

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

КОБРИН АРТЕМ ВИТАЛЬЕВИЧ

УДК 621.391

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ ПОТОКОВЫХ АГЕНТОВ НА СТЫКЕ  
МОБИЛЬНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность: 05.12.02 - Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Поповский Владимир Владимирович  
доктор технических наук

Харьков - 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ	14
1.1. Обзор тенденций развития телекоммуникационных технологий	14
1.2. Анализ предпосылок внедрения услуг передачи речи и видео в беспроводных сетях LTE . . . . .	23
1.3. Анализ требований QoS для предоставления сервисов реаль- ного времени . . . . .	26
1.4. Анализ работы буфера компенсации джиттера и рабочих ха- рактеристик применительно к передаче потокового трафика через IP-сети . . . . .	29
1.5. Систематизация типов, параметров и моделей буферов ком- пенсации джиттера . . . . .	32
1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера. .	36
1.6.1. Алгоритм фиксированного буфера компенсации джит- тера. . . . .	36
1.6.2. Алгоритм адаптивного буфера компенсации джиттера.	37
1.7. Постановка научной задачи и формулировка частных задач исследования . . . . .	38
1.8. Выводы по первому разделу . . . . .	39
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	42
Список используемых источников	46

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNB	E-UTRAN Node B
eNB	evolved Node B
EPA	Extended Pedestrian A Model
EPC	Evolved Packet Core
ePS	evolved Packet System
EQRS	Extended QoS-based Routing Simulator
ETU	Extended Typical Urban model
EVA	Extended Vehicular A Model
FTP	File Transfer Protocol
GSM	Global System for Mobile communications
GTP	GPRS Tunnelling Protocol
HSPA	High Speed Packet Access
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Core Network Subsystem
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media access control
MaRS	Maryland Routing Simulator
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity

NGN Next-Generation Network  
 NS2 Network Simulator 2  
 NS3 Network Simulator 3  
 OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing  
 P-GW Packet Data Network Gateway  
 PDCP Packet Data Convergence Protocol  
 PHY Physical layer  
 QoS Quality of Service  
 RBID Radio Bearer ID  
 RLC Radio Link Control  
 RRC Radio Resource Control  
 S-GW Serving Gateway  
 SINR Signal to Interference plus Noise Ratio  
 SIP Session Initiation Protocol  
 TB Transport Block  
 TD-SCDMA Time Division Synchronous Code Division Multiple Access  
 TEID Tunnel Endpoint ID  
 TFT Traffic Flow Template  
 TOTEM TOolbox for Traffic Engineering Methods  
 UDP User Datagram Protocol  
 UE User Equipment  
 VoIP Voice over Internet Protocol  
 WCDMA Wideband Code Division Multiple Access  
 WiMAX Worldwide interoperability for Microwave Access  
 xDSL family of technologies Digital Subscriber Line  
 ГРФКБ Гибридный Робастный Фильтр Калмана-Бьюси  
 МСЭ Международный Союз Электросвязи  
 ПА Поточковый Агент  
 РФКБ Робастный Фильтр Калмана-Бьюси

СКО Средний Квадрат Отклонений

ФКБ Фильтр Калмана-Бьюси

ШПД Широкополосный доступ

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Как показывает практика, беспроводные технологии все больше внедряются в наш повседневный мир. Такие технологии как WiFi, Bluetooth, GSM стали уже неотъемлемой частью нашей жизни. Современные мобильные сети развиваются в направлении внедрения концепций следующего поколения NGN (Next Generation Network) [1, 2]. На данный момент основными представителями таких сетей являются WiMAX и LTE сети. Согласно прогнозу [3] 60% людей к концу 2018 года будут иметь покрытие LTE.

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

Спрос на услуги мобильного широкополосного доступа растет, и операторы запускают высокоскоростные 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 передаче 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 связи, важными являются такие сетевые характеристики: задержка, число потерянных и поврежденных пакетов и джиттер задержки. Согласно [4]

наибольший вклад в задержку и потери пакетов вносит неоптимальный буфер компенсации джиттера (буфер воспроизведения). До 40% допустимой задержки, определенной в рекомендации [5], 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 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 №1261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (№ госрегистрации 0111U002627), которая выполнялась кафедрой телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники. В указанной научно-исследовательской работе диссертант был исполнителем.

**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 причины формирования джиттера.

3. Определить статистические характеристики нестационарности джиттера и произвести классификацию нестационарных явлений задержки.
4. Обосновать и разработать математическую модель джиттера, позволяющую отображать динамику изменений состояний сетевой задержки.
5. Разработать алгоритмы стохастической 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:* метод повышения качества обслуживания на основе потоковых агентов на стыке мобильных и стационарных сетей.

*Методы исследования.* В ходе разработки алгоритма статистической оценки параметров джиттера были использованы методы теории связи, математической статистики, теории вероятности случайных процессов, теории решений, непараметрические методы обработки, робастный фильтр Калмана-Бьюси. Для разработки математической модели джиттера был использован аппарат теории выбросов. В ходе проведения оценки эффективности использовались методы имитационного моделирования.

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. В результате анализа состояния составных каналов связи, включая мобильную и стационарную компоненту, выявлены причины возникновения нестационарностей и большого разброса параметров джиттера. Проанализированы механизмы формирования джиттера в гибридных сетях, получены статистические данные характеристик джиттера.



2. Разработана более адекватная общая, по сравнению с известными, нестационарная математическая модель задержки прибытия пакетов, позволяющая учитывать засоренность представления наблюдаемого процесса случайными выбросами и скачками.
3. Разработан новый адаптивный метод компенсации джиттера на базе робастных процедур инвариантных к распределению вероятностей процесса задержки.
4. Разработаны новые рекомендации по применению буфера компенсации джиттера в сетях LTE на основе потоковых агентов, устанавливаемых на границе проводной и беспроводной сети.

**Практическое значение полученных результатов.** Полученные научные результаты имеют практическое значение, поскольку они ориентированы на дальнейшее внедрение в реальные системы связи, в частности, в диссертационных исследованиях предложен новый метод предварительной компенсации джиттера на границе проводной и беспроводной сети на основе потоковых агентов, что позволяет обеспечить повышение качества передачи речевого трафика в гибридных сетях. Кроме того, результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы №1261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління». Также полученные результаты были использованы для написания раздела 5.12 книги «Методы научных исследований в телекоммуникациях» [6]. Результаты исследований по повышению качества передачи речевого трафика в пакетных сетях использованы в учебном процессе кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, в частности, в дисциплине «Мобильные системы связи» при выполнении лабораторных работ.

**Личный вклад соискателя.** В статьях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты:

В работе [7] автору принадлежит синтез алгоритма оценки сетевой за-

держки.

В работе [8] автору принадлежит разработка алгоритма оценки джиттера на основе рекурсивных фильтров.

В работе [9] автору принадлежит анализ эффективности использования робастного фильтра Калмана для оценки процесса задержки.

**Апробация результатов диссертации** проводилась в ходе четырех научно-технических конференций и форумов: 14-й Международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"; 15-ый международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"; 4-ый международный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ 2011); 12th International Conference "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)".

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в статьях [7–11] в специализированных научных изданиях, утвержденных в ВАК Украины, Кроме того, материалы диссертации опубликованы в 4 тезисах доклада на научно-технических конференциях и форумах [12–15] и в одном отчете по НИР.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

#### 1.1. Обзор тенденций развития телекоммуникационных технологий

Объем данных, передаваемый через телекоммуникационные сети, имеет тенденцию удваивания ежегодно, 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. Рассмотрим основные особенности сетей следующего поколения (NGN) [16].

Телекоммуникационные сети были изначально разработаны для речевого трафика. Люди связываются с друг другом, 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 сеанса связи. 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 речи 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 использование 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.

Сети NGN, как правило, строятся 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.

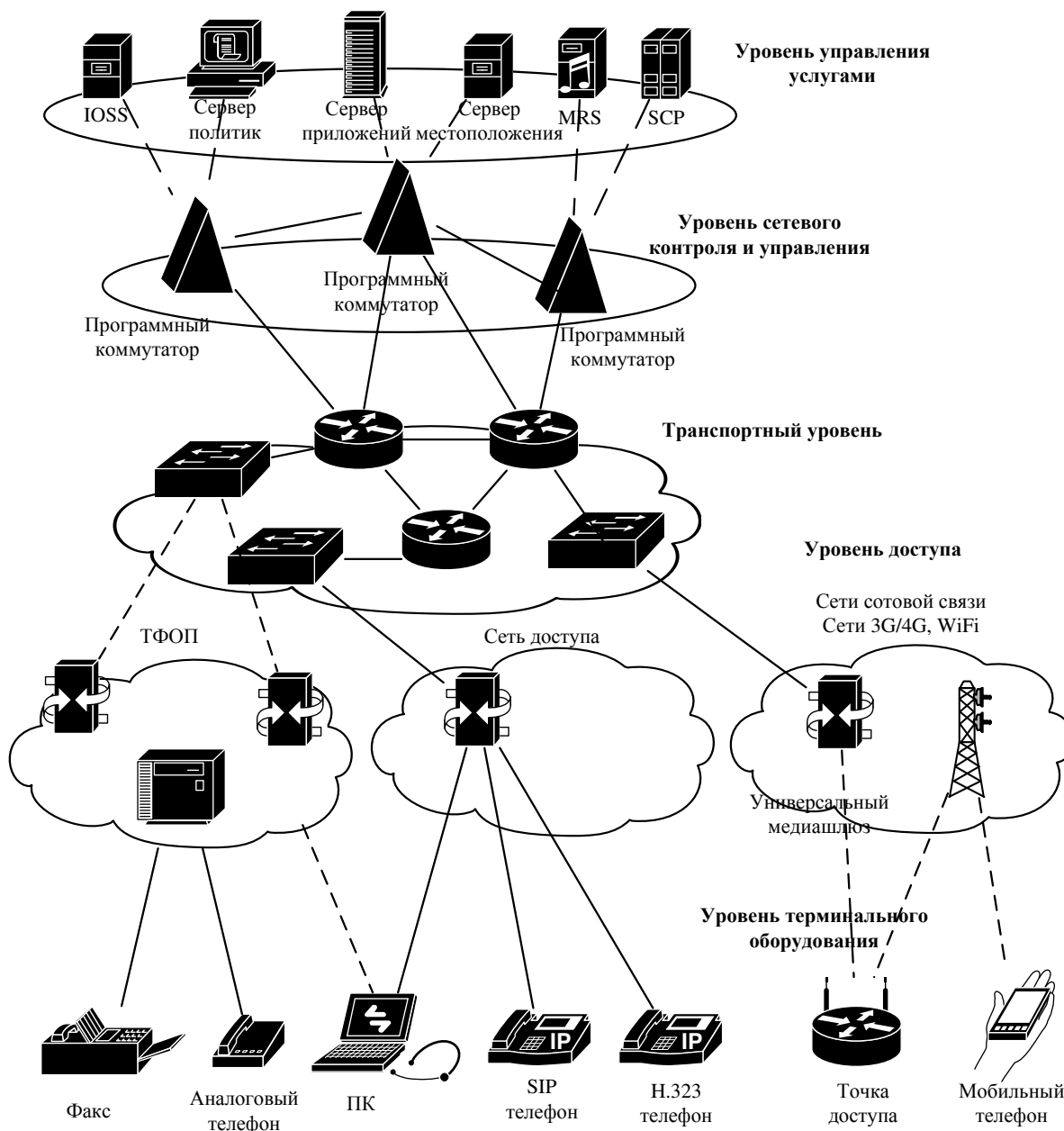


Рис. 1.1: Архитектура сети NGN

Как было сказано ранее, сети следующего поколения являются сетя-

ми 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. Это выражается тем, что:

1. LTE и WiMAX были построены с самого начала с использованием в качестве ядра IP сети;
2. LTE и WiMAX не поддерживают обычных речевых служб;
3. LTE и WiMAX работают с речевым трафиком также, как и с трафиком данных.

Согласно отчету Ericsson [3, 17, 18] 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 (ШПД) 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

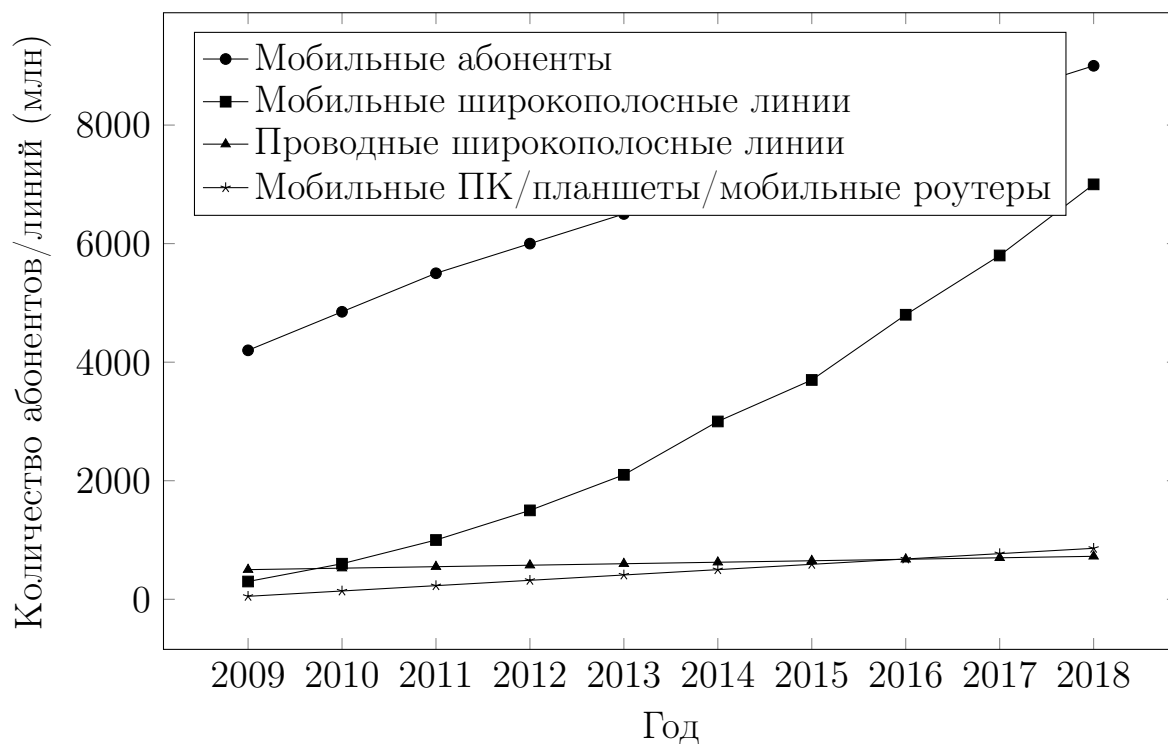


Рис. 1.2: Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [3]

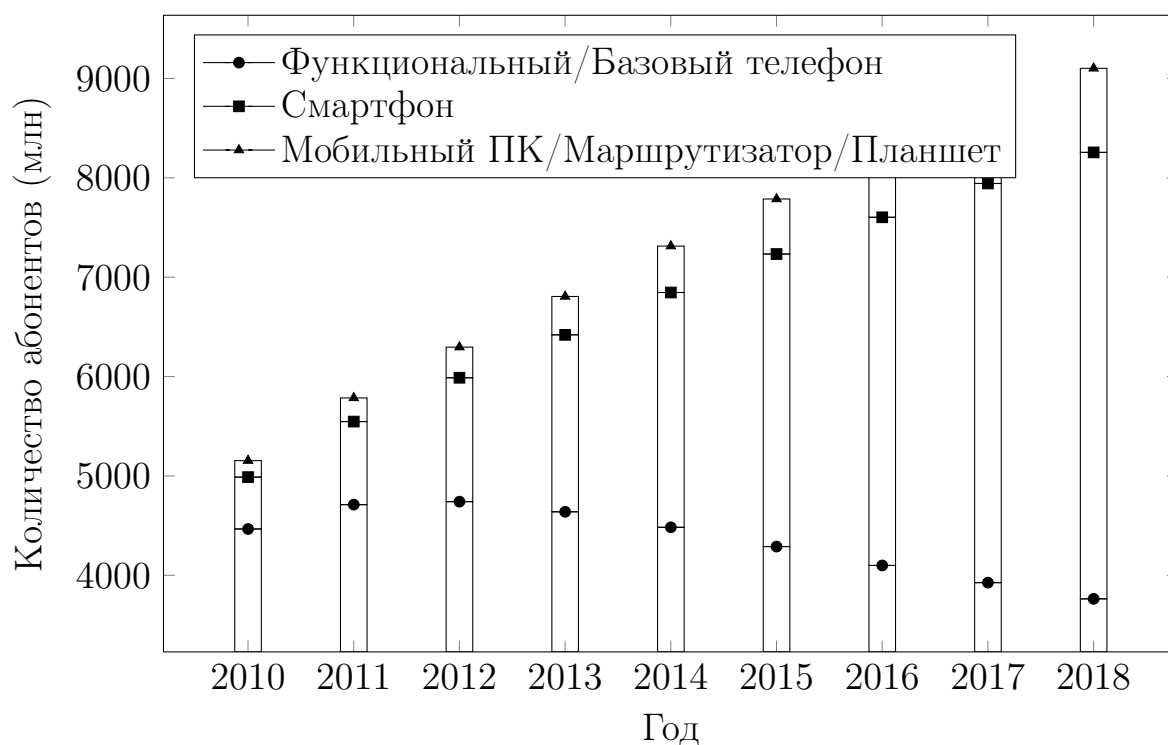


Рис. 1.3: Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [3]



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

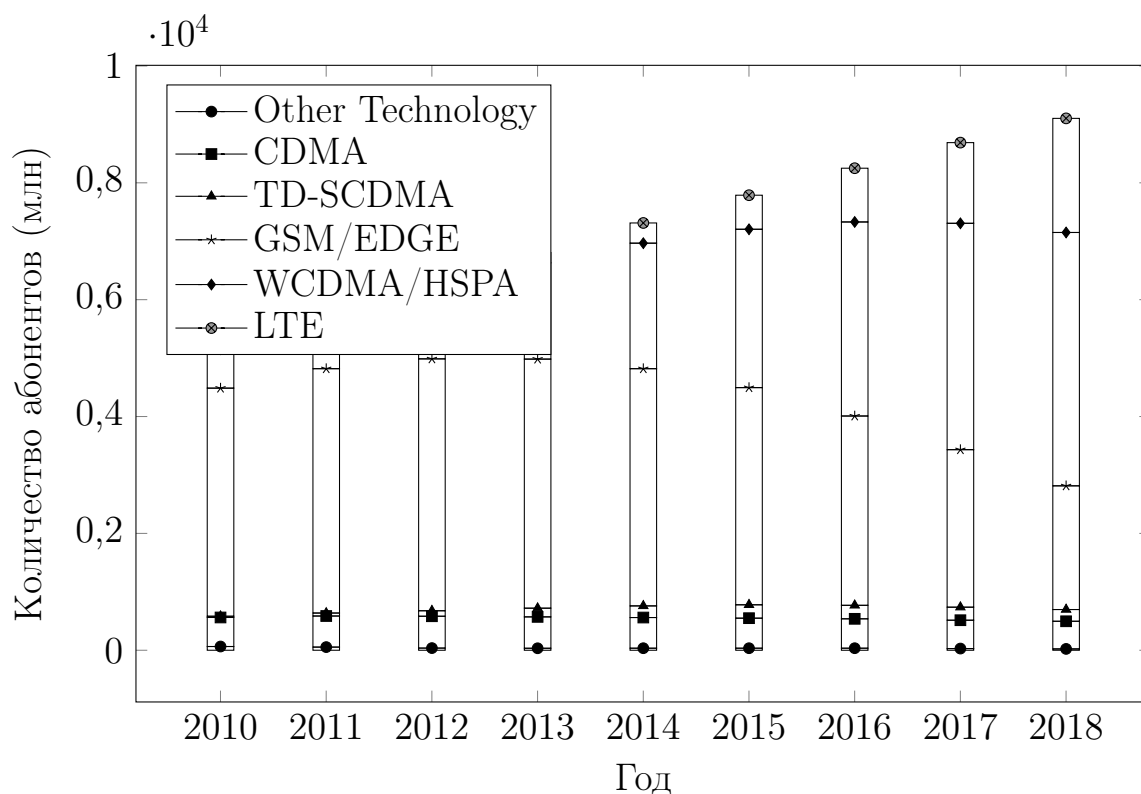


Рис. 1.4: Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [3]

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.

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

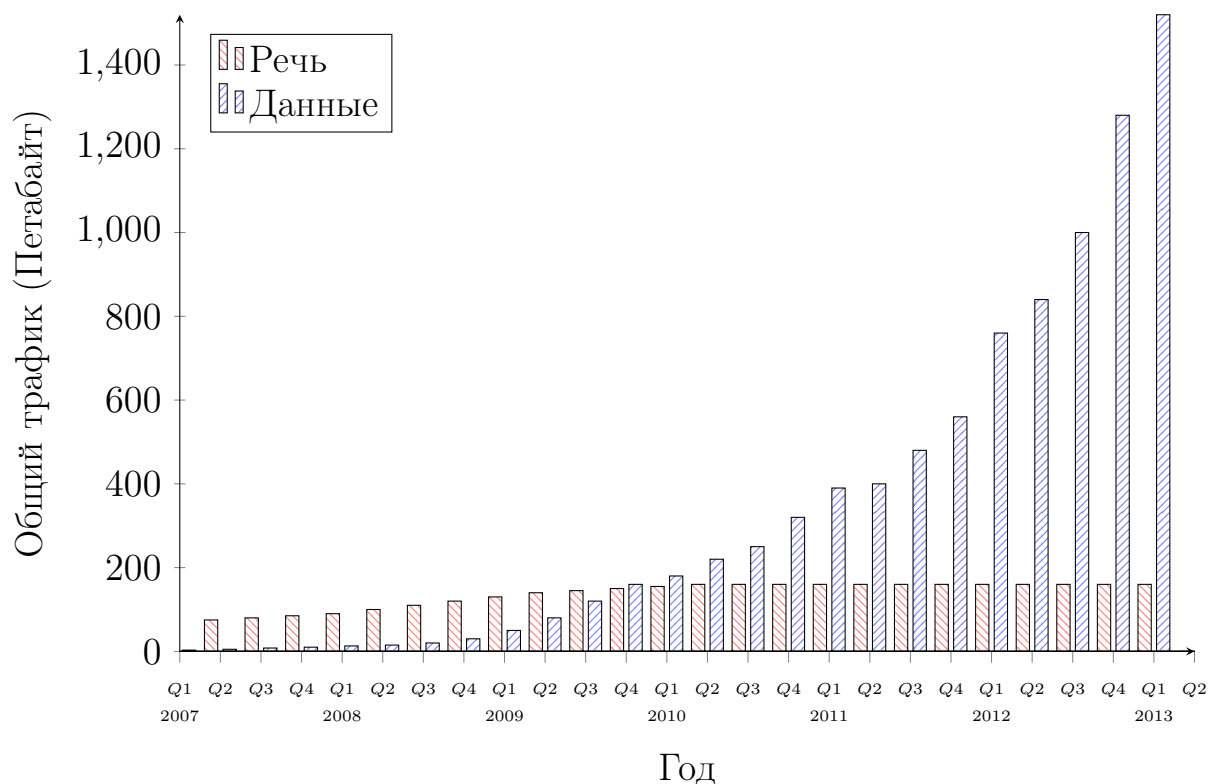


Рис. 1.5: Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [3]

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 сверхвысокой.

Сервисы с потоковым видео так же имеют 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 передача видео контента 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. 1.6).

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 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.

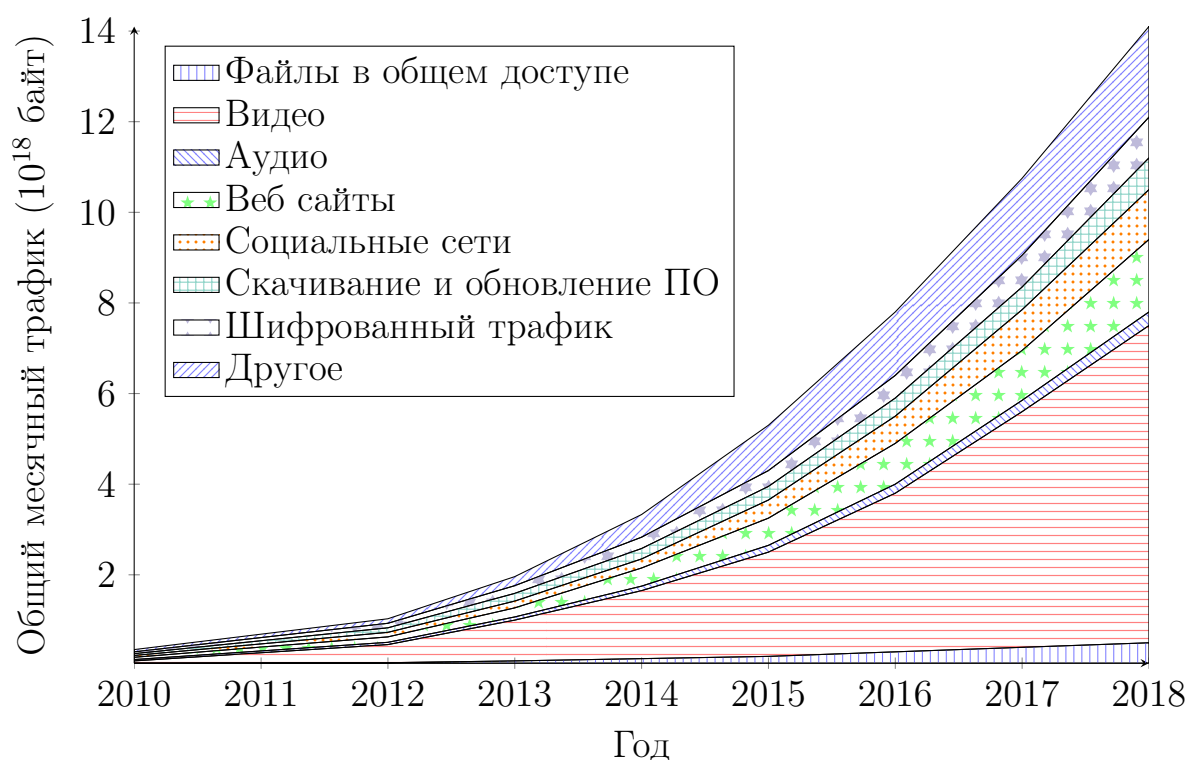


Рис. 1.6: Глобальный трафик, разбитый по приложениям, 2010-2018 [3]

Когда пользователь меняет свой телефон на смартфон, он все равно продолжает пользоваться речевыми и текстовыми сообщениями. Пользо-

ватели 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, скорее всего, представит большую часть всего мобильного трафика данных к 2018 году.

## 1.2. Анализ предпосылок внедрения услуг передачи речи и видео в беспроводных сетях 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 опера-

торов 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 речевой и видео связи и другие услуги для LTE смартфонов [19–21].

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 связь, чат и другое) как в LTE, так и в фиксированной сети. LTE сеть радио доступа и EPS также должно поддерживать VoLTE, которое может быть достигнуто обновлением программного обеспечения.

Операторы могут использовать то же самое ядро сетевой инфраструктуры IMS в VoLTE для развития мобильной и фиксированной конвергенции между любыми устройствами. Пользователи будут иметь возможность использовать предоставляемую оператором высококачественную речевую и видео связь 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 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 боль-

шими возможностями и с меньшей задержкой.

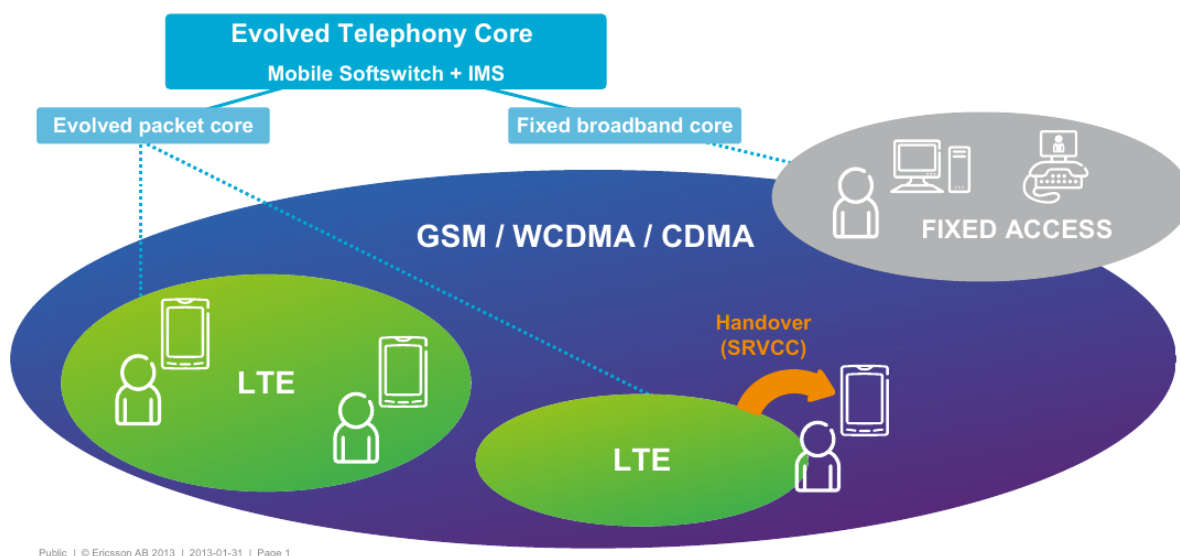


Рис. 1.7: Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [17]

Некоторые ОТТ (Over the Top) решения, такие как Skype, часто предустановленные на смартфоны, получили широкое распространение. Термин ОТТ 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, 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 речевой и видео связи поверх LTE - еще до того, когда LTE сеть будет полностью развернута.

LTE и EPC архитектуры не включают поддержку коммутации речевой и видео связи. Перед началом использования LTE в телефонах, это ограничение должно быть решено. На данный момент существует два решения этой проблемы [17]: 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 реального времени

Основными факторами, влияющими на качество передачи речи в IP сетях, являются задержка передачи и процент потери пакетов [5]. На рис. 1.8 показаны контуры качества передачи речи (удовлетворенности пользователя) для кодека G.711 с включенной функцией скрывания потерь пакетов (PLC).

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

На рис. 1.8 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 речи 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 протоко-

лов TCP/IP;

#### 4. буфер компенсации джиттера.

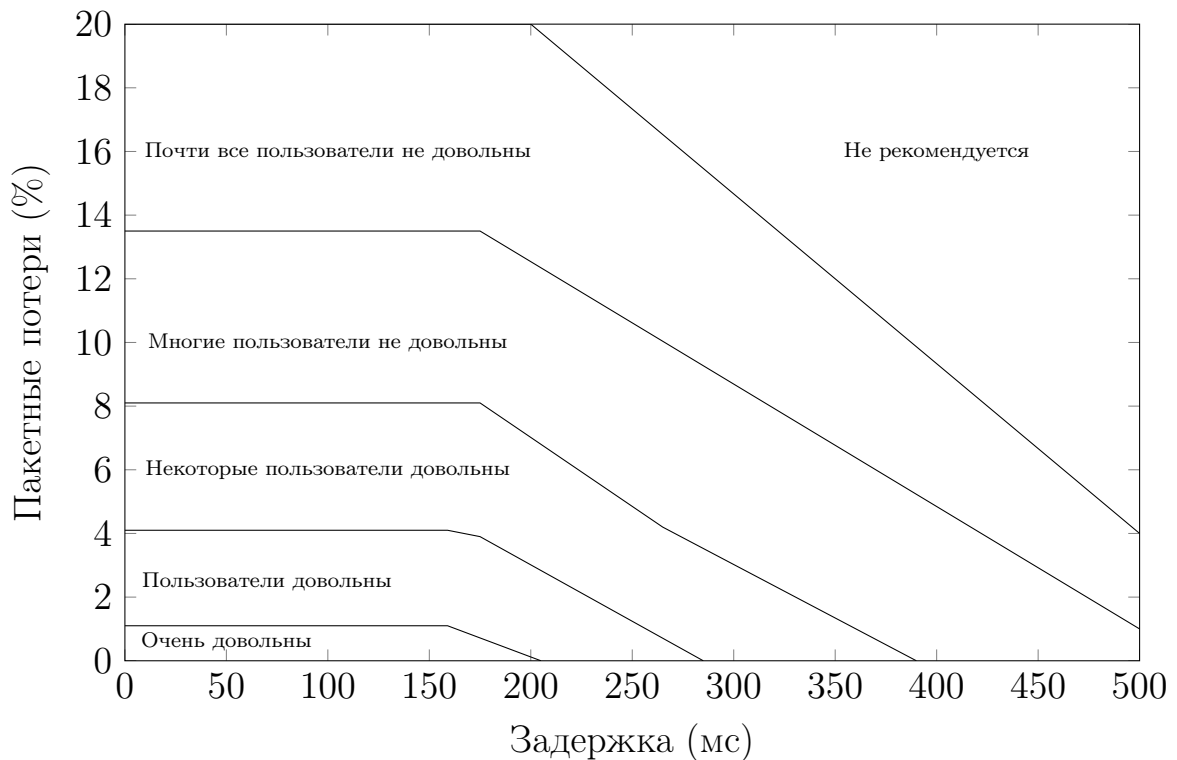


Рис. 1.8: Контуры качества передачи речи G711 с PLC

Для большинства оконечных 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 составляющих VoIP [5, 22], представлена в табл. 1.1 [4].

В соответствии с рекомендациями [5] максимальная задержка при передаче речи 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 раз-



мер 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.

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

Следовательно, размер буфера должен меняться во времени по алгоритму, учитывающему текущее состояние сети. И чем быстрее метод реагирует на изменения состояния сети, тем выше качество предоставляемого потокового сервиса на приемной стороне. Поэтому возникает задача: разработать метод 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 неравномерности воспроизведения речи. Согласно рекомендации ITU G.1020 [23] пакеты, прибывающие к получателю, обрабатываются согласно процессу, изображенному на рис. 1.9.

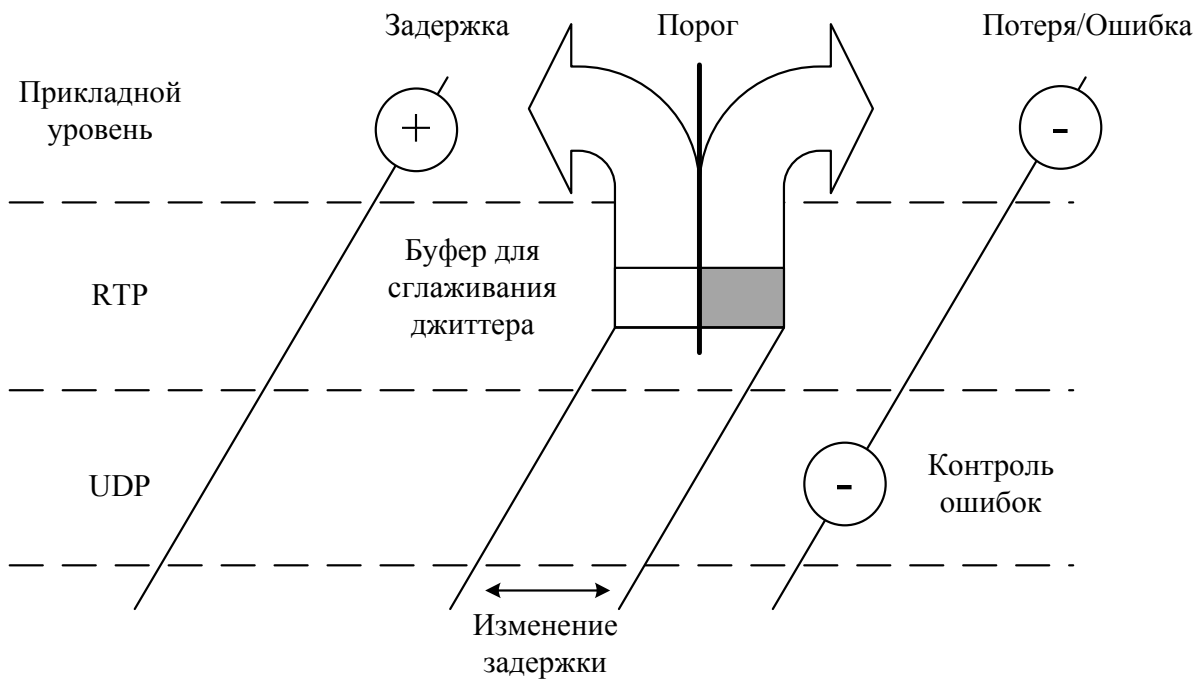


Рис. 1.9: Алгоритм обработки сетевых пакетов

Прибывающие пакеты обрабатываются по мере их продвижения по стеку протокола. Показано, что некоторые характеристики, такие как ошибки и джиттер преобразуются в общие потери и общие ошибки. На рис. 1.9 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 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 [24].

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. 1.10 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. 1.10: 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.

ку. 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 [23], могут быть построены с использованием разных способов, приведенных в табл. 1.2.

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. 1.11 а) время воспроизведения всех последующих пакетов растягивается всякий раз, когда пакет чрезмерно задерживается в сети. Во втором случае, показанном на рис. 1.11 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.

Таблица 1.2

### Типы и параметры буфера компенсации джиттера

Тип	Атрибуты	Возможности	
Фиксированный и адаптивный	Размер (конфигурируется максимальный и номинальный или минимальный)	Целое количество пакетов	Дробное количество пакетов
Адаптивный	Управление	Синхронизированное ослабление при отсутствии повторения / 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

Продолж. табл. 1.2

Тип	Атрибуты	Возможности	
	Восстановление порядка пакетов	Да	Нет
	Режим передачи данных в полосе тональных частот	Обнаружение тональной частоты 2100 Гц; установка максимальной длины	Нет

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.

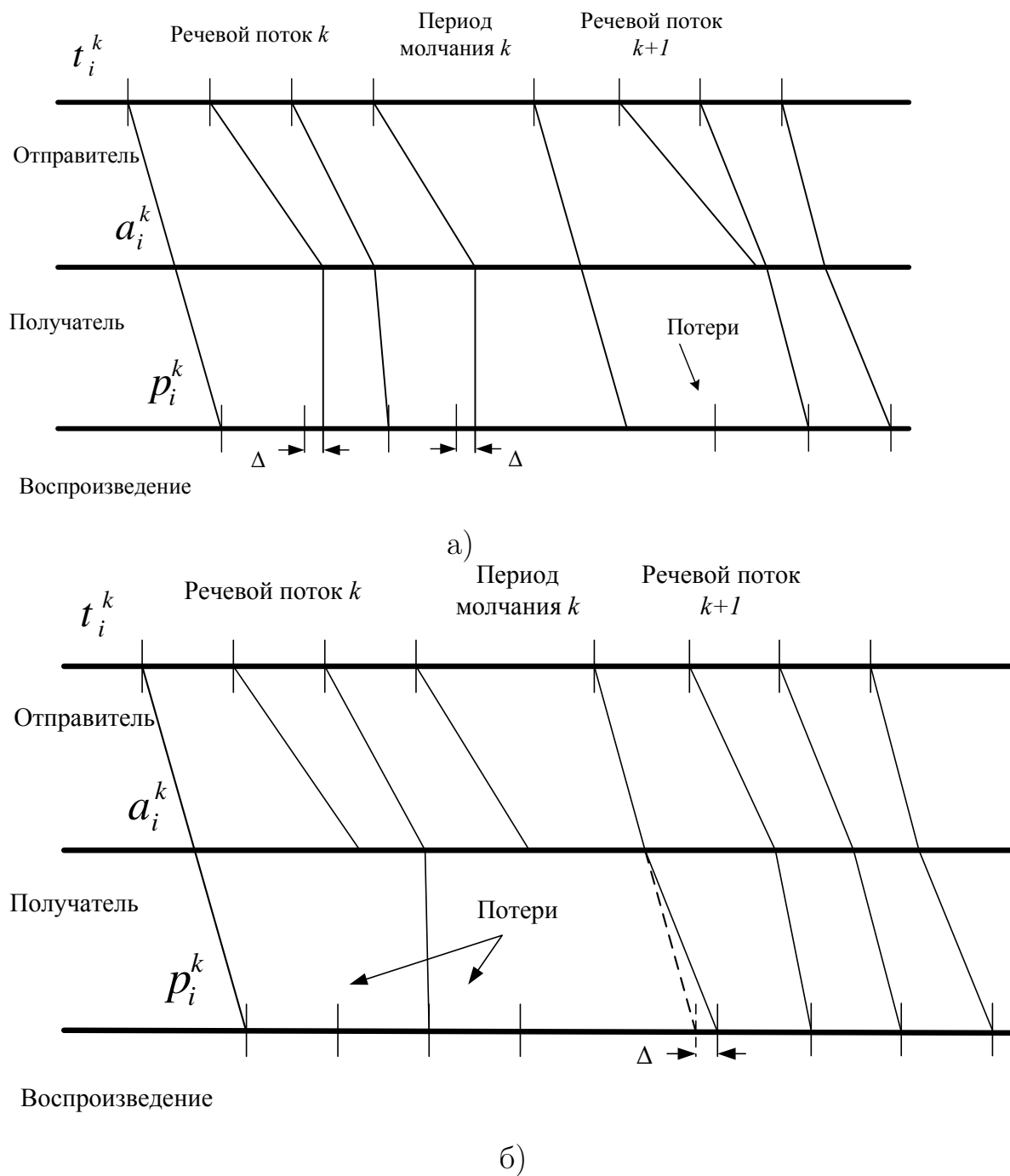


Рис. 1.11: Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками

а) с синхронной подстройкой

б) с подстройкой первого пакета речевого потока



## 1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера.

### 1.6.1. Алгоритм 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. Алгоритм 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 [25]. 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:

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

где  $\hat{x}(k)$  - оценка среднего значения сквозной задержки,  $\hat{\nu}(k)$  - оценка отклонения от среднего значения сквозной сетевой задержки,  $\gamma$  - константа, используемая для установки времени воспроизведения так чтобы только небольшая часть поступающих пакетов была потеряна [25]. Эта константа

равна 4 во всех экспериментах, выполняемых в [25]. В [24] это значение варьируют от 1 до 20, что бы добиться различного процента потерь. Чтобы пересчитать среднюю сетевую задержку и его отклонение, используются следующие уравнения:

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

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

Эти уравнения представляю собой линейные рекурсивные фильтры, где коэффициент  $\alpha$  называется шаговой постоянной,  $\alpha \leq 1$  и обеспечивает устойчивость процедуры. В работе [25] 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  $\hat{\nu}^i(k)$ , 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 средние значения задержек. Нас же интересуют их текущие значения. Адекватной процедурой для оценки текущих параметров 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 первому разделу

1. Согласно прогнозам, к 2018 году мировой трафик данных увеличится в 12 раз. Данная тенденция обусловлена увеличением объемов доступного контента и ростом скорости передачи данных в мобильных сетях по мере развития технологий HSPA и LTE. Сервисы с потоковым видео и аудио являются крупнейшим сегментом трафика в мобильных сетях благодаря значительному проникновению смартфонов на потребительский рынок: если в 2012 году они составляли 40% от общего объема продаж телефонов в мире, то только в первом квартале 2013 на долю смартфонов пришлось около половины продаж. Вследствие чего исследования направленные на обеспечение требуемого качества обслуживания для мобильных абонентов являются актуальными.
2. Проведен анализ требований QoS для предоставления сервисов реального времени. Сервисы реального времени с повышенной степе-

нью взаимодействия критичны к джиттеру задержки. Анализ показал, что основными факторами, влияющими на качество предоставления сервисов, являются джиттер, задержка, потерянные и поврежденные пакеты.

3. Сети LTE с помощью технологии VoLTE, позволяют предоставлять услуги реального времени, такие как речевая связь в HD качестве, видео связь, организация конференций с эффектом присутствия и др., которые критичны к джиттеру задержки. Проводные сети и беспроводные сети LTE, через которые передаются пакеты этих услуг, подвержены различным факторам, которые увеличивают джиттер задержки. Поэтому для сохранения качества предоставления услуг реального времени в сетях LTE требуются меры по дополнительной компенсации джиттера на границе проводной и беспроводной сети, что можно реализовать с помощью адаптивного буфера компенсации джиттера.
4. Проанализирован общий принцип действия буфера компенсации джиттера. Показано, что буфер преобразовывает джиттер задержки в другие характеристики такие, как общая задержка и общие потери. С помощью буфера достигается компромисс между задержкой и потерями, который представлен в виде порога в диапазоне изменения задержки.
5. Проведена систематизация основных принципов управления буфером компенсации джиттера. На основе анализа был выбран адаптивный принцип управления с подстройкой времени задержки первого пакета каждого речевого потока. Выбранный принцип основан на том, что дополнительная задержка буферизации вносится только в паузах между речевой активностью, что позволяет исключить влияние буфера на длину речевой активности. В противном случае работа буфера могла бы привести к проблемам с разборчивостью

речи.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Современные телекоммуникационные системы представляют собой сложную распределенную автоматически функционирующую структуру обладающую требованиями концепции Глобальной информационной системы. Вместе с тем, остается много неисследованных или слабо исследованных научных и технологических задач, решение которых являются актуальными уже после внедрения той или иной технологии. Так оказалась нерешенной задача надежного функционирования в гибридных сетях, состоящих из мобильной и стационарной компоненты. В частности, в этих сетях отмечается недопустимо большое возрастание джиттера по причинам независимо возникающим в одной и в другой сети. В результате подготовки диссертационных исследований была поставлена и решена научная задача разработки метода повышения качества обслуживания на стыке мобильной и стационарной сети на основе оптимизации потокового агента. В результате решения этой задачи получены следующие результаты и выводы:

1. В результате анализа характерных режимов работы существующих методов компенсации джиттера оказалось, что классические методы имеют значительные ошибки оценки так, как статистика процессов задержки пакетов в гибридных сетях существенно нестационарна в связи с появлением в произвольные моменты времени выбросов и скачков задержки. При этом значительно возрастает априорная неопределенность статистики джиттера.
2. Случайные изменения джиттера могут быть описаны случайным законом с нормальным распределением вероятностей. Нормальность закона обуславливается множеством причин формирующих эту случайность, что дает основания использовать результаты централь-

ной предельной теоремы. Нормальный закон изменения джиттера не является однородным, а представляет собой засоренную модель. К факторам засорения следует отнести наличие скачков и выбросов задержки. Наличие указанных засоренностей приводит к соответствующим ошибкам при применении классических методов обработки.

3. В работе предложено две различные математические модели задержки пакетов в гибридных сетях. Первая модель представляет собой джиттер в виде случайной величины и может быть использована для стационарных условий работы сети. В условиях нестационарности целесообразно использовать модели, представленные в виде пространства состояний, что дает возможность рассмотрения динамического процесса, адаптации модели к изменению статистики, получению рекурсивных алгоритмов оценки задержки и управления компенсацией джиттера задержки.
4. В условиях априорной неопределенности для обработки джиттера (оценки и управления) применение параметрических методов оказывается нежелательным и неэффективным, поскольку из-за высокого уровня априорной неопределенности возможное параметрическое решение связано с большой размерностью решаемой задачи, потерей устойчивости и снижением качества оценки. Более приемлемым является использование робастных непараметрических методов, которые, как правило, при прочих равных условиях не уступают параметрическим методам.
5. Разработаны и предложены методы формализации наблюдения джиттера на основе алгоритма Хьюберта, что дало возможность представления засоренного процесса в одном алгоритме, включая как выбросы, так и скачки.
6. С использованием теоремы о разделении синтезировано метод управ-



ления наблюдением джиттера. Алгоритм управления реализован на основе оценки комплексного вектора весового коэффициента, который обеспечивает коррекцию фазы в методе управления буфером компенсации джиттера.

7. В соответствии с предложенными моделями разработан метод оценки и управления джиттером для модели, представленной в виде случайной величины, с использованием робастных алгоритмов на основе функции правдоподобия. Для математической модели, представленной случайным процессом в пространстве состояний, предложено использовать робастный рекурсивный алгоритм Калмана-Бьюси. Сравнительный анализ показал, что в условиях наличия скачков и выбросов у классических алгоритмов появляется неустойчивый режим, и имеют место значительные ошибки. Робастные алгоритмы в этих условиях работают устойчиво, кроме того у робастных алгоритмов время сходимости к установившемуся состоянию после скачка или выброса на порядок меньше, чем у классических методов.
8. Сформулированы рекомендации по практическому применению разработанного метода компенсации джиттера в сетях LTE. В качестве платформы для внедрения буфера компенсации джиттера предложено использовать потоковые агенты, размещенные на границе между проводной и беспроводной сетью. 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. Основными преимуществами использования данной концепции в качестве платформы для внедрения предварительного буфера компенсации джиттера являются:

- повышение качества передачи речи в гибридных сетях;
- выполнение предварительной компенсации джиттера в гибридных сетях и тем самым упрощение задачи буфера на конечных устройствах;
- внедрение концепции потоковых агентов в сети LTE позволяет использовать другие полезные функции для мультимедийного трафика.

9. Результаты диссертационной работы могут найти применение в современных сетях и сетях следующих поколений. Наибольший эффект от применения потоковых агентов ожидается с внедрением технологии LTE-Advanced.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Закон України «Про зв'язок» // Верховна Рада України. 1995. № 160/95-ВР.
2. Закон України «Про телекомунікації» // Верховна Рада України. 2003. № 1280-IV.
3. 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.
4. Роковой А.П. Способ адаптивного регулирования джиттера буфера в VoIP // Весник НТУУ «КПИ» Информатика, управление и вычислительная техника. 2013. № 55. С. 199–204.
5. Recommendation ITU-T G.114 (05/03). One-way transmission time.
6. Методы научных исследований в телекоммуникациях. В 2-х томах. Т. 1.: учебное пособие / под ред. В.В. Поповского. Харьков: СМИТ, 2013. с. 390.
7. Поповский В.В., Ощепков М.Ю., Кобрин А.В. Алгоритмы предварительной компенсации джиттера при передачи потокового видео в беспроводных сетях // Вестник ДУИКТ. 2012. Т. 10, № 1. С. 11–18.
8. 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.
9. Кобрин А.В., Тур Б.С. Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана // Весник НТУ «ХПИ». 2013. № 33. С. 108–113.
10. Кобрин А.В. Адаптивный буфер компенсации джиттера задержки прибытия пакетов на основе робастного фильтра Калмана // Пробле-

- мы 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.
11. Кобрин А.В. Синтез алгоритма адаптивного буфера компенсации джиттера задержки прибытия пакетов // Сборник научных работ ДонИЖТ. 2013. № 34. С. 38–48.
  12. Кобрин А.В. Использование streaming agent для мониторинга и оптимизации качества потокового видео в 3G сетях // 15-ый международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". Т. 4. Сб. науч. трудов — Харьков:ХНУРЭ, 2011. С. 39–40.
  13. Поповский В.В., Кобрин А.В. Использование потоковый агентов для мониторинга и управления качеством потокового видео в сетях WiMAX // 4-ый международный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ 2011). Т. 2. Сб. науч. трудов — Харьков:ХНУРЭ, 2011. С. 105–108.
  14. Поповский В.В., Кобрин А.В. Методика использования программного пакета XDSL Simulator для оценки скоростного потенциала абонентских линий ADSL2+ для передачи IPTV // 14-й Международный молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". Т. 1. Сб. науч. трудов — Харьков:ХНУРЭ, 2010. с. 150.
  15. Popovski V., Kobrin A. Jitter is smoothed use buffer based on filter Kalman-Bucy // 12th International Conference "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)". 2013.
  16. Куроуз Д.Ф., Росс К.В., Кузнецов А. Компьютерные сети: Многоуровневая архитектура Интернета. Санкт-Петербург:Питер, 2004. с. 765.
  17. 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.

18. 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.
19. Бабин А.И. Конвергенция стационарной и мобильной связи: взгляд в будущее // Фундаментальные исследования. № 6. С. 124–127.
20. Recommendation IR.92. IMS Profile for Voice and SMS V4.0.
21. Recommendation IR.94. IMS Profile for Conversational Video.
22. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/11). Network performance objectives for IP-based services.
23. Recommendation ITU-T G.1020 (11/03). Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks.
24. Sue B. Moon, Jim Kurose, Don Towsley. Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms // Multimedia Systems. 1998. № 6. С. 17–28.
25. Ramjee R., Kurose J., Towsley D. Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks // INFOCOM 94. 1994. Vol. 2. P. 680–688.
26. Alan Clark. Analysis, measurement and modeling of Jitter // Telchemy Incorporated. 2003.
27. Клёкис Э.А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для помех, содержащих выбросы // Труды Академии наук Литовской ССР. Серия Б. 1985. С. 85–91.
28. Friis H.T. A Note on a Simple Transmission Formula // Proceedings of the IRE. 1946. Vol. 34. P. 254–256.
29. Recommendation R1-081483. Conveying MCS and TB size via PDCCH.
30. Recommendation 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).

31. Рэнди Бекер. Тестирование LTE-приемника: ключевые факторы ухудшения распространения сигнала // ИКС. 2010. № 01-02. С. 82 –83.
32. Masreliez C. Approximate non- Gaussian filtering with linear state and observation relations // IEEE Transactions on Automatic Control. 1975. Vol. 20, no. 1. P. 107–110.
33. Masreliez C.J., Martin R.D.
34. Ершов А.А., Липцер Р.Ш. Робастный фильтр Калмана в дискретном времени // Автоматика и телемеханика. 1978. № 3. С. 60–69.
35. Ершов А.А. Робастные алгоритмы фильтрации // Автоматика и телемеханика. 1978. № 7. С. 68–73.