении момента появления выброса и изменении коэффициента усиления в зависимости от результатов обнаружения. Для модификации коэффициента используется ковариационная матрица источников выбросов.

В [13] предполагается, что в нормальном режиме работы измерительного устройства помехи распределены нормально с нулевым средним и известной ковариационной матрицей, а в режиме сбоев помехи имеют нормальное распределение с неизвестным средним и той же ковариационной матрицей. Алгоритм фильтрации получен на основе обнаружения момента появления выброса, оценивания его амплитуды и соответствующие модификации коэффициента усиления и ковариационной матрицы. В этом случае априорной информации о характеристиках выбросов не требуется.

Рассмотрим более детально алгоритмы фильтрации описанные выше:

**1. Фильтр Калмана (ФК).** ФК синтезирован с учетом того, что наблюдаемый процесс соответствует уравнению (3.2) и наблюдается на фоне гауссовского белого шума. Уравнение оценки в виде условного среднего значения задержки с использованием ФК имеет вид:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)\Delta y, \quad (3.13)$$

где  $\Delta y = H\Phi\hat{x}(k) - y(k)$  - невязка,  $K(k)$  - коэффициент, обеспечивающий устойчивость и сходимость процедуры, в частности  $K(k)$  может быть константой  $K \leq 1$ . Коэффициент усиления ФК  $K(k)$  является функцией от апостериорной дисперсии ошибки оценки  $V(k)$ , что ускоряет его сходимость:

$$K(k) = V(k)H^T N_v^{-1}, \quad (3.14)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1), \quad (3.15)$$

$$V(k, k-1) = \Phi^T V(k-1)\Phi + N_\xi, \quad (3.16)$$

где  $V(k)$  - апостериорная дисперсия ошибки оценки,  $V(k, k-1)$  - априорная дисперсия ошибки оценки,  $I$  - единичная матрица.

На рис. 3.5 представлена схема сглаживающего фильтра, построенная в соответствии с (3.13). Ключевую роль в оценке ФК текущего значения задержки, является параметр  $\Phi$  позволяющий регулировать сглаживающие свойства фильтра.

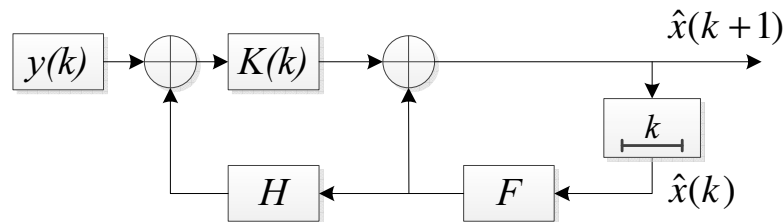


Рисунок 3.5: Схема ФК

**2. Оптимальный фильтр [13],** который может быть синтезирован в том случае, когда в (3.4), (3.5) известны последовательности  $\{r_v\}$ ,  $\{R_2(k)\}$ . Выражения описывающие алгоритм, имеют вид:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)\Delta y, \quad (3.17)$$

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.18)$$

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)\{H(k)V(k|k-1)H^T(k) + [1 - r_v(k)R_1(k) + r_v(k)R_2(k)]\}^{-1}, \quad (3.19)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1). \quad (3.20)$$

**3. Оптимальный линейный фильтр [13]** при известной вероятности появления выбросов  $\varepsilon$  и известных ковариационных матрицах  $\{R_2(k)\}$ :

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)\Delta y, \quad (3.21)$$

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.22)$$

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)[H(k)V(k|k-1)H^T(k) + (1-\varepsilon)R_1(k) + \varepsilon R_2(k)]^{-1}, \quad (3.23)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1). \quad (3.24)$$

**4. Алгоритм фильтрации, приведенный в [21]:**

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)\Delta y, \quad (3.25)$$

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.26)$$

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)\{H(k)V(k|k-1)H^T(k) + (1-\hat{r}_v(k))R_1(k) + \hat{r}_v(k)R_2(k)\}^{-1}, \quad (3.27)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1)[I - K(k-1)H(k)]^T + K(k)R_1(k)K^T(k). \quad (3.28)$$

$$\hat{r}_v(k) = \begin{cases} 0, & \|\Delta y(k)\| \leq c_1 \\ 1, & \|\Delta y(k)\| > c_1 \end{cases} \quad (3.29)$$

**5. Алгоритм фильтрации, приведенный в [13]:**

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + [K(k) - \hat{r}_v(k)K(k)BL(k)]\Delta y, \quad (3.30)$$

$$L(k) = [B^TVv^{-1}(k)B]^{-1}B^TV^{-1}(k), \quad (3.31)$$

$$Vv(k)H(k)V(k, k-1)H^T(k) + R_1(k), \quad (3.32)$$

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.33)$$

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)[H(k)V(k|k-1)H^T(k) + R_1(k)]^{-1}, \quad (3.34)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1)[I - K(k-1)H(k)]^T + K(k)R_1(k)K^T(k) + \hat{r}_vK(k)BD(k)B^TK^T(k), \quad (3.35)$$

$$D(k) = [B^T V^{-1}(k) B]^{-1}, \quad (3.36)$$

$$\hat{r}_v(k) = \begin{cases} 0, & \|l(k)\| \leq c_2 \\ 1, & \|l(k)\| > c_2 \end{cases} \quad (3.37)$$

$$l(k) = \Delta y^T V^{-1}(k) B [B^T V^{-1}(k) B]^{-1} B^T V^{-1}(k) \Delta y, \quad (3.38)$$

Из анализа этих алгоритмов [13] отметим что алгоритмы (3.25)-(3.28) и (3.30)-(3.38) уступают по точности оптимальному фильтру, но дают более точные оценки, чем ФК. Особенно это характерно в случае мощных выбросов. По точности алгоритмы (3.25)-(3.28) и (3.30)-(3.38) различаются не значительно, однако в отличие от первого второй не требует информации о характеристиках выбросов

Таблица 3.2: Дисперсия ошибок оценивания в момент  $k = 20$ .  $\sigma_{OPT}^2$  - для оптимального фильтра (3.17)-(3.20),  $\sigma_{LIN}^2$  - для линейного фильтра (3.21)-(3.24),  $\sigma_{KAL}^2$  - для ФК,  $\sigma_{RB1}^2$  - для алгоритма (3.25)-(3.28),  $\sigma_{RB2}^2$  - для алгоритма (3.30)-(3.38) [13]

$R_1 = 1$	$\varepsilon$	$R_2$	$\sigma_{OPT}^2$	$\sigma_{LIN}^2$	$\sigma_{KAL}^2$	$\sigma_{RB1}^2$	$\sigma_{RB2}^2$
0,1	0,05	9	0,210	0,247	0,248	0,232	0,234
0,1	0,05	36	0,211	0,314	0,367	0,222	0,222
0,1	0,05	100	0,211	0,386	0,655	0,223	0,223
0,1	0,2	9	0,234	0,308	0,381	0,287	0,291
0,1	0,2	36	0,235	0,410	0,921	0,277	0,273
0,1	0,2	100	0,235	0,469	2,182	0,263	0,262
1	0,05	9	0,633	0,748	0,782	0,744	0,746
1	0,05	36	0,638	1,129	1,391	0,763	0,761
1	0,05	100	0,639	1,697	2,823	0,770	0,761
1	0,2	9	0,792	1,093	1,332	1,066	1,072
1	0,2	36	0,829	1,951	3,659	1,377	1,407
1	0,2	100	0,835	2,861	9,156	1,258	1,286

Рассмотренные алгоритмы обладают рядом недостатков:

1. Алгоритм ФК дает решение оптимального оценивания в линейных динамических системах при гауссовском распределении помех, а при отклонении от нормальности (выбросы и скачки) качество оценивания существенно ухудшаются.
2. Для реализации 2-4 алгоритмов необходима априорная информация о характеристиках выбросов, а так как телекоммуникационные системы нестационарны, то практическое применение этих алгоритмов в таких системах ограничено.
3. Ни один алгоритм не учитывает особенностей, которые необходимо учитывать при фильтрации случайного процесса со скачками.

Для решения этих недостатков рассмотрим ряд алгоритмов из [26].

### 3.5.1 Робастный фильтр Калмана (РФК) для ситуации выброса

Алгоритм РФК для ситуации выброса согласно рекомендации [26] выглядит следующим образом:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k)\Delta y \cdot \min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\}, \quad (3.39)$$

где  $b$  является некоторым ограничителем изменения значения функции. Это позволяет решить проблему неограниченного изменения оценки за один шаг в классическом фильтре Калмана, оставаясь при этом достаточно простой.

Если  $b \geq |K(k)\Delta y|$ , то  $\min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\}$  и фильтр работает в обычном режиме как ФК (3.13). Если же  $b \leq |K(k)\Delta y|$ , то из этого следует, что произошел выброс и невязка умножается на понижающий коэффициент, равный  $\frac{b}{|K(k)\Delta y|}$ , что опять же приводит РФК к обычному виду (3.13).

### 3.5.2 Робастный фильтр Калмана для ситуации скачка

Алгоритм РФК для ситуации скачка согласно рекомендации [26] выглядит следующим образом:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + H(k)[I - H(k)K(k)\Delta y] \min \left\{ 1, \frac{b}{|I - H(k)K(k)\Delta y|} \right\}, \quad (3.40)$$

где  $b$  тот же аргумент, ограничивающий изменение значения функции, что и для РФК для ситуации выброса (3.39).

### 3.5.3 Гибридный робастный фильтр Калмана (ГРФК)

Очевидно, одновременная фильтрация возможна только с некоторой задержкой  $\Delta\tau$ . Это необходимо для принятия решения о типе выброса. Вследствие выброса скорей всего увидим один большой выброс (3.4), а вследствие скачка – подряд целую последовательность (3.7). ГРФК может быть реализован следующим образом [26]: РФК для ситуации скачка работает по умолчанию и всякий раз, когда ширина выброса больше окна наблюдения  $\Delta\tau$ , единожды используется процедура РФК для ситуации скачка.

## 3.6 Получение оценки случайного процесса с выбросами и скачками с помощью робастных фильтров

Чтобы сравнить алгоритмы фильтрации проведем моделирование оценки случайного процесса с помощью приведенных робастных алгоритмов фильтрации и фильтра Калмана. Результаты приведены на рис. 3.6-3.9. Сплошной линией со снежинками показан наблюдаемый процесс, сплошной – оценка ФК, штрихпунктирной с точками – РФК для ситуации с выбросами, штрихпунктирной – РФК для ситуации со скачками и штрихпунктирной со снежинками – ГРФК. На рис. 3.6 представлены результаты оценивания временного процесса без выбросов и скачков (3.3), из графика следует, что рассмотренные робастные алгоритмы, не теряют своей оптимальности по сравнению с ФК, во время оценивания процесса без выбросов и скачков. На рис. 3.7 представлены

результаты оценивания временного процесса с выбросами (3.4), из графика следует, что РФК для ситуации выброса и ГРФК позволяют игнорировать выбросы, что обеспечивает оптимальную оценку процесса. На рис. 3.8 представлены результаты оценивания временного процесса со скачками (3.4), из графика следует, что РФК для ситуации скачка и ГРФК позволяют быстро переключиться на новое значение задержки. В то время как РФК для ситуации выброса оказался не в состоянии отслеживать скачки. В заключение, на рис. 3.9 представлены результаты оценивания временного процесса со скачками и с выбросами, из графика следует, что, ГРФК позволяет получить оптимальную оценку в смешанной ситуации, в то время как остальные алгоритмы выполняют оценку недопустимо плохо.

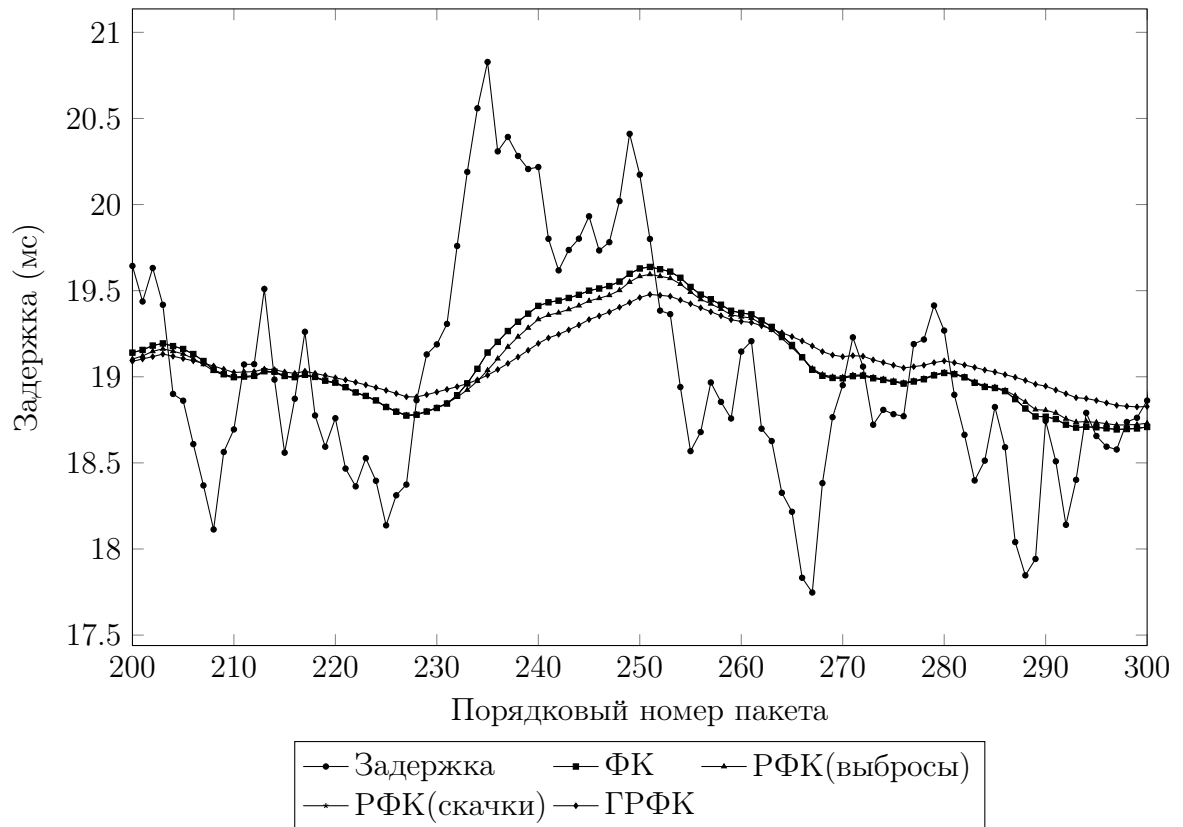


Рисунок 3.6: Моделирование фильтрации в идеальных условиях

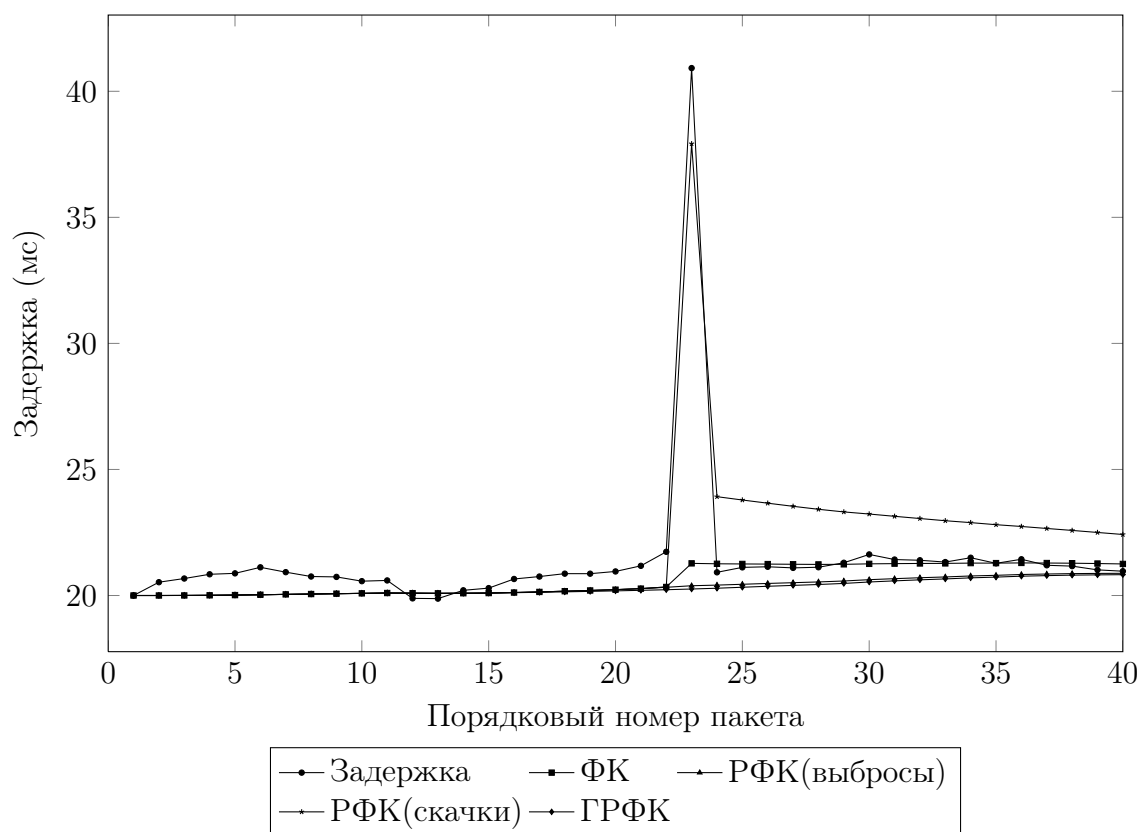


Рисунок 3.7: Моделирование фильтрации при выбросах

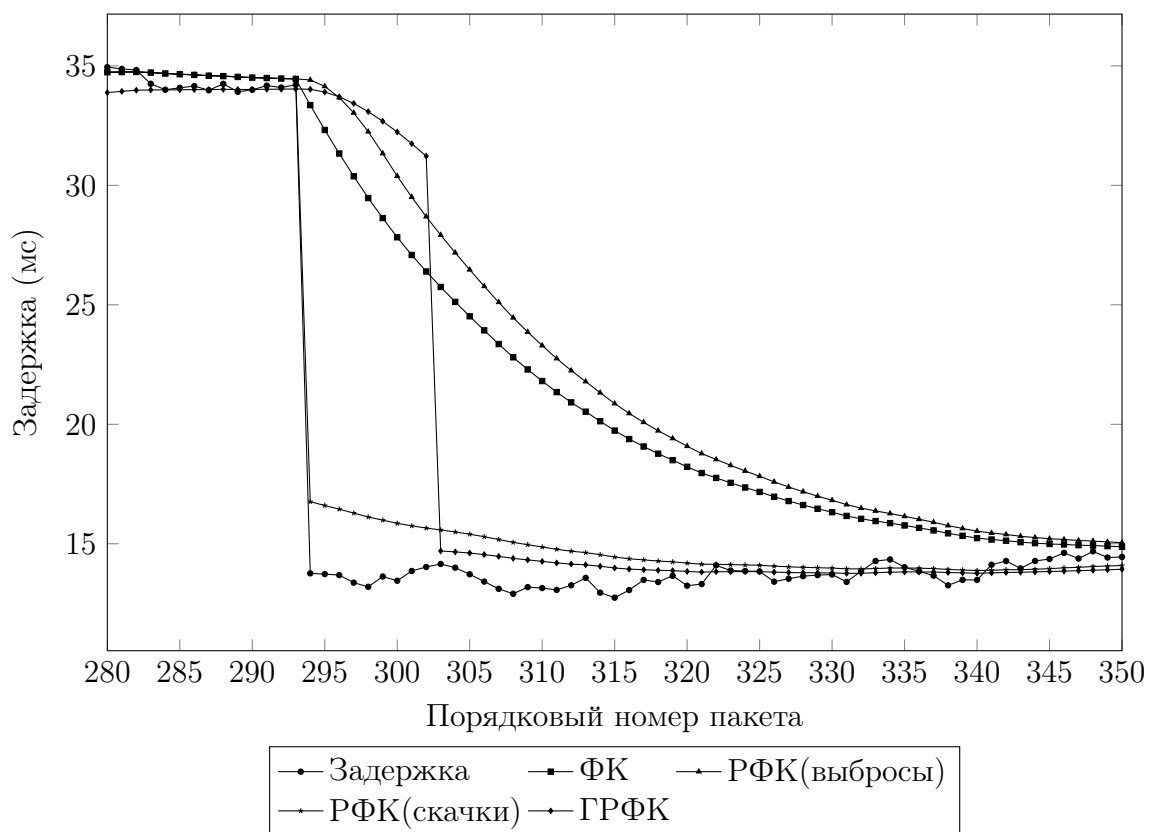


Рисунок 3.8: Моделирование фильтрации при скачках

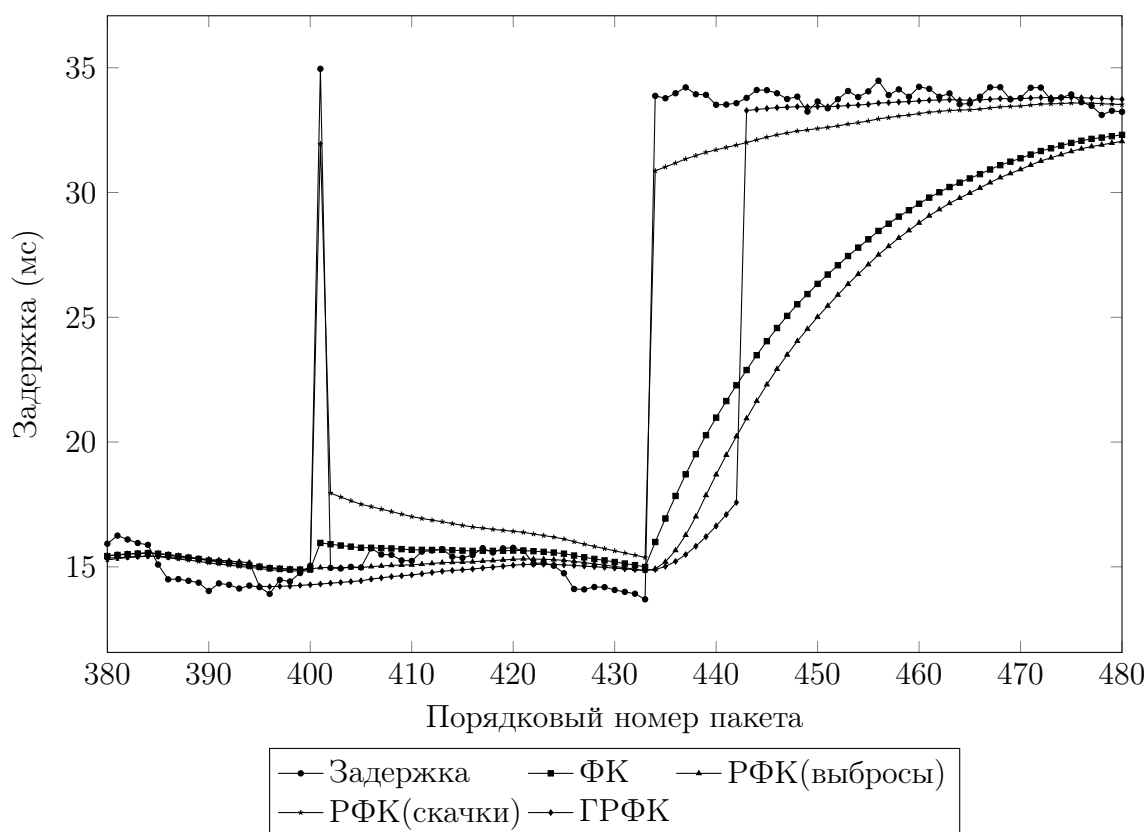


Рисунок 3.9: Моделирование фильтрации в смешанной ситуации скачков и выбросов

В процессе эксперимента был получен средний квадрат отклонений (СКО) оценки в различных ситуациях зашумленности (скачки и выбросы) с помощью рассмотренных фильтров и результаты приведены в табл. 3.3

Таблица 3.3: Типы и параметры буфера компенсации джиттера

Тип фильтра	Условия без и выбросов и скачков	Условия со скачками	Условия с выбросами	Условия с выбросами и скачками
ФК	6,48	6	<b>2,7</b>	26,6
РФК (для выбросов)	11,02	29,93	3,2	23,1
РФК (для скачков)	<b>2,15</b>	<b>0,85</b>	19,8	42
ГРФК	31,08	10,93	27,4	<b>14,4</b>

Жирным шрифтом выделены лучшие результаты оценок по сравнению с другими фильтрами для каждой шумовой ситуации. Как и предполагалось, для ситуации с выбросами и скачками наилучший результат показал гибридный робастный фильтр Калмана.



### 3.7 Синтез алгоритма буфера компенсатора джиттера

Размер буфер пересчитывается по формуле (3.10) только во время пауз между речевыми потоками, где  $\hat{x}(k)$  рассчитывается как:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) = & (1-\eta)\Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k)\Delta y \cdot \min\left\{1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|}\right\} + \eta\Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + \\ & + H(k)[I - H(k)K(k)\Delta y] \min\left\{1, \frac{b}{|I - H(k)K(k)\Delta y|}\right\},\end{aligned}\quad (3.41)$$

$$\eta = \begin{cases} 0, & \text{cond}(k) \\ 1, & \text{cond}(k), \end{cases}\quad (3.42)$$

где  $\text{cond}(k)$  - функция, которая вычисляется как:

```
1 def cond(arr, w, b): # язык программирования python2.7
2     try: # проверка, что количество элементов в массиве не меньше,
3         # чем окно наблюдения
4         arr[-w]
5     except IndexError:
6         return False
7     if arr[-w] < b:
8         return False
9     if w==1 and arr[-w] >= b:
10        return True
11    if k==1 and arr[-w] < b:
12        return False
13    else:
14        if cond(arr, w-1, b):
15            return True # обнаружен скачек задержки
16        else:
17            return False # не обнаружен скачек задержки
```

$$\nu^i(k) = \begin{cases} |\hat{x}(k) - x(k)|, & K(k)\Delta y \leq b \\ \nu(k-1), & K(k)\Delta y > b, \end{cases}\quad (3.43)$$

$$\hat{\nu}(k) = \alpha \cdot \hat{\nu}(k-1) + (1-\alpha) \cdot \nu(k). \quad (3.44)$$

### 3.8 Обзор концепции потоковых агентов

При передаче мультимедийной информации по комбинированным сетям с учетом различных механизмов распространения с различными технологиями, важным является выполнение требований по качеству предоставления мультимедийной информации пользователю. При этом важными являются такие характеристики: задержка, джиттер, число потерянных и поврежденных пакетов. Как показывает практика наибольшие потери качественных характеристик происходят на границах операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения. Возникает необходимость установки соответствующих агентов, обеспечивающих мониторинг на том или ином промежутке

сети. Вместе с тем от числа и места этих агентов существенно зависит качество мониторинга. Поточковый агент (ПА) это агент, который находится на базовой станции на пересечении проводной и беспроводной сети (рис. 3.10). Агент просматривает и распознает поток, исследуя заголовки RTP. Агент периодически посылает статистические и обратные сообщения в реальном времени на отправляющий сервер. Статистические обратные связи помогают отправителю проследить проводное состояние сети, что существенно для выполнения надлежащего контроля над перегрузками. С другой стороны, потоковый агент отправляет обратные сообщения в реальном времени, такие как подтверждение пакетов (ACKs), что говорит отправителю о прибытии каждого пакета к агенту корректно и вовремя.

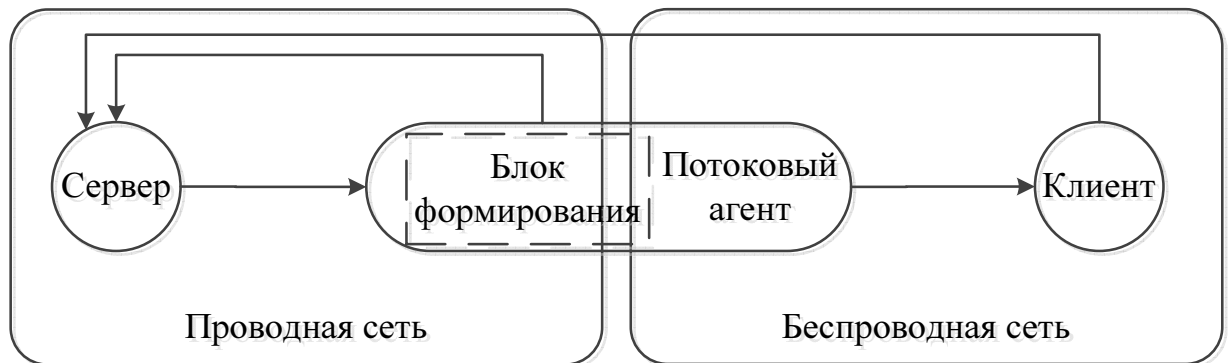


Рисунок 3.10: Использование ПА

Блок формирования находится перед ПА и ограничивает объем отправляемых сообщений, чтобы он не был больше чем полоса пропускания беспроводной сети, храня пакеты, ожидающие фрагментацию и передачу на более низкий уровень. Если состояние беспроводной сети плохое, то число повторных передач будет расти, заставляя увеличиваться очередь пакетов. Блок формирования реагирует на заполненность очереди, отбрасывая пакеты до прибытия их к агенту.

ПА позволяет выполнять множество функций для улучшения качества предоставления мультимедийных услуг:

- ПА предоставляет дополнительную обратную связь для контент сервера с границы между проводной и беспроводной частью сети [9].
- ПА дает возможность определить место пакетной ошибки [9], что позволяет корректно реагировать на потери и задержки в сети.
- Предварительное отбрасывание пакетов, которые передаются сверх возможностей беспроводной сети.
- Ретрансляция на прикладном уровне позволяет уменьшить пакетные искажения для приложений не восприимчивых к задержке [10, 11].
- Прямая коррекция ошибок позволяет уменьшить битовые искажения для приложений восприимчивых к задержке [10, 11].

Так как ПА будет находится на границе проводной и беспроводной сети, для улучшения качества предоставления услуг в сети LTE, воспользуемся концепцией потоковых агентов. Так же для компенсации джиттера пакетов услуг реального времени проведем разработку компенсатора джиттера, как одну из функций потокового агента, для сетей LTE.

### 3.9 Выводы ко **3** разделу

Наибольшие потери качественных характеристик происходят на границах различных типов сетей. Поэтому для мониторинга и улучшения качества услуг реального времени в сетях LTE, предложено воспользоваться концепцией потоковых агентов [9–11]. Также на основе этой концепции предложено разрабатывать метод компенсации джиттера, который будет реализован как одна из функций потокового агента.

# Литература

1. Ericsson. Ericsson mobility report June 2013 [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: <http://www.slideshare.net/Ericsson/ericsson-mobility-report-june-2013>. — Дата доступа: 06.08.2013.
2. OECD Digital Economy Papers (2012). Fixed and mobile networks: substitution, complementarity and convergence [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1787/5k91d4jwzg7b-en>. — Дата доступа: 25.07.2013.
3. Бабин А.И. Конвергенция стационарной и мобильной связи: взгляд в будущее // Фундаментальные исследования. № 6. С. 124–127.
4. Тихвинский В. О. Терентьев С.В. Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE технологии и архитектура. М.: Эко-Трендз, 2010. с. 284.
5. Ericsson. Press backgrounder VoLTE (January, 2013) [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: [http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/corpinfo/volte\\_backgrounder.pdf](http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/corpinfo/volte_backgrounder.pdf). — Дата доступа: 06.08.2013.
6. Ericsson. Voice and video calling over LTE - a step towards future telephony [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/WP-Voice-Video-Calling-LTE.pdf>. — Дата доступа: 06.08.2013.
7. GSMA IR.92. IMS Profile for Voice and SMS V4.0.
8. GSMA IR.94. IMS Profile for Conversational Video.
9. Gene Cheung Wai-Tian Tan T. Y. Double feedback streaming agent for real-time delivery of media over 3G wireless networks // IEEE transactions on multimedia. 2004. Vol. 6. P. 304–314.
10. Philip A. Chou Z. M. Rate-distortion optimized streaming of packetized media // IEEE transactions on multimedia. 2006. Vol. 8. P. 390–404.
11. Gene Cheung Wai-Tian Tan T. Y. Real-time video transport optimization using streaming agent over 3G wireless networks // IEEE transactions on multimedia. 2005. Vol. 7. P. 777–785.
12. Clark Alan. Analysis, measurement and modelling of Jitter // Telchemy Incorporated. 2003.
13. Клёкис Э. А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для помех, содержащих выбросы // Труды Академии наук Литовской ССР. Серия Б. 1985. С. 85–91.
14. Friis H. A Note on a Simple Transmission Formula // Proceedings of the IRE. 1946. Vol. 34. P. 254–256.

15. 3GPP R1-081483. Conveying MCS and TB size via PDCCH.
16. 3GPP TS 36.104 V8.0.0. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
17. Бекер Рэнди. Тестирование LTE-приемника: ключевые факторы ухудшения распространения сигнала // ИКС. 2010. № 01-02. С. 82–83.
18. Masreliez C. J. Approximate non- Gaussian filtering with linear state and observation relations // IEEE Transactions on Automatic Control. 1975. Vol. 20, no. 1. P. 107–110.
19. Masreliez C. J., Martin R. D. Robust Bayesian Estimation for the Linear Model and Robustifying the Kalman Filter // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. Vol. 22, no. 3. P. 361–371.
20. Ершов А. А., Липцер Р. Ш. Робастный фильтр Калмана в дискретном времени // Автоматика и телемеханика. 1978. № 3. С. 60–69.
21. Ершов А. А. Робастные алгоритмы фильтрации // Автоматика и телемеханика. 1978. № 7. С. 68–73.
22. Recommendation ITU-T G.1020 (11/03). Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks.
23. Sue B. Moon Jim Kurose Don Towsley. Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms // Multimedia Systems. 1998. № 6. С. 17–28.
24. Ramjee R. Kurose J. Towsley D. Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks // INFOCOM 94. 1994. Т. 2. С. 680–688.
25. Цыпкин Я. З., Поляк Б. Т. Огрубленный метод максимального правдоподобия // В кн.: Динамика систем. Математические методы теории колебаний. 1977. № 22. С. 22–46.
26. Ruckdeschel P. Optimally Robust Kalman Filtering // Fraunhofer ITWM. 2010.
27. Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC). LTE Simulator Documentation Release M6 [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: <http://iptechwiki.cttc.es/images/e/e3/Lte-sim-doc.pdf>. — Дата доступа: 25.07.2013.
28. 3GPP TS 36.213. E-UTRA Physical layer procedures.

# Список рисунков

1.1	Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [1]	4
1.2	Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [1]	4
1.3	Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [1]	5
1.4	Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [1]	6
1.5	Глобальный трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2010-2018 [1]	6
1.6	Глобальный трафик в фиксированных сетях, 2010-2018 [1]	7
1.7	Мобильный трафик данных разбитый по приложениям, 2010-2018 [1]	8
1.8	Взаимодействие сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE	12
1.9	Протоколы интерфейса S1 сети LTE	13
1.10	Эталонная архитектура базовой сети SAE	17
1.11	Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [5]	18
1.12	Архитектура IMS	20
1.13	CSFB [6]	21
1.14	VoLTE интерфейсы через пользовательский сетевой интерфейс (UNI) между устройством и сетью [6]	22
1.15	VoLTE (упрощенный вид) [6]	22
1.16	Регистрация и аутентификация устройства [6]	23
1.17	Канал для передачи сигнальной информации и канал для передачи речи [6]	23
2.1	Основные типы джиттера пакетной задержки	26
2.2	Пример перегрузки в локальной сети [12]	27
2.3	Пример перегрузки сети доступа [12]	27
2.4	Периодическое обновление таблицы маршрутизации без изменения маршрута [12]	28
2.5	Периодическое обновление таблицы маршрутизации при изменении маршрута [12]	28
2.6	Изменение задержки прибытия пакетов при хэндовере между базовыми станциями	30
2.7	Зависимость а) SINR б) MCS в) размера TBS г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и базовой станцией	32
2.8	Пример времени прибытия IP пакетов (синие маркеры), потерь пакетов (красные маркеры) и джиттера задержки в присутствии сильного всплеска внутрисистемных помех.	33
2.9	Схема моделирования влияния внутрисистемных помех в NS3	34
2.10	Зависимость а) SINR б) MCS в) размера TB г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и помеховой базовой станцией	34
2.11	Зависимость джиттера от расстояния до источника внутрисистемной помехи	35

2.12	Зависимость пакетных потерь от расстояния до источника внутрисистемной помехи . . . . .	35
2.13	Влияние замираний на а) SINR б) MCS с) размер ТВ d) скорость передачи нисходящего канала передачи при пешеходном сценарии (EPA 0-3 км/ч) . .	38
2.14	Влияние замираний на а) SINR б) MCS с) размер ТВ d) скорость передачи нисходящего канала передачи при автомобильном сценарии (EVA 30-60 км/ч)	39
2.15	Зависимость задержки пакетов от расстояние между абонентом и базовой станцией при замираниях . . . . .	40
2.16	Зависимость джиттера от расстояние между абонентом и базовой станцией при замираниях . . . . .	40
2.17	Зависимость пакетных потерь от расстояние между абонентом и базовой станцией при замираниях . . . . .	40
3.1	Моделирование ряда задержек а) с выбросами, б) со скачками . . . . .	44
3.2	Алгоритм обработки сетевых пакетов . . . . .	44
3.3	Задержка в пакетных сетях и сетевых элементах . . . . .	45
3.4	Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками а) с синхронной подстройкой б) с подстройкой первого пакета речевого потока . . . . .	47
3.5	Схема ФК . . . . .	50
3.6	Моделирование фильтрации в идеальных условиях . . . . .	54
3.7	Моделирование фильтрации при выбросах . . . . .	55
3.8	Моделирование фильтрации при скачках . . . . .	55
3.9	Моделирование фильтрации в смешанной ситуации скачков и выбросов . . .	56
3.10	Использование ПА . . . . .	58
A.1	Формирование транспортного блока (ТВ) в LTE . . . . .	66
B.1	Обзор имитационной модели LTE-EPC [27] . . . . .	69
B.2	Архитектура физического и канального уровня для модели UE [27] . . . . .	70
B.3	Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [27] . . . . .	70
B.4	Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [27] . . . . .	71
B.5	Поток данных нисходящей линии связи между интернетом и узлом UE [27] .	72
B.6	Поток данных восходящей линии связи между узлом UE и интернетом [27] .	74

# Список таблиц

1.1	Основные интерфейсы сети SAE . . . . .	16
2.1	Соотношение спектральной эффективности ( $\eta_i$ ) к индексу MCS ( $I_{MCS}$ ) . . . .	31
2.2	Расширенная А модель пешехода (ЕРА) [16] . . . . .	36
2.3	Расширенная А-модель при движении в автомобиле (ЕVА) [16] . . . . .	37
2.4	Расширенная модель для типовой городской застройки (ЕТU) [16] . . . . .	37
2.5	Профили задержки для технологии LTE [17] . . . . .	38
2.6	Параметры модели канала [17] . . . . .	39
3.1	Типы и параметры буфера компенсации джиттера . . . . .	46
3.2	Дисперсия ошибок оценивания в момент $k = 20$ . $\sigma_{OPT}^2$ - для оптимального фильтра (3.17)-(3.20), $\sigma_{LIN}^2$ - для линейного фильтра (3.21)-(3.24), $\sigma_{KAL}^2$ - для ФК, $\sigma_{RB1}^2$ - для алгоритма (3.25)-(3.28), $\sigma_{RB2}^2$ - для алгоритма (3.30)-(3.38) [13]	52
3.3	Типы и параметры буфера компенсации джиттера . . . . .	56
A.1	Модуляция и TBS индексы для PDSCH . . . . .	67
A.2	Размеры Транспортных блоков (TBS) . . . . .	68



# Приложение А

## Формирование транспортного блока в LTE

На рис. А.1 изображено формирование кадра в сети LTE. Предположим что мы рассматриваем нисходящее направление соединения и предположим что соединение между UE и eNB уже было установлено. Данные с верхих уровней сначала поступают на PDCP (Packet data compression protocol) уровень. Этот уровень выполняет сжатие и шифрование данных и если необходимо устанавливает проверку на целостность. Далее данные передаются на RLC (LTE Radio Link Control) уровень, который объединяет PDCP PDUs в один RLC PDU.

RLC уровень объединит или сегментирует данные, поступающие от верхнего уровня в правильный размер блока и направит его на уровень MAC со своим собственным заголовком. Теперь MAC уровень выбирает схему модуляции и кодирования настраиваемую на физическом уровне. Эти данные включаются в транспортный блок, который должен быть передан в 1 мс подкадре.

Теперь, рассмотрим количество бит, которые передаются в этом 1 мс интервале. Это зависит от MCS (схемы модуляции и кодирования) и количество ресурсных блоков назначены UE. Мы должны обратиться к таблице 7.1.7.1-1 и таблице 7.1.7.2.1-1 от [28].

Давайте предположим, что eNB назначает MCS индекс 20 и 2 блока ресурсов (RB), на основании CQI и другую информацию для передачи по нисходящей линии связи PDSCH (Physical Downlink Control Channel). Тогда необходимо взять значение TBS индекса равным 18, как показано в табл. А.1.

Узнав значение индекса TBS нам нужно обратиться к табл. А.2, чтобы найти точный размер транспортного блока (только часть таблицы показан здесь в то время как для полного диапазона значений необходимо обратиться к документу [28]).

Из табл. А.2 размер транспортного блока равен 776 бит для  $I_{TBS} = 18$  и  $N_{PRB} = 2$ . Проще говоря, кодовая скорость может быть определена тем, насколько эффективно данные могут быть переданы в 1 мс транспортном блоке или, другими словами, она представляет собой отношение фактического количества бит передаваемой полезной информации к максимальному количеству бит, которое может передаваться в одном транспортном блоке.

$$R_{effective} = \frac{TBS + CRC}{RE \times Q_m}, \quad (A.1)$$

где  $TBS$  - размер транспортного блока взятый из табл. А.2,  $CRC$  - циклический избыточный код,  $RE$  - ресурсы выделенные или PDSCH или PUSCH,  $Q_m$  - используемая схема модуляции, где  $\{2, 4, 6\}$  соответствуют QPSK, 16QAM и 64QAM.

Пока нам известно  $TBS$ ,  $CRC$ ,  $Q_m$  и необходимо вычислить  $RE$ . В нашем случае, предположим, что 10%  $RE$  предназначены для каналов управления (PDCCH и PHICH), то:

$$TBS = 776,$$

$$CRC = 24,$$

$$RE = 2(RB) \times 12(\text{поднесущих}) \times 7(\text{предположим 7 OFDM символа}) \times 2(\text{слота на кадр}) \times 0.9(\text{ранее предположенные 10\% на управление}) = 302,$$

$$Q_m = 6.$$

$$\text{Таким образом } R_{effective} = \frac{776+24}{302 \times 6} = 0.4.$$

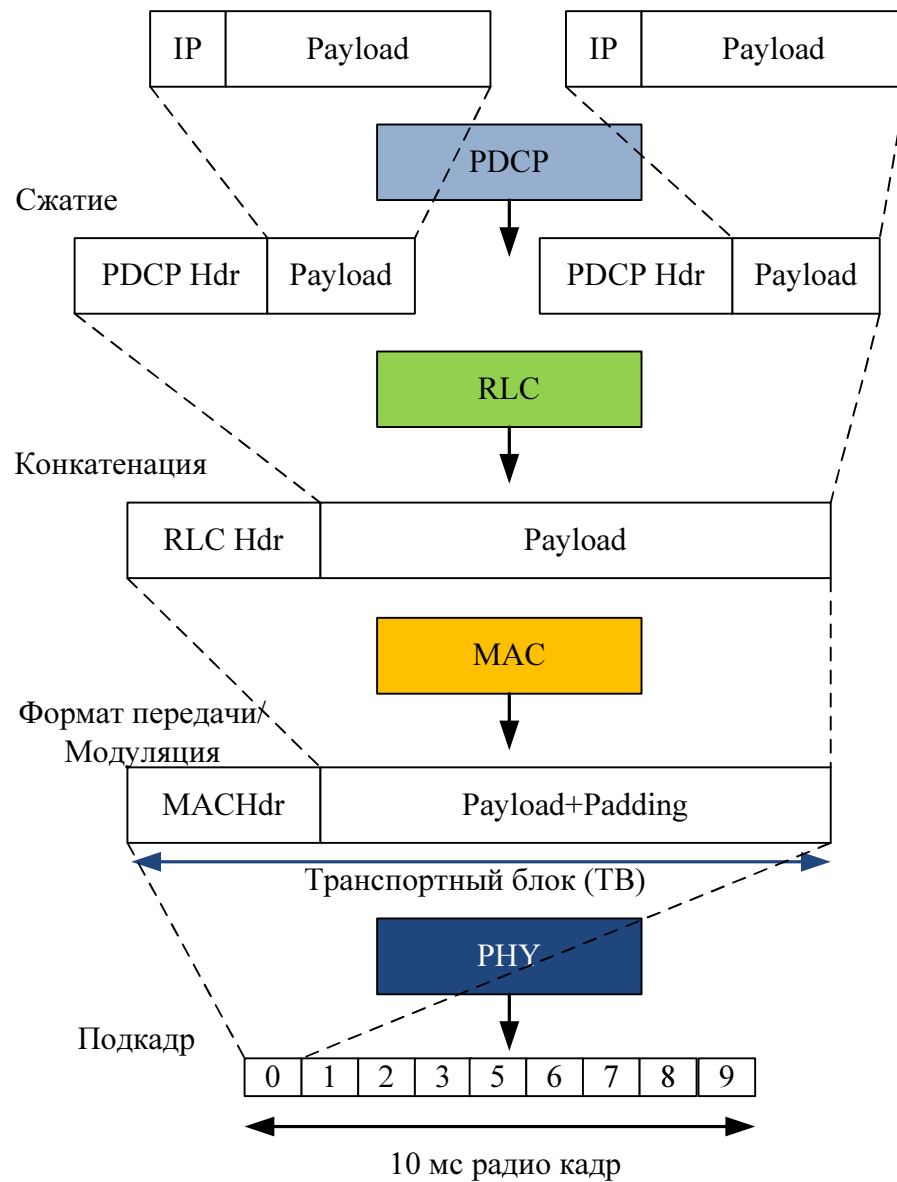


Рисунок А.1: Формирование транспортного блока (ТВ) в LTE

Таблица А.1: Модуляция и TBS индексы для PDSCH

МCS индекс ( $I_{MCS}$ )	Порядок модуляции ( $Qm$ )	TBS индекс ( $I_{TBS}$ )
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	reserved
30	4	
31	6	

Таблица А.2: Размеры Транспортных блоков (TBS)

$I_{TBS}$	$N_{PRB}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	16	32	56	88	120	152	176	208	224	256
1	24	56	88	144	176	208	224	256	328	344
2	32	72	144	176	208	256	296	328	376	424
3	40	104	176	208	256	328	392	440	504	568
4	56	120	208	256	328	408	488	552	632	696
5	72	144	224	328	424	504	600	680	776	872
6	328	176	256	392	504	600	712	808	936	1032
7	104	224	328	472	584	712	840	968	1096	1224
8	120	256	392	536	680	808	968	1096	1256	1384
9	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1224	1384	1544	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024	2280
13	224	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280	2536
14	256	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600	2856
15	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728	3112
16	328	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984	3240
17	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240	3624
18	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624	4008
19	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880	4264
20	440	904	1384	1864	2344	2792	3240	3752	4136	4584

## Приложение В

# Архитектура имитационной модели LTE в NS3

Обзор имитационной модели LTE-EPC изображен на рис. В.1. Состоит из двух основных компонентов:

- Модель LTE. Эта модель включает LTE радио стек протоколов (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Эти объекты полностью находятся на UE и eNB узлах.
- Модель EPC. Эта модель включает в себя основные сетевые интерфейсы, протоколы и объекты. Эти объекты и протоколы находятся на S-GW, P-GW и MME узлах и частично на eNB узлах.

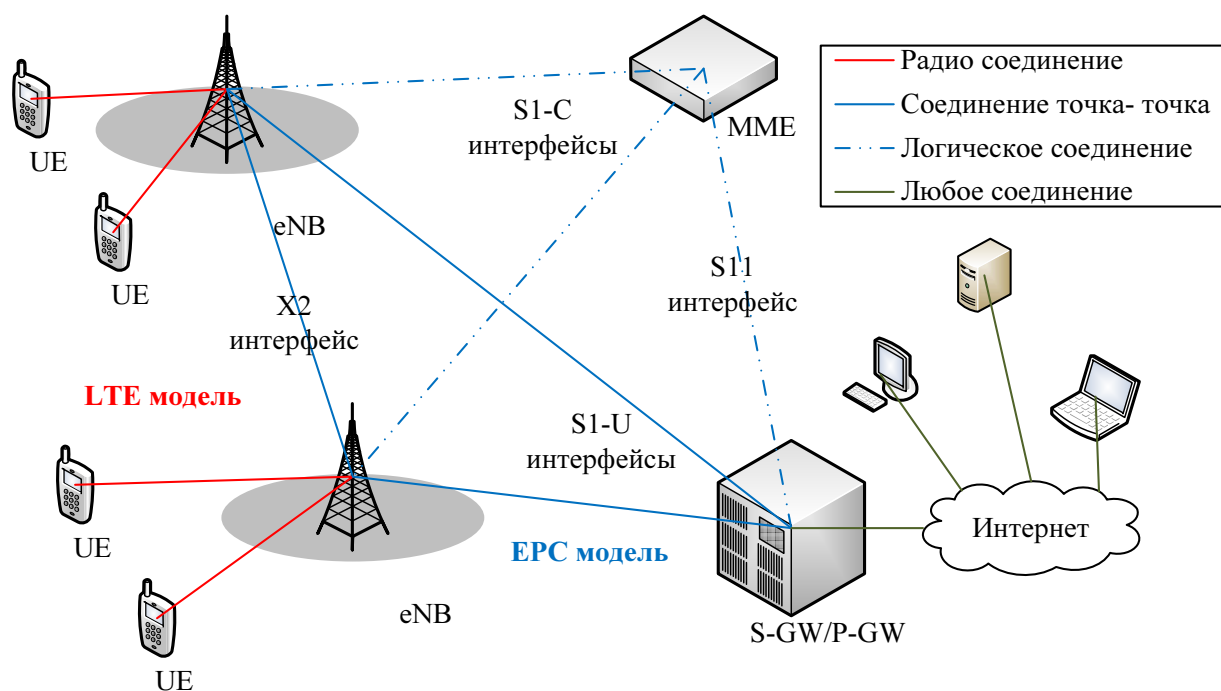


Рисунок В.1: Обзор имитационной модели LTE-EPC [27]

## В.1 Архитектура LTE модели

LTE модель была разработана для поддержки оценки следующих аспектов системы LTE:

- Управление радио ресурсами.
- Пакетная обработка на основе QoS.
- Внутрисистемные помехи между сотами.
- Динамический спектральный доступ

Архитектура физического и канального уровня для модели узла UE представлена на рис. B.2 и для модели узла eNB представлена на рис B.3.

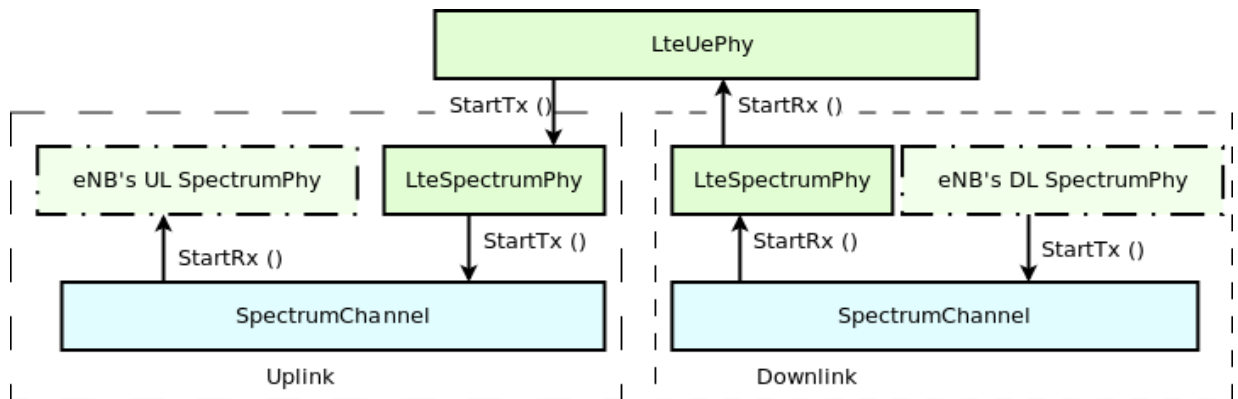


Рисунок B.2: Архитектура физического и канального уровня для модели UE [27]

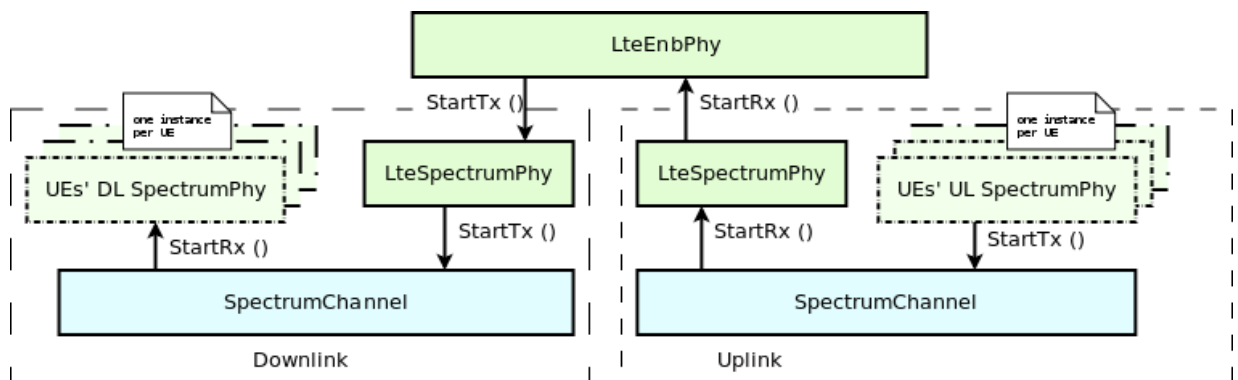


Рисунок B.3: Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [27]

## B.2 Архитектура EPC модели

Модели EPC обеспечивает средства для моделирования сквозного IP соединения по верх LTE модели. В частности, поддерживает соединение нескольких UE с интернетом через сеть радиодоступа с несколькими узлами eNB, подключенными к одному SGW/PGW узлу. Эта топология сети изображен на рис B.4. Основное внимание в модели EPC в настоящее время сфокусировано на плоскости данных EPC. Чтобы понять архитектуру этой модели, мы сначала посмотрим на рис B.4, где представлен сквозной LTE-EPC стек протоколов таким образом каким это реализовано в симуляторе. Из рисунка видно, что самые большие упрощения введены в модели EPC для плоскости данных, является включение функций SGW и PGW в один узел SGW / PGW, который устраняет необходимость S5 или S8 интерфейсов, определенных в 3GPP . С другой стороны, все уровни протокола S1-U и протокола радиосвязи LTE стек, указанные в 3GPP, присутствуют.

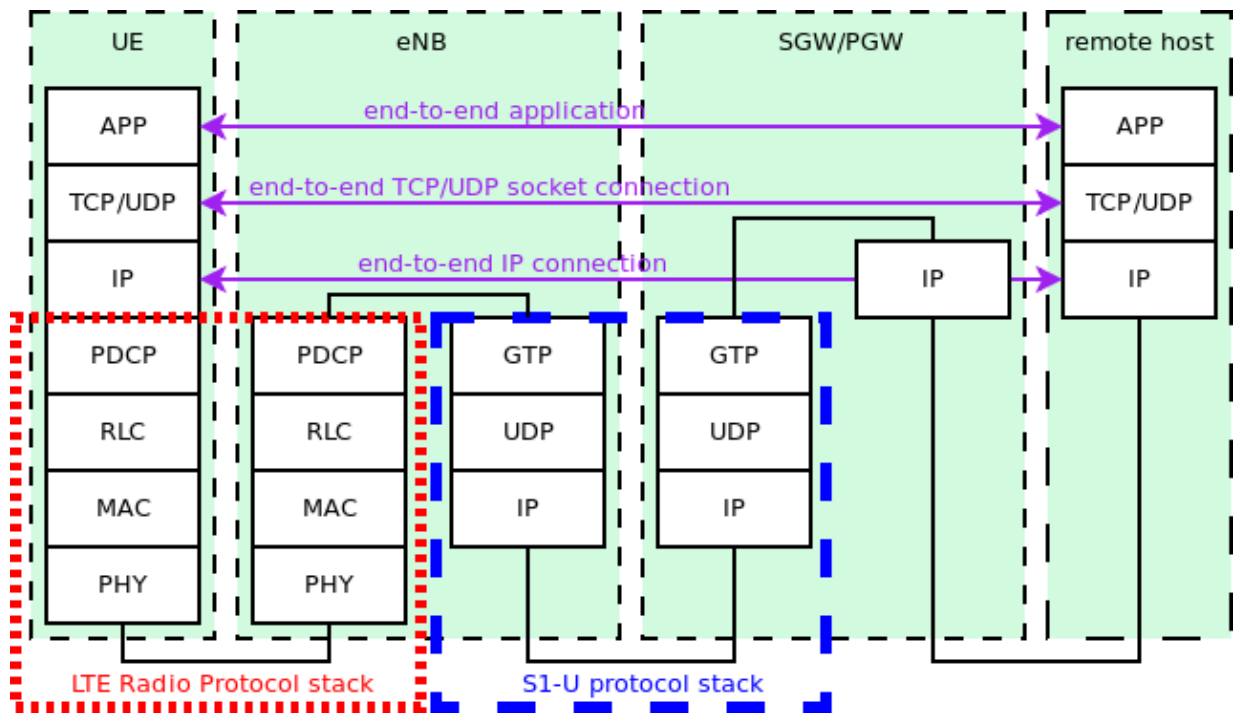


Рисунок В.4: Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [27]

Как показано на рисунке, существует два различных уровня IP-сети. Первый это сквозной уровень, который обеспечивает сквозное подключение к пользователям; этот слой включает UE, PGW и удаленный хост (в том числе возможные интернет маршрутизаторы и хосты между ними), но не включать eNB. По умолчанию, UE присваивается публичный адрес IPv4 из 7.0.0.0/8 сети и PGW присваивается адрес 7.0.0.1, который используется всеми UE, в качестве шлюза для доступа в Интернет. Второй слой IP сетей является ePC локальной сетью. Которая включает в себя все узлы ENB и SGW/PGW узел. Эта сеть реализован в виде набора соединений точка-точка, которые соединяют каждый eNB с SGW/PGW узлом, таким образом, SGW/PGW имеет набор устройств точка-точка, каждый из которых обеспечивает подключение к другому eNB. По умолчанию, подсети 10.x.y.z/30 присваивается каждому соединению точка-точка. Как указано в 3GPP, сквозные IP соединения являются туннелями через локальную EPC IP сеть с использованием GTP/UDP/IP. Далее рассмотрим как это туннелирование реализовано в модели EPC. Объяснение сделано путем обсуждения сквозного потока пакетов данных.

Для начала, рассмотрим случай нисходящей линии связи, который изображен на рис В.5. IPv4 пакеты нисходящей линии связи генерируются от общего удаленного хоста и адресуются к одному из устройств UE. Интернет маршрутизация будет заботиться о пересылке пакета на публичный сетевой интерфейс NetDevice узла SGW/PGW, который подключен к Интернету (этот интерфейс Gi в соответствии с 3GPP терминологии). SGW/PGW имеет сетевой интерфейс VirtualNetDevice которому присваивается IP-адрес шлюза для подсети UE, следовательно, правило статической маршрутизации приведет к тому, что входящий пакет из Интернета будут проходить через VirtualNetDevice. Это сетевое устройство начинает GTP/UDP/IP туннельную процедуру, путем пересылки пакетов на выделенное приложение на узле SGW/PGW, которое называется EpcSgwPg-wApplication. Это приложение выполняет следующие операции:

1. Определяет eNB узел, к которому присоединен UE, смотря на IP-адрес назначения (который является адресом UE).

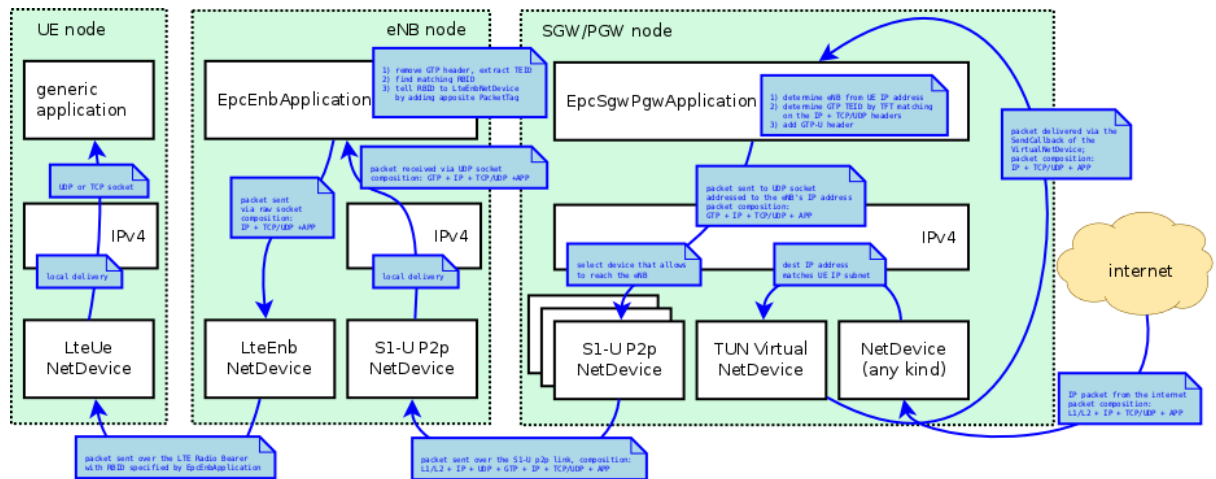


Рисунок В.5: Поток данных нисходящей линии связи между интернетом и узлом UE [27]

2. Классифицирует пакеты, используя шаблоны транспортных потоков (TFT - Traffic Flow Templates), чтобы идентифицировать, какому ePS каналу он принадлежит. ePS каналы имеют карту соответствия к S1-U каналам, так что эта операция возвращает идентификатор TEID (GTP-U Tunnel Endpoint Identifier), к которому принадлежит данный пакет.
3. Добавляет соответствующие GTP-U-заголовки к пакету.
4. Отправляет пакет через UDP-сокеты к S1-U P2P NetDevice, адресуя к eNB, с которым соединен UE.

Как следствие, пакет со сквозным IP заголовком с добавленными IP, UDP и GTP заголовками отправляется по S1 соединению к eNB, где он принимается и доставляется локально (в качестве адреса назначения подставляется приватный адрес eNB). Локальный процесс доставки отправит пакет через UDP-сокеты к выделенному приложению EpcEnbApplication. Это приложение выполняет следующие операции:

1. Удаляет заголовок GTP и извлекает TEID, который содержится в нем.
2. Используя на взаимно-однозначное соответствие между S1-U каналами и радио каналами (который является 3GPP требованием), определяет идентификатор радиоканала (RBID - Radio Bearer ID), к которому принадлежит данный пакет.
3. Записывает RBID в выделенном теге под названием LteRadioBearerTag, который добавляется к пакету.
4. Пересылает пакет к приложению LteEnbNetDevice eNB узла через raw-сокеты.

Следует отметить, что в этот момент, внешним заголовком пакета является сквозной IP заголовок, поскольку IP/UDP/GTP заголовки S1 стека протоколов уже были удалены. После приема пакета от EpcEnbApplication, LteEnbNetDevice будет извлекать RBID из LteRadioBearerTag, и на основе RBID определит экземпляр радиоканала (и соответствующие PDCP и RLC экземпляры протокола), которые затем используются для передачи пакета к UE через радиointерфейс LTE. В конце, приложение LteUeNetDevice узла UE получит пакет и доставит его локально через IP стек протоколов, которые в свою очередь доставят его к приложению на узле UE, которое является конечной точкой нисходящей линии связи.



В случае восходящего соединения, показанном на рис. B.6, IP пакеты создаются приложением внутри UE, и передается локальным стеком протоколов TCP / IP к приложению LteUeNetDevice узла UE. LteUeNetDevice затем выполняет следующие операции:

1. Классифицирует пакет, используя TFT, и определяет радиоканал, к которому принадлежит пакет (и соответствующие RBID).
2. Определяет соответствующий экземпляр протокола PDCP, который является точкой входа LTE радио стеком протоколов для этого пакета.
3. Посылает пакет к eNB через LTE радио стек протоколов.

eNB принимает пакет через его сетевой интерфейс LteEnbNetDevice. Поскольку существует один экземпляр протокола PDCP и RLC для каждого радиоканала, LteEnbNetDevice способен определить RBID пакета. Это RBID затем записывается в LteRadioBearerTag, который добавляется к пакету. LteEnbNetDevice затем пересылает пакет EpcEnbApplication через сокет пакета. При получении пакета EpcEnbApplication выполняет следующие операции:

1. Извлекает RBID из тега LteRadioBearerTag в пакете.
2. Определяет соответствующий EPS канал и GTP-U TEID за счет использования на взаимно-однозначное соответствие между S1-U каналами и радиоканалами.
3. Добавляет GTP-U заголовок пакета, в том числе TEID, который был определен ранее.
4. Посылает пакет на SGW/PGW узел через UDP сокет подключенный к S1-U сетевому точка-точка устройству.

В этот момент пакет содержит S1-U IP, UDP и GTP заголовки в дополнение к первоначальному сквозному IP заголовку. Когда пакет поступает на соответствующий S1-U P2P NetDevice на узле SGW/PGW, он доставляется локально. Локальный процесс доставки направляет пакет к EpcSgwPgwApplication через соответствующий UDP сокет. EpcSgwPgwApplication затем удаляет заголовок GTP и пересылает пакет VirtualNetDevice. На данный момент, внешним заголовком пакета является сквозной IP заголовок. Следовательно, если адрес назначения в этот заголовке является удаленным узлом в интернете, пакет отправляется в интернет через соответствующие сетевое устройство NetDevice на узле SGW/PGW. В случае, если пакет адресован другому UE, IP стек SGW/PGW перенаправит пакет снова к сетевому устройству VirtualNetDevice, и пакет будет проходить через процесс доставки через нисходящее соединение для того, чтобы достичь пункта назначения UE.

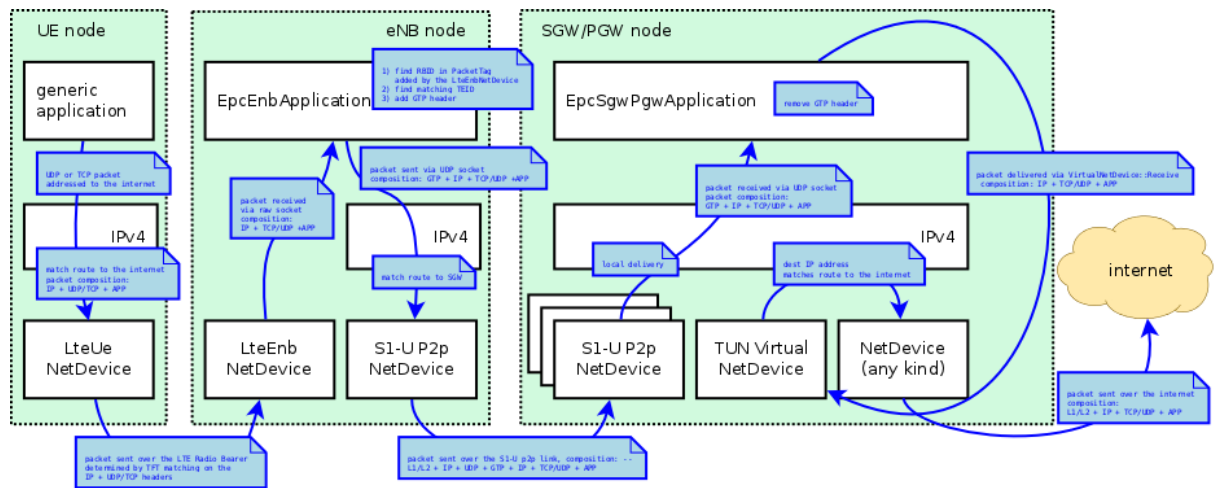


Рисунок В.6: Поток данных восходящей линии связи между узлом UE и интернетом [27]

## Приложение С

### Моделирование изменения задержки в сети LTE при хэндовере абонента

## Приложение D

Моделирование изменения задержки в сети LTE при изменении расстояния между абонентом и базовой станцией