

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

КОБРИН АРТЕМ ВИТАЛЬЕВИЧ

УДК 621.391

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ В  
ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВОГО  
АГЕНТА НА СТЫКЕ МОБИЛЬНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ СЕТЕЙ

Специальность: 05.12.02 - Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание учетной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Поповский Владимир Владимирович  
доктор технических наук

Научный консультант  
Ощепков Михаил Юрьевич  
доцент кафедры ТКС

Харьков - 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел 1. Анализ методов повышения качества передачи потокового трафика на границе проводной и беспроводной сети	7
1.1. Обзор тенденции развития телекоммуникационных технологий	7
1.2. Анализ предпосылок предоставления услуг передачи речи и видео по верх сетей LTE . . . . .	19
1.3. Анализ требований QoS для предоставления сервисов передачи данных, голоса и видео . . . . .	22
1.4. Анализ работы буфера компенсации джиттера и рабочих характеристик применительно к передаче потокового трафика через IP сети . . . . .	24
1.5. Систематизация типов, параметров и моделей буферов компенсации джиттера . . . . .	28
1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера. .	31
1.6.1. Модель фиксированного буфера компенсации джиттера.	31
1.6.2. Модель адаптивного буфера компенсации джиттера.	32
1.7. Постановка научной задачи и формулировка частных задач исследования . . . . .	33
1.8. Выводы по 1 разделу . . . . .	34
Литература	36

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Согласно прогнозу [1] 60% людей к концу 2018 года будут иметь покрытие LTE. Как мы видим беспроводные технологии все больше внедряются в наш повседневный мир. Такие технологии как WiFi, Bluetooth, GSM стали уже неотъемлемой частью нашей жизни. Современные перспективные мобильные сети развиваются в направлении внедрения следующего поколения NGN (Next Generation Network). На данный момент основными представителями таких сетей являются WiMAX и LTE сети.

Основными преимуществами использования стандарта LTE является то, что сети построенные на его основе, оптимизированы для передачи данных и реализованы в виде коммутации пакетов. LTE не включает в себя домен коммутации пакетов для предоставления услуг передачи речи.

Спрос на услуги мобильного широкополосного доступа растет и операторы запускают высоко скоростные сети на основе LTE. Тем не менее, услуги передачи речи приносят около 70% общего дохода операторов и ясно, что эта функциональность должна быть реализована и в сетях LTE.

Сети LTE работают на стыке проводной и беспроводной сети. Практика показывает, что основные потери качественных характеристик обслуживания (QoS) происходят на границе различных сред передачи. При передачи мультимедийной информации по комбинированным сетям с различными технологиями передачи данных, важным является выполнение требований к качеству предоставления мультимедийной информации пользователю. При этом для трафика реального времени такого, как трафик VoIP и видео звонков, важными являются такие сетевые характеристики: задержка, число потерянных и поврежденных пакетов и джиттер задержки. Согласно [?] наибольший вклад в задержку и потери пакетов вносит

не оптимальный буфер компенсации джиттера (буфер воспроизведения). До 40% допустимой задержки, определенной в рекомендации [2], может составлять задержка буфера компенсации джиттера. Еще одной проблемой является то, что оконечные устройства могут компенсировать ограниченный размер джиттера (порядка 50 мс).

Следовательно, актуальной является научная задача, которая состоит в разработке методов мониторинга текущего сетевого метода предварительной компенсации джиттера на границах проводной и беспроводной сети.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Диссертационная работа связана с реализацией основных положений «Концепции национальной информационной политики», «Концепции Национальной программы информатизации», «Основных принципов развития информационного общества в Украине на 2007 - 2015 года» и «Концепции конвергенции телефонных сетей и сетей с пакетной коммутацией в Украине». Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы №261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління», в которых автор выступал соисполнителем.

Цель и задача исследования состоит в повышении качества обслуживания в гибридных сетях, которые содержат мобильную и стационарную компоненту.

В ходе решения научной задачи сформулированы и решены частные задачи исследования:

1. Провести анализ статистических характеристик джиттера в стационарных и беспроводных сетях.
2. Определить основные механизмы влияния на параметры джиттера.
3. Определить статистические нестационарности джиттера и произвести классификацию нестационарных явлений задержки.
4. Обосновать и разработать математическую модель джиттера, позволяющую отображать динамику изменений состояний.

5. Разработать алгоритмы статистической оценки параметров джиттера и управления с целью его минимизации.
6. Разработать практические предложения по выбору параметров и мест установки агента минимизации джиттера на границе стационарной и мобильной сети.

Объект исследования: процесс передачи трафика реального времени через гибридные сети.

Предмет исследования: математическая модель джиттера, модель буфера компенсации джиттера.

Методы исследования. В ходе разработки алгоритма статистической оценки параметров джиттера был использован робастный фильтр Калмана. Для разработки математической модели джиттера был использован аппарат теории выбросов. В ходе проведения оценки эффективности использовались методы имитационного моделирования.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые проведен анализ условий возникновения джиттера в гибридных сетях, который включает анализ основных причин в стационарных и мобильных сетях .
2. Разработана математическая модель задержки прибытия пакетов, научная новизна которой состоит в том, что в ней в отличие от известных моделей, учитывают различные флуктуации задержки (скачки и выбросы), которые не соответствуют нормальному распределению.
3. Разработан инвариантный алгоритм буфера компенсации джиттера, который позволяет решить ряд проблем возникающих, когда процесс пакетной задержки отклоняется от нормального распределения и имеет выбросы и скачки.
4. Предложены рекомендации по практическому применению буфера компенсации джиттера в сетях LTE на основе потоковых агентов.

Практическое значение полученных результатов. Полученные научные результаты имеют практическое назначение, поскольку они ориентированы на дальнейшее внедрение в реальные системы связи, в частности, в диссертационных исследованиях предложен метод предварительной компенсации джиттера на границе проводной и беспроводной сети на основе потовых агентов. Кроме того, результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы №261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління».

Личный вклад соискателя. В работах, выполненных в соавторстве, лично Кобрину А. В. принадлежат следующие результаты:

В работе [3] автору принадлежит обзор алгоритма оценки сетевой задержки.

В работе [4] автору принадлежит разработка алгоритма оценки джиттера на основе рекурсивных фильтров.

В работе [5] автору принадлежит анализ эффективности использования робастного фильтра Калмана для оценки процесса задержки.

Апробация результатов диссертации проводилась в ходе XXX научно-технических конференций и форумов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в статьях [3–7] в специализированных научных изданиях утвержденных в ВАК Украины, Кроме того, материалы диссертации опубликованы в XXX тезисах доклада на научно-технических конференциях и форумах [XXX–XXX] и в одном отчете по НИР.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА НА ГРАНИЦЕ ПРОВОДНОЙ И БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

#### 1.1. Обзор тенденции развития телекоммуникационных технологий

Все больше и больше данных передаются через сети, что является стимулом исследований для развития сетей следующего поколения. Сети следующего поколения обычно определяют, как изменение ядра сети с коммутацией каналов на сеть с коммутацией пакетов. Давайте немного рассмотрим основы телекоммуникационных сетей, а за тем взглянем на основные особенности сетей следующего поколения (NGN).

Телекоммуникационные сети были изначально разработаны для голосового трафика. Люди звонят друг другу и при этом выделяется целый канал связи от одного телефона к другому. Коммутаторы определяют какой канал должен быть создан и выделяют его на время осуществления звонка. Этот тип сети обычно называют сеть с коммутацией каналов.

Интернет основан на IP технологии так, что по своей природе является сетью с коммутацией пакетов. Сети с коммутацией пакетов и сети с коммутацией каналов различны. В сети с коммутацией каналов, соединение между двумя узлами удерживается на протяжении всего разговора и передача данных другими пользователями через тот же канал не возможна, даже если по линии ничего не передается. В сети с коммутацией пакетов, нет никакой необходимости, устанавливать постоянное соединение и пакеты могут передаваться между другими пользователями через те же самые каналы связи.

Преимуществом сети с коммутацией каналов является встроенное качество обслуживания (QoS) так, как коммутатор не будет использовать занятую линию пока вызов не будет завершен. Недостатком является то, что это неэффективно, когда нет постоянного потока передаваемых данных. В противоположность этому, сети с коммутацией пакетов (традиционно) имеют большую пропускную способность.

Одним из путей решения проблемы с сетями с коммутацией пакетов и каналов является запуск двух различных сетей. Более старый тип сети с коммутацией каналов только для передачи голоса и более современная сеть с коммутацией пакетов для передачи всех других типов данных. Это довольно дорого так, как в основном необходимо сохранить две отдельные инфраструктуры. Очевидным решением, которое можно реализовать на основе NGN, является запуск только одной сети.

Отличительными чертами NGN является: обеспечение предоставления неограниченного набора услуг с гибкими возможностями по их управлению, персонализации и созданию новых услуг за счет унификации сетевых решений, предполагающая реализацию универсальной транспортной сети с распределенной коммуникацией, вынесение функций предоставления услуг в оконечные сетевые узлы и интеграция с традиционными сетями связи.

Для решения возложенных функций сети NGN, как правило, строится по иерархическому принципу, в соответствии с которым можно выделить следующие уровни ее архитектуры (рис. 1.1):

- Уровень управления услугами (четвертый уровень), который включает ресурс в виде услуг по доступу пользователей к информации.
- Уровень сетевого контроля и управления (третий уровень), основной функцией которой является управление сетевыми ресурсами, к которым относятся канальные, буферные и информационные.
- Транспортный уровень (второй уровень), где реализованы функции транспортной сети, назначением которой является перенос потоков



данных (информации) между пользователями.

- Уровень доступа (первый уровень) обеспечивает доступ и агрегирование потоков от пользователей различных типов сетей.
- Уровень терминального оборудования (нулевой уровень), с помощью которого пользователь использует посредством сети доступа ресурс транспортного уровня.

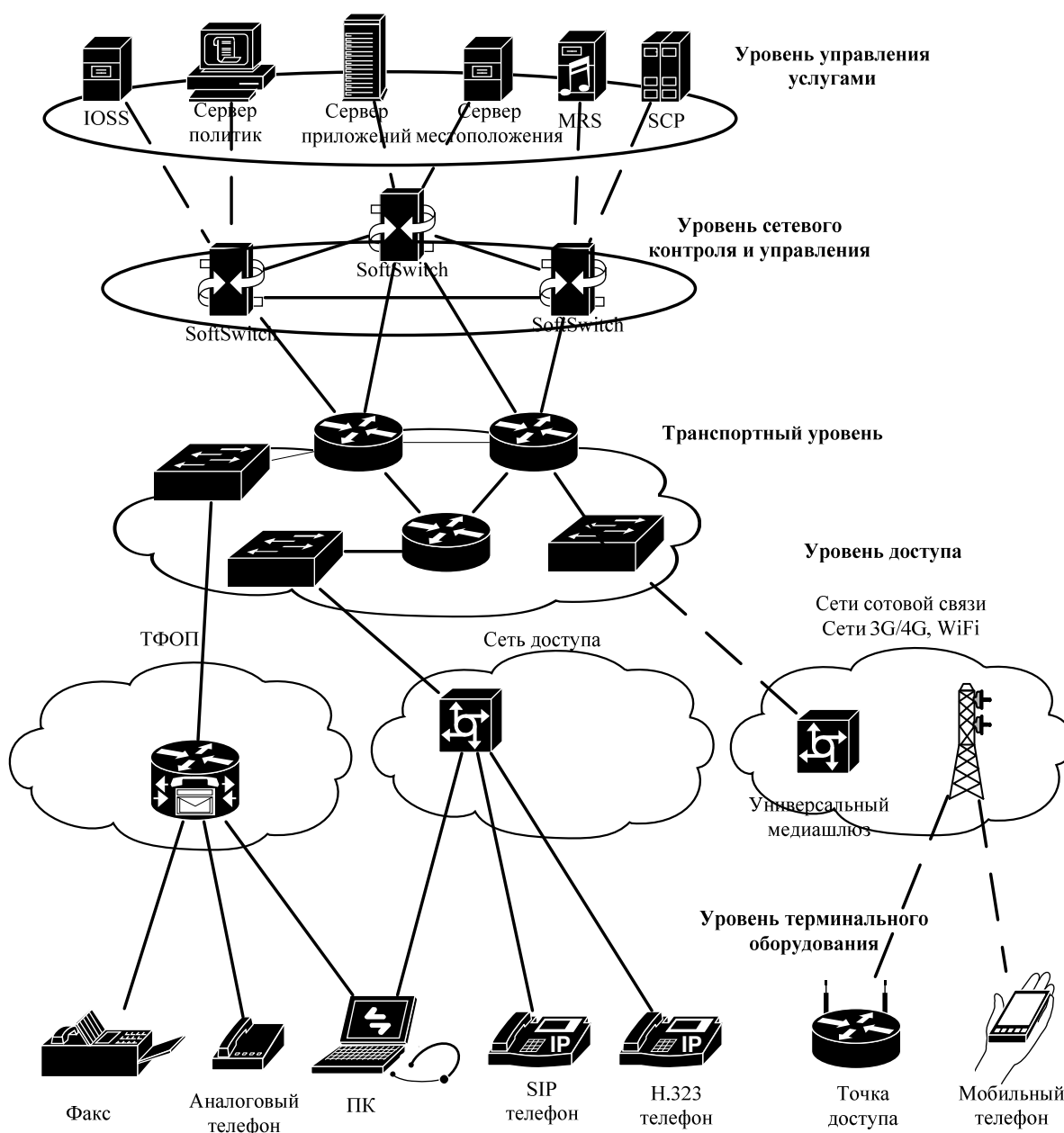


Рис. 1.1. Архитектура сети NGN

Как было сказано ранее, сети следующего поколения являются сетями с коммутацией пакетов и используют протокол IP на сетевом уровне. В центре сети используется система IP мультимедиа (IMS), которая обеспечивает независимую платформу, через которую сервисы доступа такие как 4G могут использовать сеть. Принципиальная идея в том, чтобы предоставить непрерывную связь: пользователи могут подключаться к сети в любом месте и в любое время. Ключевым компонентом этого является протокол установки сеансов (SIP). Он отличается от других протоколов, таких как H.323 тем, что он спроектирован инженерным советом интернета (IETF) специально для IP. SIP протокол позволил упростить интеграцию таких приложений, как IPTV, VoIP и обмен сообщениями с IP сетями. Сети четвертого поколения, такие как LTE и WiMAX, работают в направлении принятия NGN. Причины этого являются простыми:

1. LTE и WiMAX были построены с самого начала с использованием в качестве ядра IP сети.
2. LTE и WiMAX не имеют обычных голосовых служб.
3. Для LTE и WiMAX голосовой трафик это тоже трафик данных.

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. 1.2). 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 превысит число абонентов фиксированной широкополосной связи (рис. 1.3). 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.

На рис. 1.4 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 последних лет прогнозного периода. Это связано с тем что новые менее обеспеченные пользователи, вероятно будут использовать самые дешевые

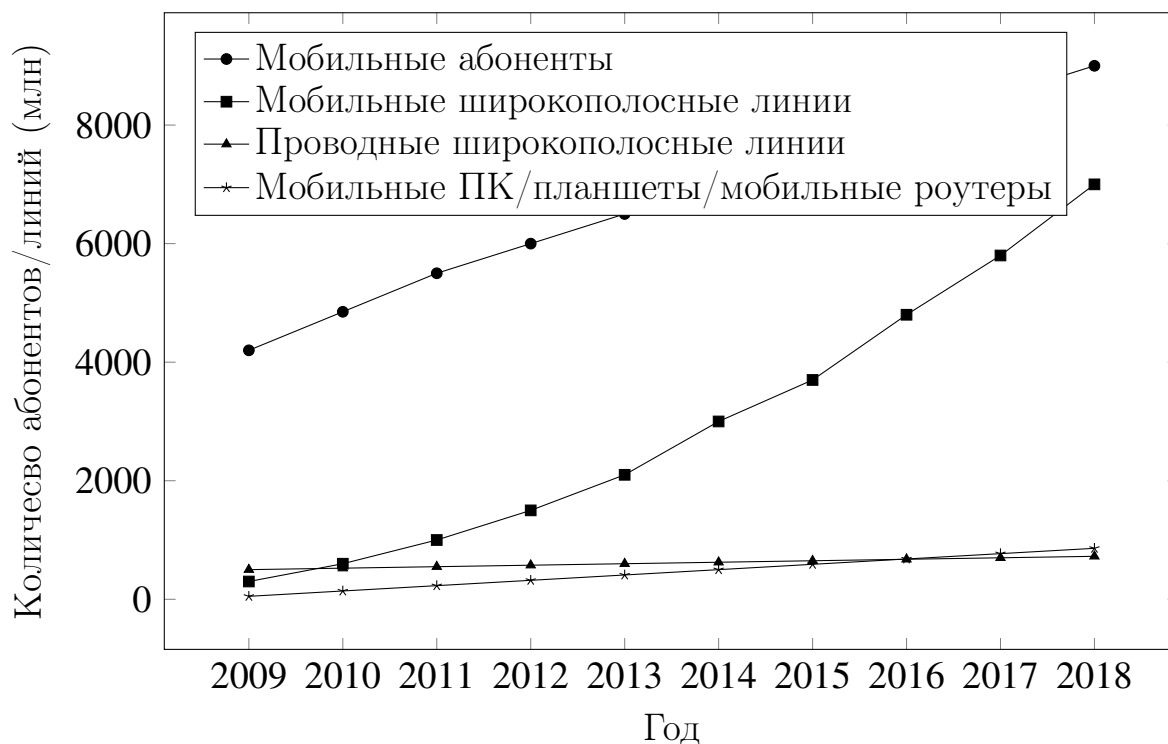


Рис. 1.2. Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [1]

мобильные устройства и технологии мобильной связи. Кроме этого требуется время для обновления установленной базы мобильных устройств.

Мобильный трафик изменяется. На рис. 1.5 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 маршрути-

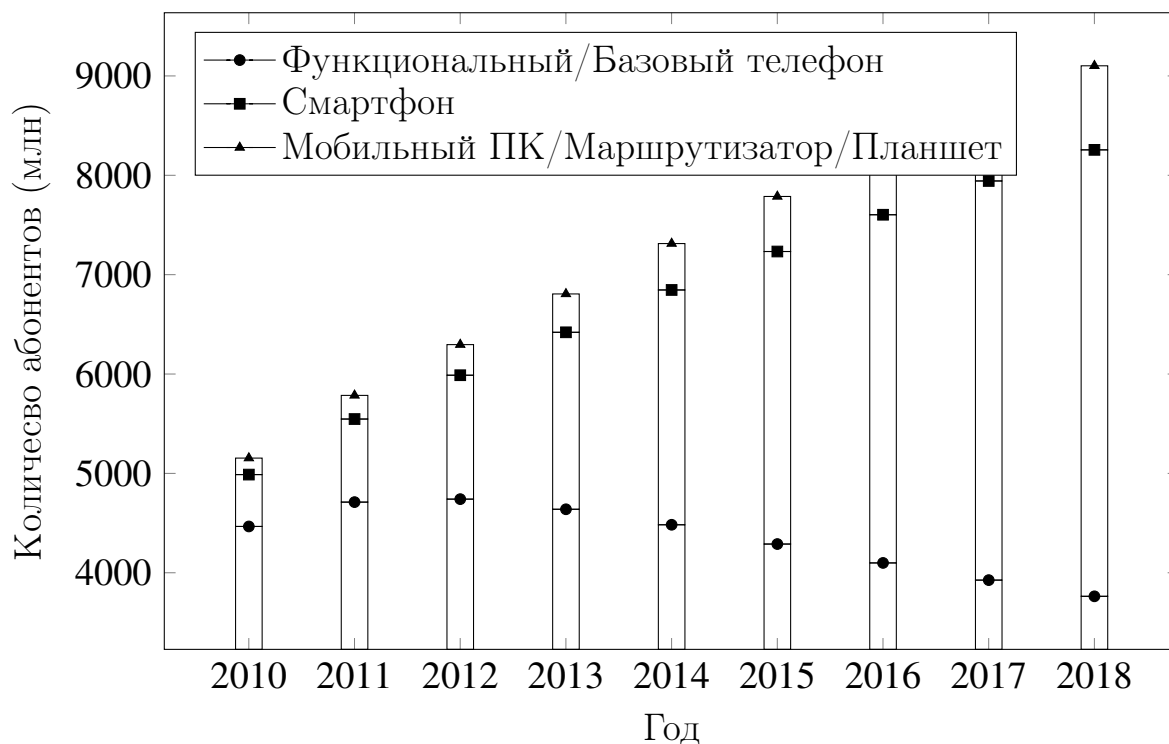


Рис. 1.3. Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [1]

затрами и мобильными ПК с другой (рис. 1.6). 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. 1.7).

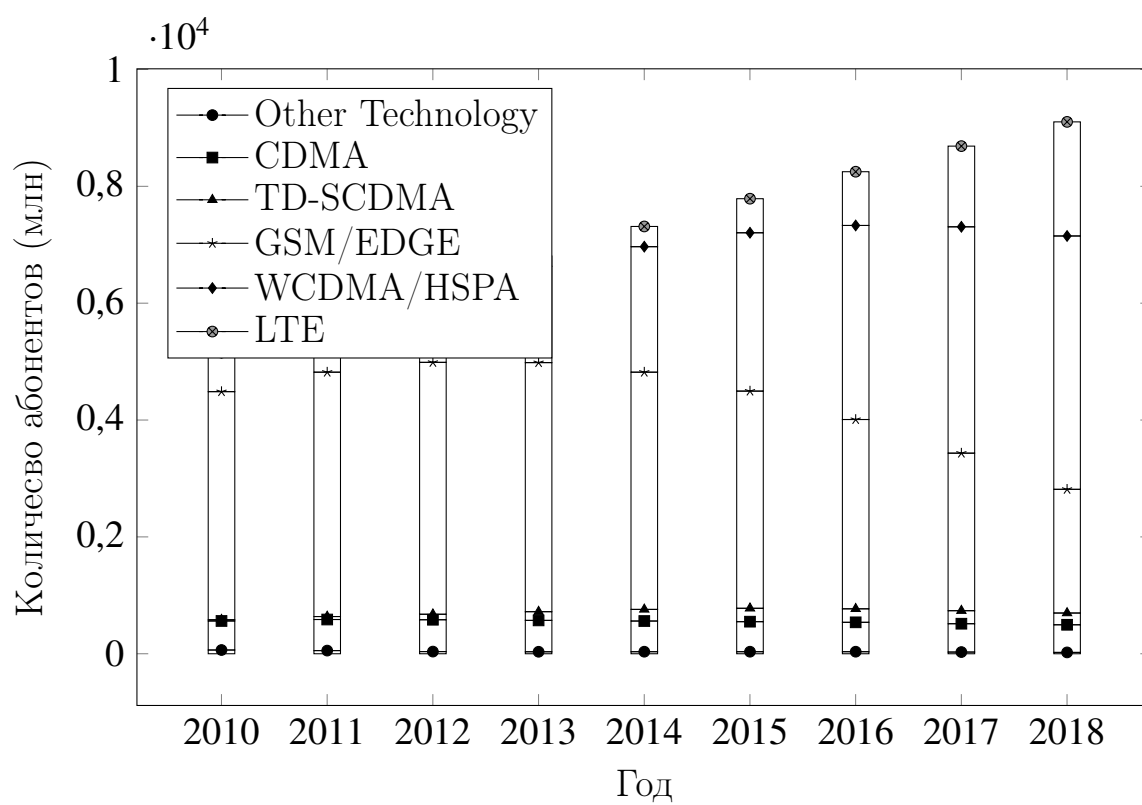


Рис. 1.4. Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [1]

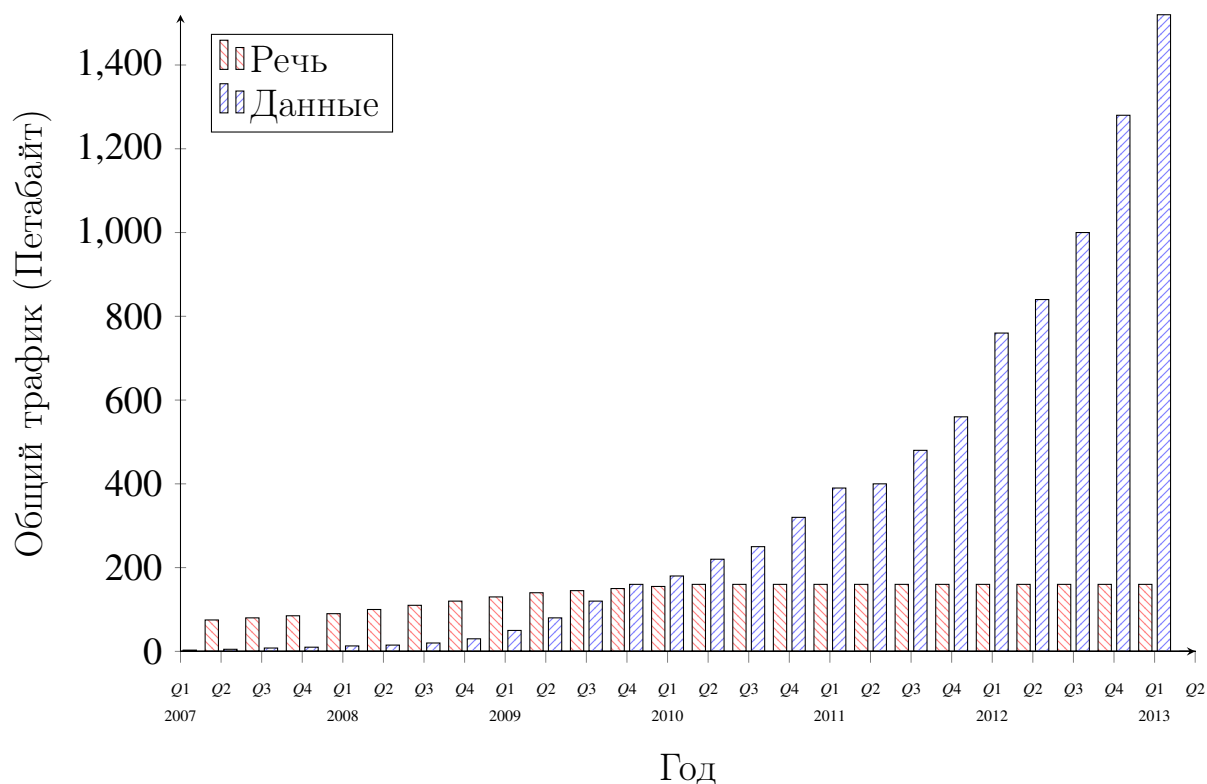


Рис. 1.5. Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [1]

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 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.

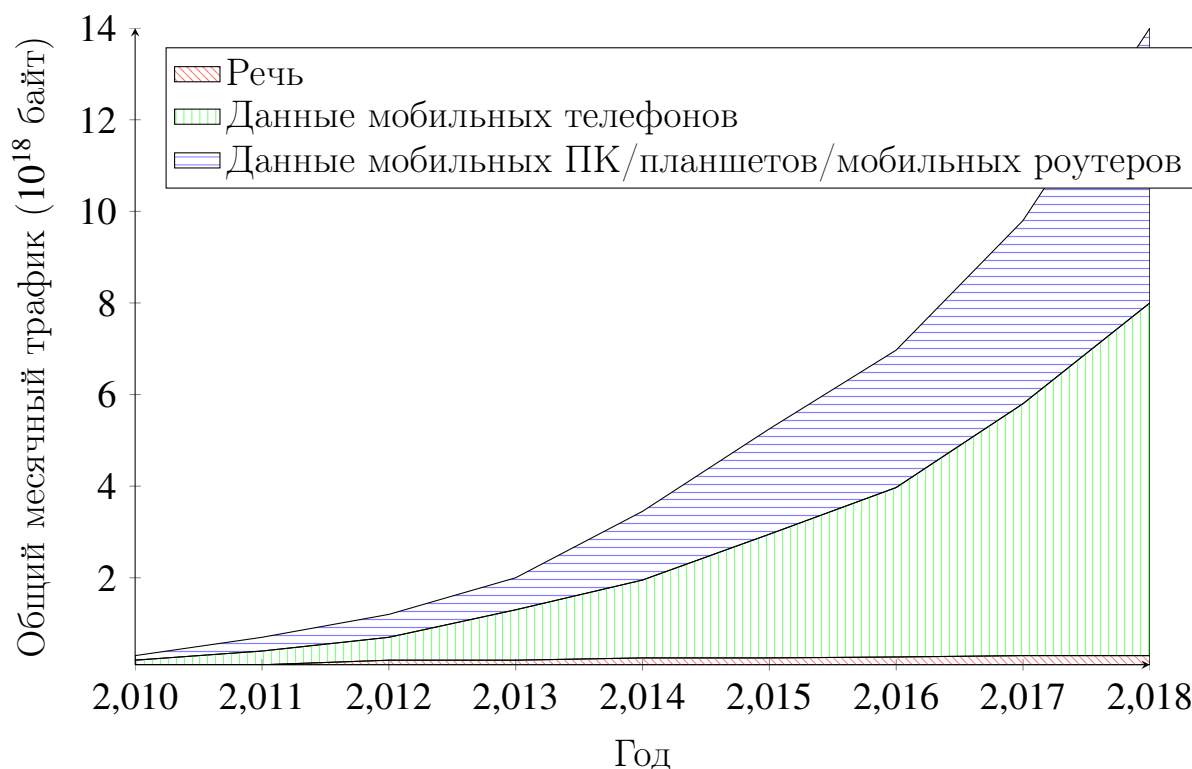


Рис. 1.6. Глобальный трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2010-2018 [1]

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 видеокон-



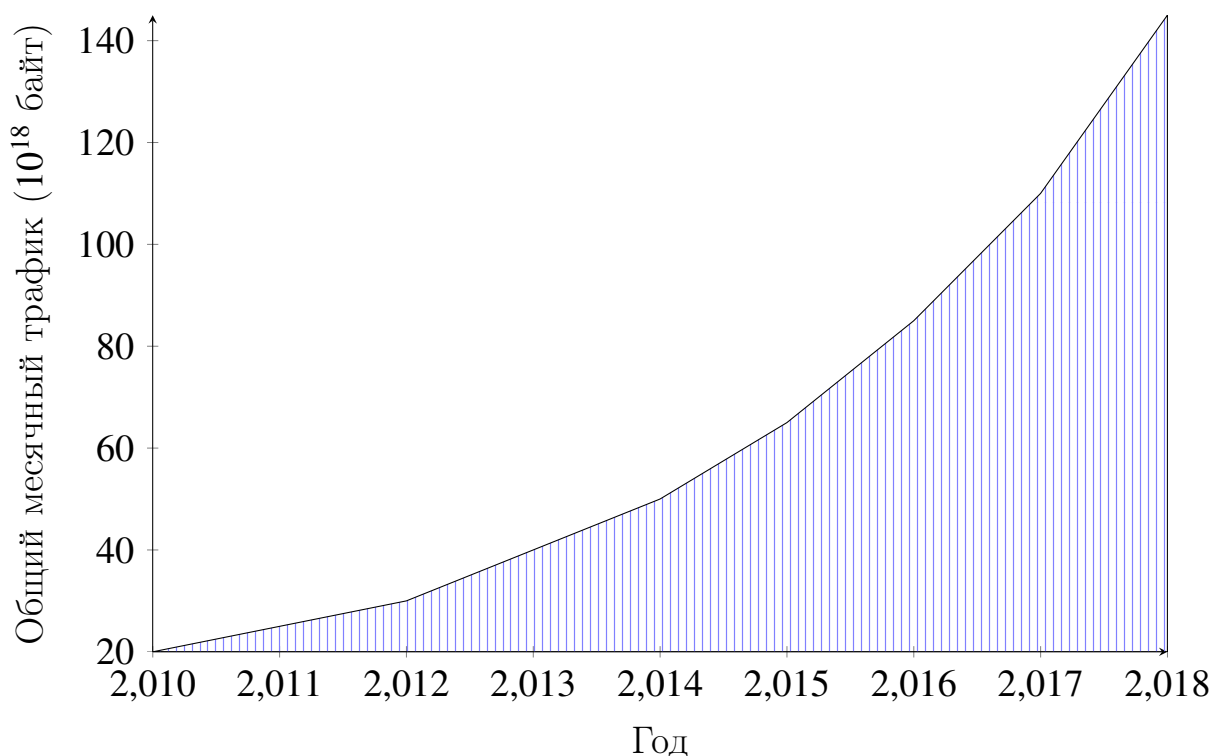


Рис. 1.7. Глобальный трафик в фиксированных сетях, 2010-2018 [1]

ференции 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. 1.8).

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 на-

стоящее время, не считается значительным. 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.

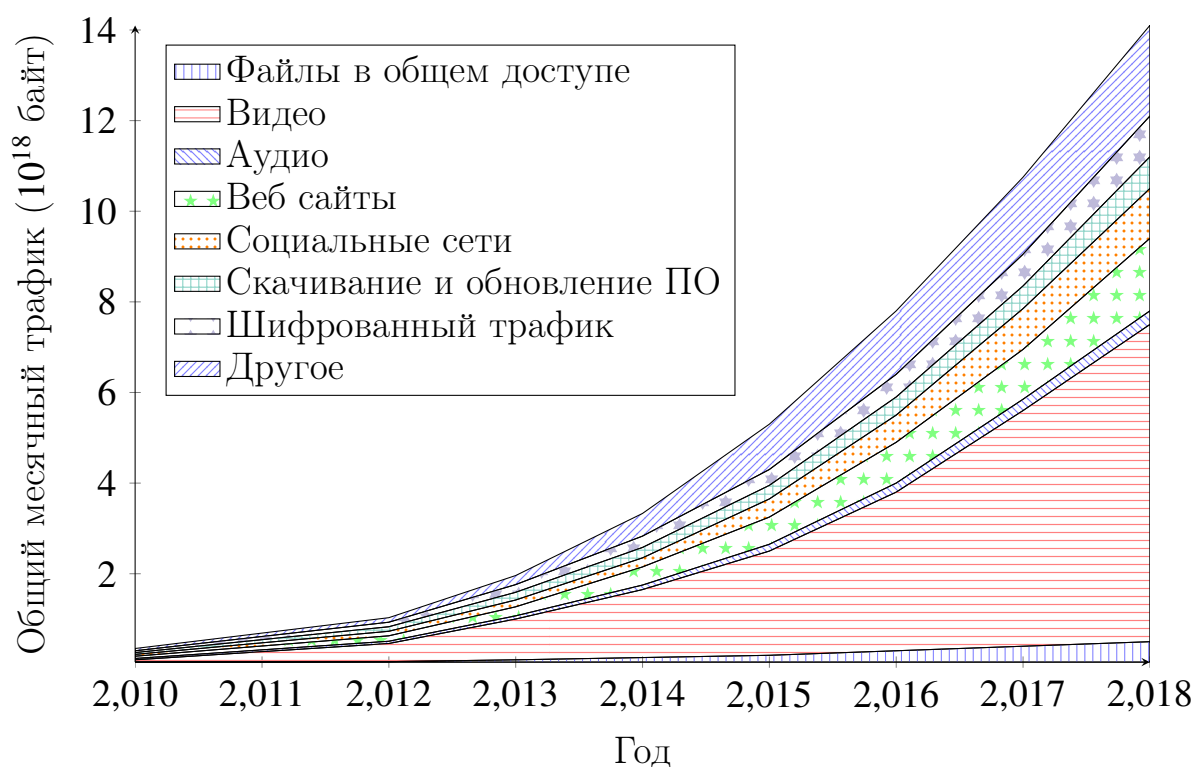


Рис. 1.8. Глобальный трафик разбитый по приложениям, 2010-2018 [1]

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. Анализ предпосылок предоставления услуг передачи речи и видео по верх сетей 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.

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 установленные на смартфоны, получили широкое распространение. Термин OTT означает доставку видео и аудио сигнала на приставку (компьютер, мобильный телефон) пользователя по сети Интернет без прямого

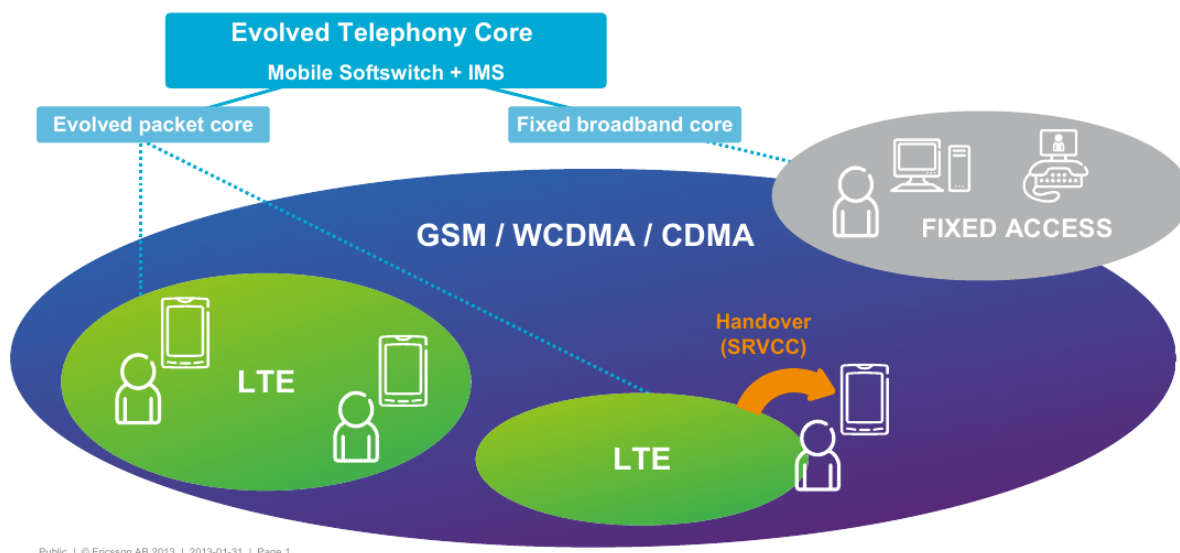


Рис. 1.9. Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [8]

контакта с оператором связи в отличие от услуг VoIP и IPTV, которые предоставляются через управляемую оператором сеть с гарантированным QoS. Тем не менее, ОТТ 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 ОТТ и устройствами, нет поддержки вызова чрезвычайных служб, имеют проблемы с безопасностью. Следовательно, использование сервисов ОТТ 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 [8]: 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).

### 1.3. Анализ требований QoS для предоставления сервисов передачи данных, голоса и видео

Основными факторами, влияющими на качество передачи голоса в IP сетях, являются задержка передачи и процент потери пакетов [1]. На рис. 1.10 показаны контуры качества передачи речи (удовлетворенности пользователя) для кодека G.711 с включенной функцией скрывтия потерь пакетов (PLC).

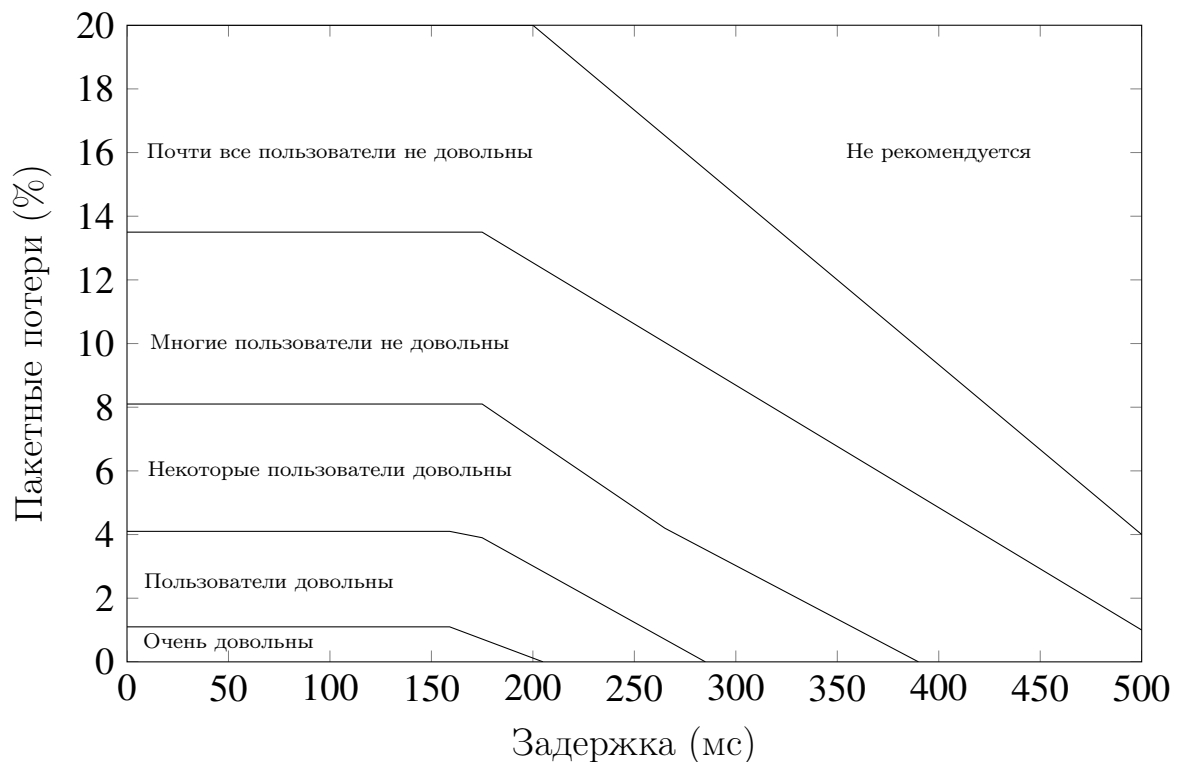


Рис. 1.10. Контуры качества передачи речи G711 с PLC

Наибольший вклад в задержку и потери пакетов вносит не оптимальный буфер компенсации джиттера.

На рис. 1.10 видно, что качество передачи речи уменьшается с увеличением задержки и процента потери пакетов. Необходимо определить составляющие, которые вносят наибольший вклад в задержку и потерю пакетов. Составляющие задержки при передаче голоса средствами VoIP:

1. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигнала.
2. Кодирование/компрессия и декодирование/декомпрессия.
3. Упаковка блока данных и распаковка блока данных стека протоколов TCP/IP.
4. Буфер компенсации джиттера.

Для большинства конечных устройств, работающих с VoIP, потерями на аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование, декодирование/декомпрессию и формирование стека протоколов TCP/IP можно пренебречь. Средняя величина задержки, вносимой каждой из составшихся составляющих VoIP [2, 9], представлена в табл 1.1.

Таблица 1.1

Типы и параметры буфера компенсации джиттера [?]

Наименование	Вносимая задержка
Оптический кабель	5 мкс/км
Система наземной мобильной связи	80-110 мс
Кодек G.729 для 20 мс блоков	25 мс
Кодек GSM для 20 мс блоков	20 мс
Сетевое оборудование (L3), суммарное время нахождения в очереди и обработка	2-10 мс на узел
Буфер компенсации джиттера	20-60 мс

В соответствии с рекомендациями [2] максимальная задержка при передаче голоса в одну сторону не должна превышать 150 мс. Таким образом, в зависимости от параметров сети, до 40% допустимой задержки может составлять задержка в буфере компенсации джиттера. Буфер компенсации джиттера компенсирует отклонения значений задержки от среднего значения. Прибывающие пакеты на приемной стороне воспроизводятся не сразу, а с определенной задержкой. Чем больше джиттер, тем больше размер буфера требуется для компенсации изменений задержки, иначе часть пакетов будет отброшена, если они придут позже времени воспроизведения. При максимальном размере буфера появляется возможность свести количество отбрасываемых пакетов к минимуму, но при этом увеличивается время задержки. При минимальном размере буфера время задержки уменьшается, но при этом увеличивается количество отбрасываемых пакетов.

Следовательно, размер буфера должен меняться во времени по алгоритму, учитывающему текущее состояние сети. И чем динамичнее алгоритм, тем выше качество предоставляемого потокового сервиса на приемной стороне. Поэтому возникает задача: разработать алгоритм адаптивного управления буфером компенсации джиттера.

#### 1.4. 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 воспроизведения. Если межпакетная задержка будет превышать буферное время, буфер будет истощаться, и декодеру не будет хватать пакетов, чтобы воспроизводить речь. Это приводит к нерав-



номерности воспроизведения речи. Согласно рекомендации ITU G.1020 [10] пакеты, прибывающие к получателю, обрабатываются согласно процессу, изображенному на рис. 1.11.

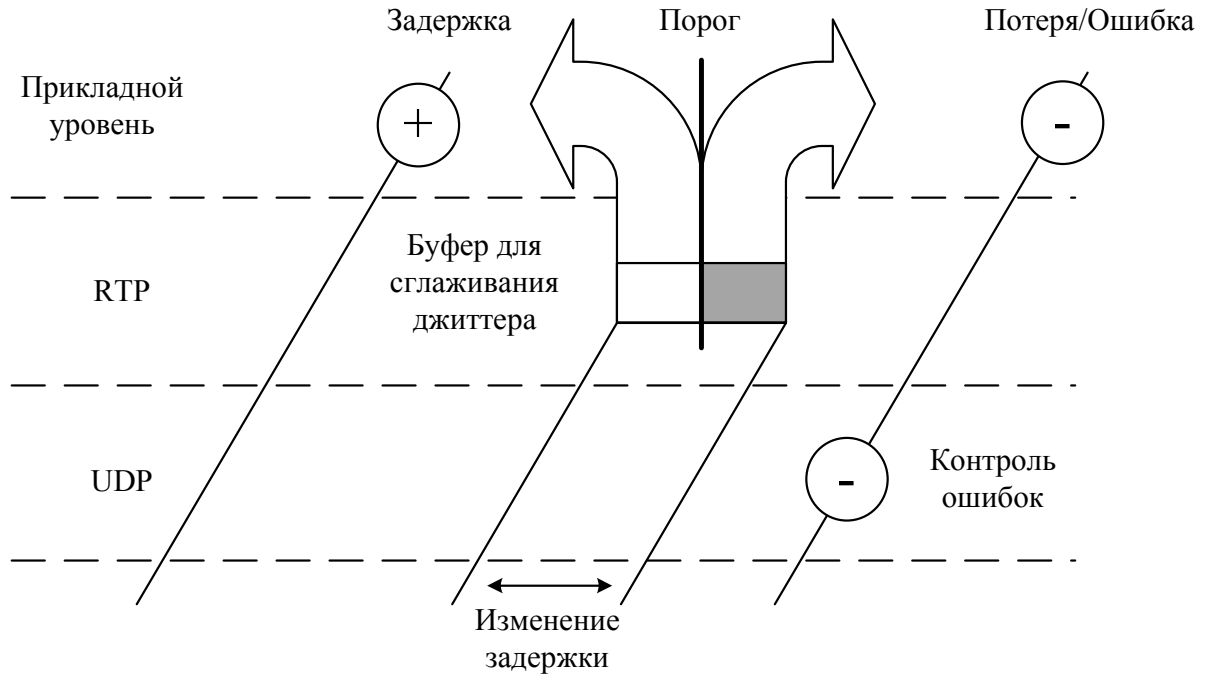


Рис. 1.11. Алгоритм обработки сетевых пакетов

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, представленный 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 больше задержка, тем больше пакетов прибывает 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 [11]. 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. 1.12 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.

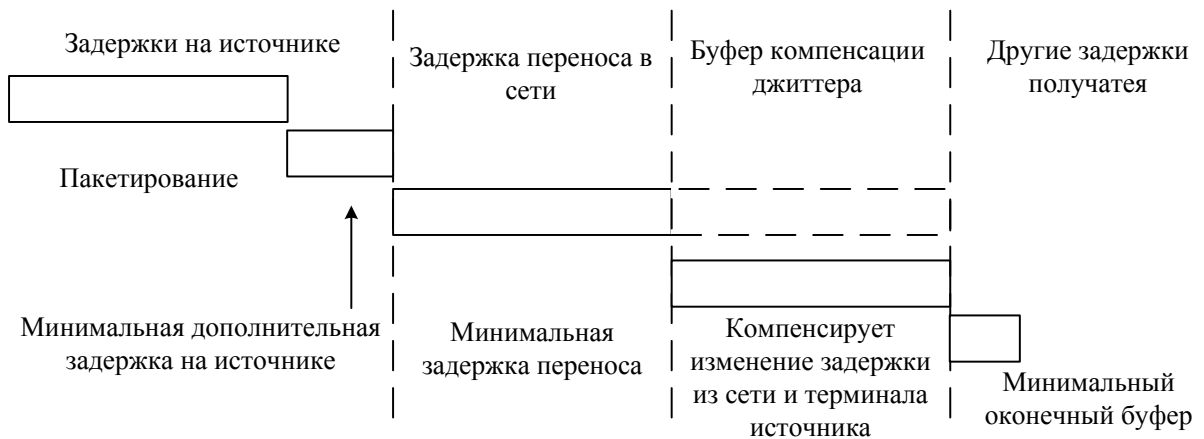


Рис. 1.12. Задержка в пакетных сетях и сетевых элементах

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.

1.5. 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 [10], могут быть построены с использованием разных способов, приведенных в табл. 1.2.

Таблица 1.2

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 / реполнения / антипереполнения	Оценить коэффициент потерь (конфигурировать приемлемый наименьший порог и минимальный счет пакетов между подстройками)
продолжение следует			

(продолжение)			
Тип	Атрибуты	Возможности	
	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. 1.13 а) время воспроизведения всех последующих пакетов растягивается всякий раз, когда пакет чрезмерно задерживается в сети. Во втором случае, показанном на рис. 1.13 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.

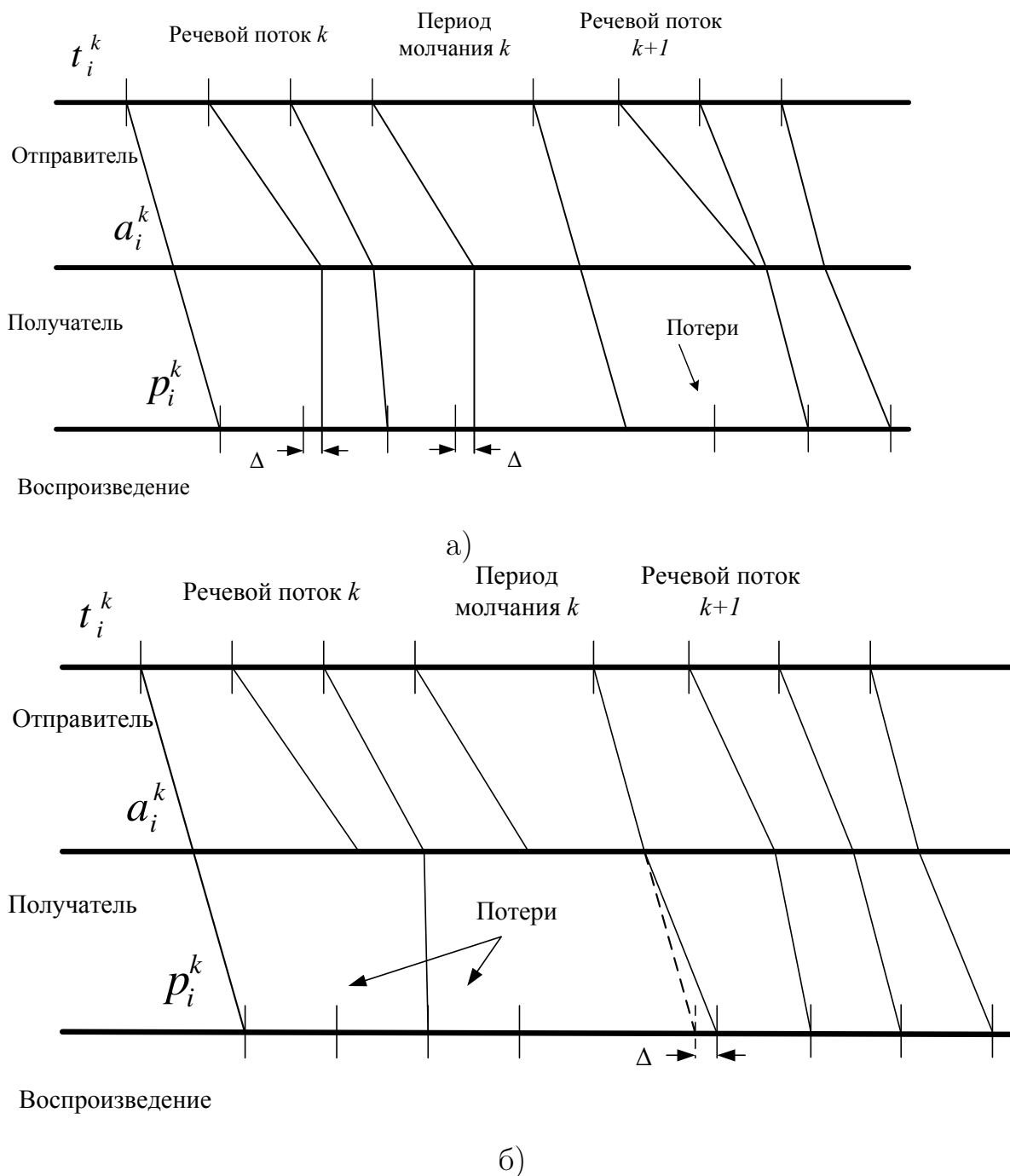


Рис. 1.13. Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками а) с синхронной подстройкой б) с подстройкой первого пакета речевого потока

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.

## 1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера.

1.6.1. 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.

1.6.2. 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 [12]. 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:

$$p(k) = t(k) + \hat{x}(k) + \gamma \cdot \hat{v}(k), \quad (1.1)$$

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 [12]. Эта константа



равна 4 во всех экспериментах, выполняемых в [12]. В [11] это значение варьируют от 1 до 20, что бы добиться различного процента потерь. Чтобы пересчитать среднюю сетевую задержку и его отклонение, используются следующие уравнения:

$$\hat{x}^i(k) = \alpha \cdot \hat{x}^i(k-1) + (1 - \alpha) \cdot x^i(k), \quad (1.2)$$

$$\hat{v}^i(k) = \alpha \cdot \hat{v}^i(k-1) + (1 - \alpha) \cdot |\hat{x}^i(k) - x^i(k)|. \quad (1.3)$$

Эти уравнения представляю собой линейные рекурсивные фильтры, где коэффициент  $\alpha$  называется шаговой постоянной,  $\alpha \leq 1$  и обеспечивает устойчивость процедуры. В работе [12] 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 (1.2), (1.3) позволяют получить лишь среднии значения задержек. Нас же интересуют их текущие значения. Адекватной процедурой для оценки текущих парметров случайного процесса является процедура Калмана-Бьюси.

### 1.7. Постановка научной задачи и формулировка частных задач исследования

Следовательно актуальной является научная задача, которая состоит в разработке предварительного буфера компенсатора джиттера на границе проводной и беспроводной сети способного компенсировать различные типы джиттера. В ходе решения научной задачи сформулированы частные задачи исследования:

1. Провести анализ статистических характеристик джиттера в стационарных и беспроводных сетях.
2. Определить основные механизмы влияния на параметры джиттера.
3. Определить статистические нестационарности джиттера и произвести классификацию нестационарных явлений задержки.
4. Обосновать и разработать математическую модель джиттера, позволяющую отображать динамику изменений состояний.
5. Разработать алгоритмы статистической оценки параметров джиттера и управления с целью его минимизации.
6. Разработать практические предложения по выбору параметров и мест установки агента минимизации джиттера на границе стационарной и мобильной сети.

#### 1.8. 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 ?? будут рассмотрены основные факторы, влияющие на джиттер задержки.

3. Сервисы реального времени с повышенной степенью взаимодействия критичны к джиттеру и задержке. В следствие, чего необходимо решить проблему нерационального внесения задержки буфером компенсации джиттера. Предложено разработать адаптивный буфер компенсации джиттера, котрый бы учитывал текущее состояние сети. А также разработать способ его внедрения в сети LTE.

## 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. Recommendation ITU-T G.114 (05/03). One-way transmission time.
3. Поповский В. В. Ощепков М. Ю. Кобрин А. В. Алгоритмы предварительной компенсации джиттера при передаче потокового видео в беспроводных сетях // Вестник ДУИКТ. 2012. Т. 10, № 1. С. 11–18.
4. Поповский В. В. Кобрин А. В. Тур Б. С. Разработка алгоритма оценки джиттера с помощью рекурсивных фильтров // Сборник научных работ ДонИЖТ. 2013. № 33. С. 108–113.
5. Кобрин А. В. Тур Б. С. Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана // Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 33. С. 108–113.
6. В. Кобрин А. Адаптивный буфер компенсации джиттера задержки прибытия пакетов на основе робастного фильтра Калмана // Проблемы телекоммуникаций. 2013. № 1. С. 72–81. Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131\\_kobrin\\_jitter.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_kobrin_jitter.pdf). — Дата доступа: 06.08.2013.
7. В. Кобрин А. Синтез алгоритма адаптивного буфера компенсации джиттера задержки прибытия пакетов // Сборник научных работ ДонИЖТ. 2013. № 34. С. 38–48.
8. 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.

9. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/11). Network performance objectives for IP-based services.
10. Recommendation ITU-T G.1020 (11/03). Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks.
11. Sue B. Moon Jim Kurose Don Towsley. Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms // *Multimedia Systems*. 1998. № 6. С. 17–28.
12. Ramjee R. Kurose J. Towsley D. Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks // *INFOCOM 94*. 1994. T. 2. С. 680–688.
13. Clark Alan. Analysis, measurement and modelling of Jitter // *Telchemy Incorporated*. 2003.
14. Клёкис Э. А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для помех, содержащих выбросы // *Труды Академии наук Литовской ССР. Серия Б*. 1985. С. 85–91.
15. Friis H. A Note on a Simple Transmission Formula // *Proceedings of the IRE*. 1946. Vol. 34. P. 254–256.
16. 3GPP R1-081483. Conveying MCS and TB size via PDCCH.
17. 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).
18. Бекер Рэнди. Тестирование LTE-приемника: ключевые факторы ухудшения распространения сигнала // *ИКС*. 2010. № 01-02. С. 82 –83.
19. 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.

20. 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.
21. Ершов А. А., Липцер Р. Ш. Робастный фильтр Калмана в дискретном времени // Автоматика и телемеханика. 1978. № 3. С. 60–69.
22. Ершов А. А. Робастные алгоритмы фильтрации // Автоматика и телемеханика. 1978. № 7. С. 68–73.
23. П. Хьюбер. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. с. 304.
24. И. Тихонов В. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. с. 624.
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. 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.
28. Philip A. Chou Z. M. Rate-distortion optimized streaming of packetized media // IEEE transactions on multimedia. 2006. Vol. 8. P. 390–404.
29. 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.