

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
РАЗДЕЛ 2. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЗАДЕРЖКИ	42
2.1. Анализ причин джиттера в проводной сети . . . . .	43

2.1.1.	Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 1)	43
2.1.2.	Перегрузка в локальной сети (тип 2) . . . . .	43
2.1.3.	Перегрузки в канале доступа (тип 3) . . . . .	44
2.1.4.	Распределение нагрузки между несколькими линиями доступа или сервис-провайдерами (тип 1) . . . . .	45
2.1.5.	Распределение нагрузки (тип 1) . . . . .	45
2.1.6.	Неравномерное внутреннее разделение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1) . . . . .	46
2.1.7.	Влияние высокоприоритетного служебного трафика на менее приоритетный (тип 2) . . . . .	46
2.2.	Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE	47
2.2.1.	Хэндовер . . . . .	48
2.2.2.	Изменение расстояния между абонентом и базовой станцией . . . . .	49
2.2.3.	Внутрисистемные помехи . . . . .	51
2.2.4.	Замирания в канале . . . . .	57
2.3.	Синтез математической модели процесса задержки . . . . .	65
2.4.	Выводы ко второму разделу . . . . .	68
РАЗДЕЛ 3. СИНТЕЗ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА ДЛЯ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ		70
3.1.	Обзор методов оценки джиттера . . . . .	70
3.1.1.	Обзор метода оценки джиттера в стационарном состоянии . . . . .	70
3.1.2.	Рекурсивные методы оценки джиттера . . . . .	73
3.1.3.	Фильтр Калмана-Бьюси (ФКБ) . . . . .	75
3.2.	Синтез алгоритма ФКБ в различных условиях априорной неопределенности . . . . .	76

3.2.1.	Алгоритм фильтрации для известной последовательности мест выбросов и дисперсии процесса выбросов .	76
3.2.2.	Алгоритм фильтрации для известной вероятности появления выбросов и известной дисперсии процесса выбросов . . . . .	77
3.2.3.	Алгоритм фильтрации, требующий информацию о характеристиках процесса выбросов . . . . .	77
3.2.4.	Алгоритм фильтрации, не требующий информации о вероятности появления и амплитудах выбросов. . . .	79
3.3.	Обзор робастных алгоритмов фильтрации на основе фильтра Калмана для случайных процессов, содержащих выбросы и скачки . . . . .	81
3.4.	Обзор методов выбор высоты отсечения $b$ . . . . .	84
3.5.	Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для случайных процессов джиттера, содержащего выбросы и скачки . .	86
3.6.	Выводы по третьему разделу . . . . .	90
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ БУФЕРОМ КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА		93
4.1.	Анализ методов оптимального управления . . . . .	95
4.1.1.	Управление состоянием системы . . . . .	95
4.1.2.	Управление наблюдением системы . . . . .	97
4.2.	Синтез метода управления буфером компенсации джиттера на основе управления наблюдением системы . . . . .	99
4.3.	Синтез метода управления буфером компенсации джиттера на основе оценки джиттера ГРФКБ . . . . .	104
4.4.	Выводы по четвертому разделу . . . . .	105
РАЗДЕЛ 5. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО БУФЕРА КОМПЕНСАЦИИ		

ДЖИТТЕРА С ОСНОВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЖИТТЕРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ	107
5.1. Описание имитационного эксперимента по исследованию джит- тера в сетях LTE . . . . .	108
5.1.1. Обзор архитектуры LTE модели в сетевом симуляторе NS3 . . . . .	110
5.1.2. Обзор архитектуры EPC модели в сетевом симуляторе NS3 . . . . .	111
5.2. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в си- туации изменения маршрута передачи пакетов . . . . .	118
5.3. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в си- туации хэндовера между базовыми станциями . . . . .	120
5.4. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в си- туации перегрузки в сети . . . . .	121
5.5. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в си- туации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE . . . . .	122
5.6. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в си- туации внутрисистемных помех . . . . .	126
5.7. Анализ эффективности работы предложенного буфера ком- пенсации джиттера по сравнению с классическим буфером .	127
5.8. Использование концепции потоковых агентов, качестве плат- формы для предварительной компенсации джиттера в LTE .	131
5.9. Выводы к пятому разделу . . . . .	133
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	135
Список используемых источников	139

## 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 пакетов 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. Разработаны 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.

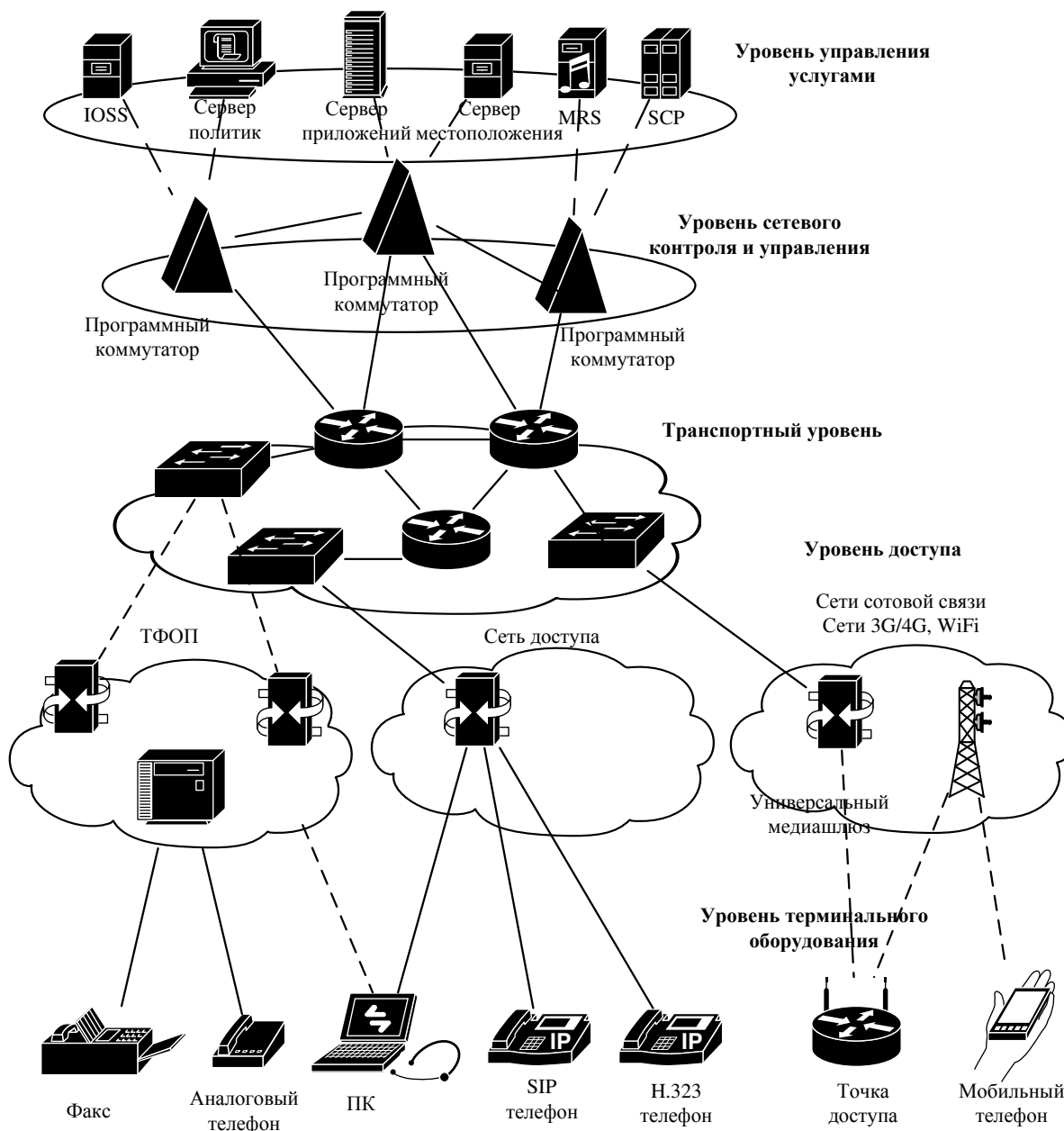


Рис. 1.1: Архитектура сети NGN

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

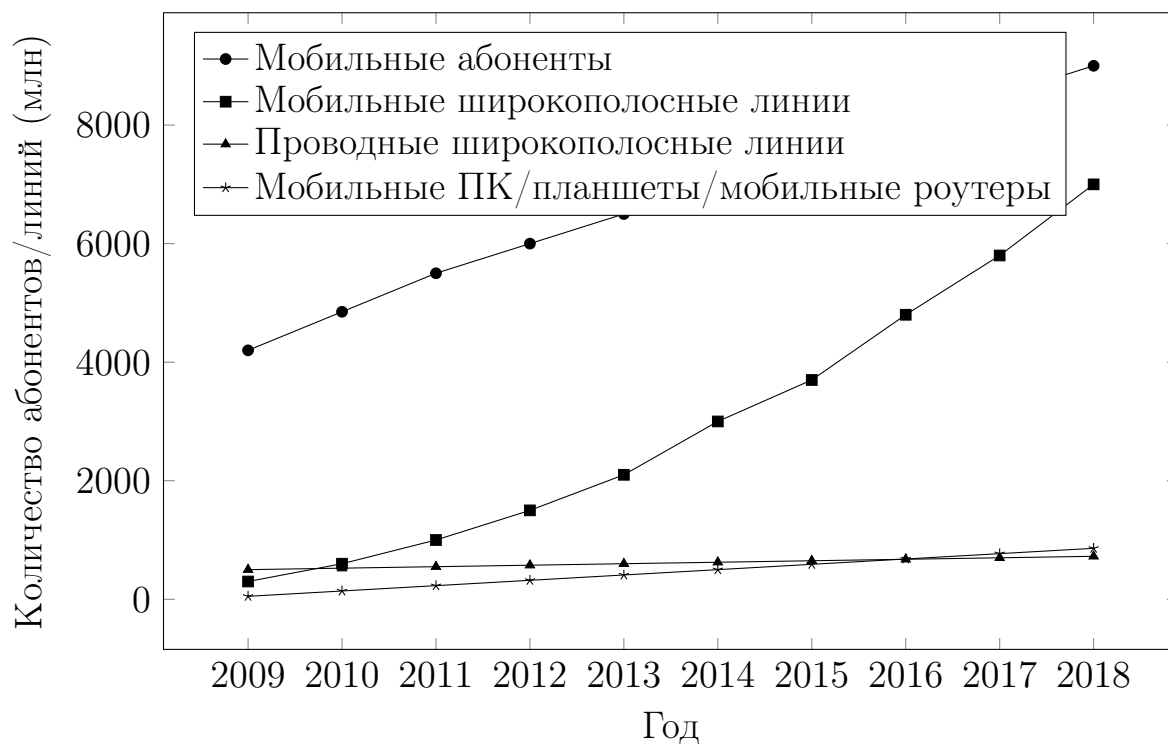


Рис. 1.2: Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [3]

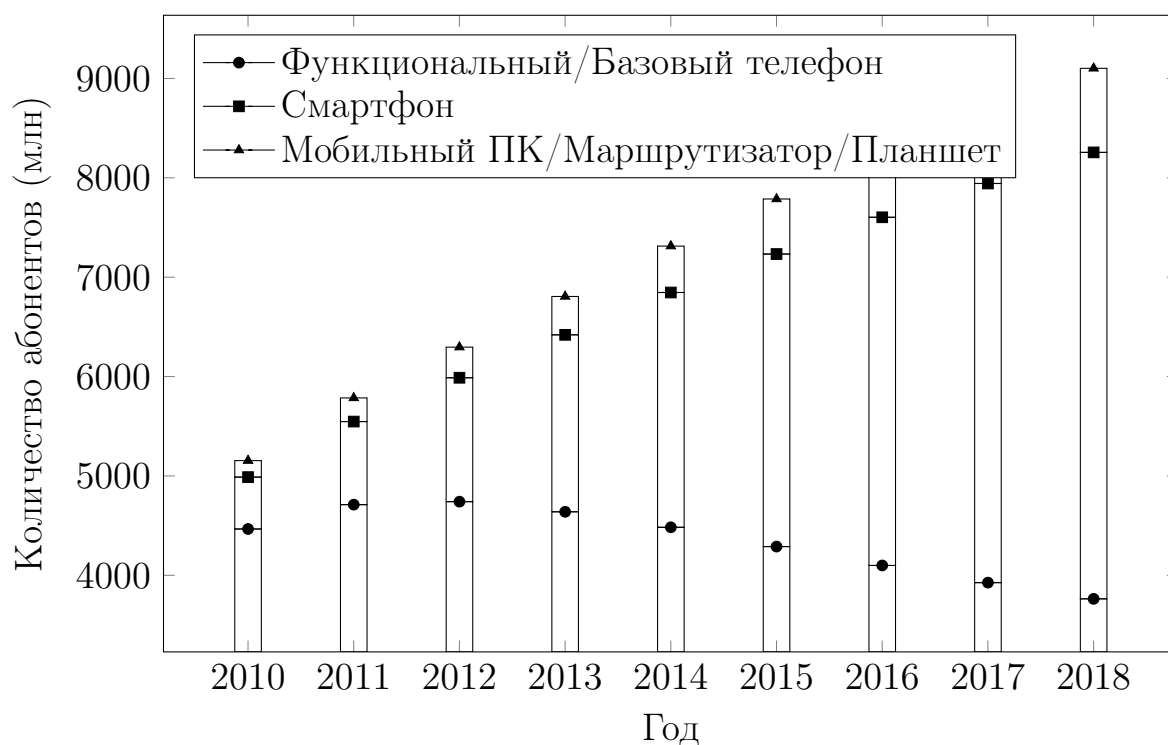


Рис. 1.3: Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [3]

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

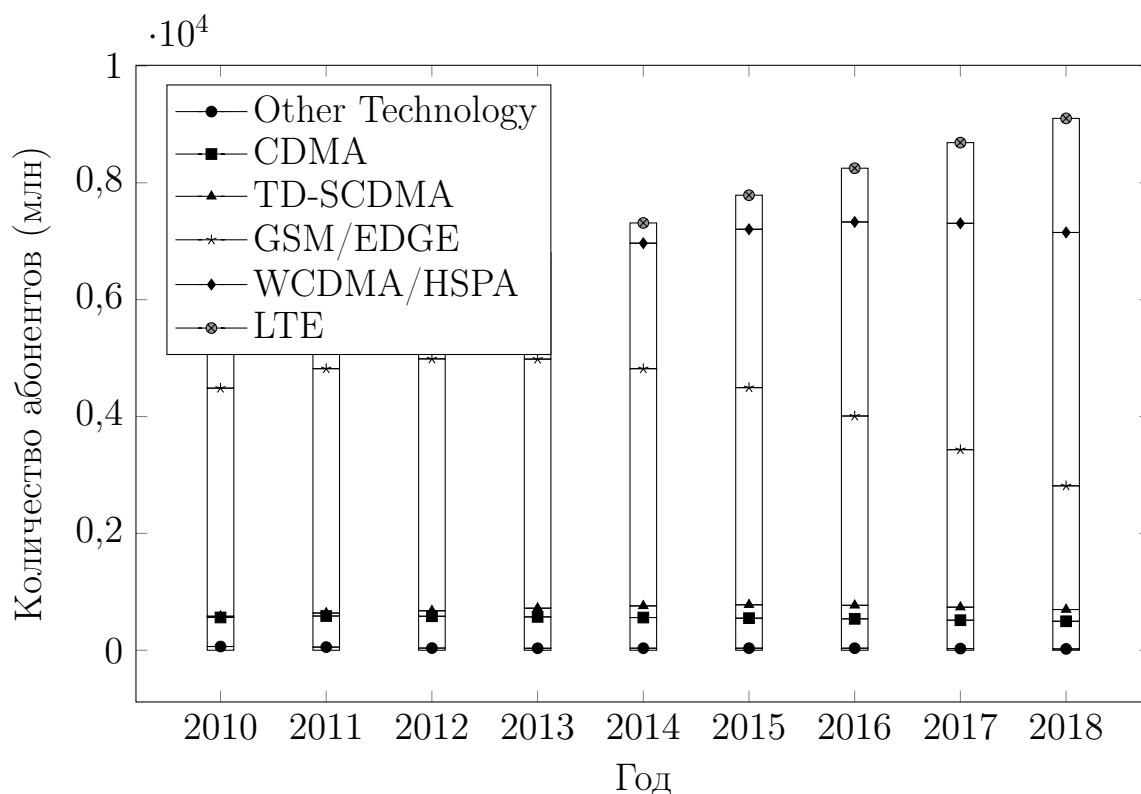


Рис. 1.4: Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [3]

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

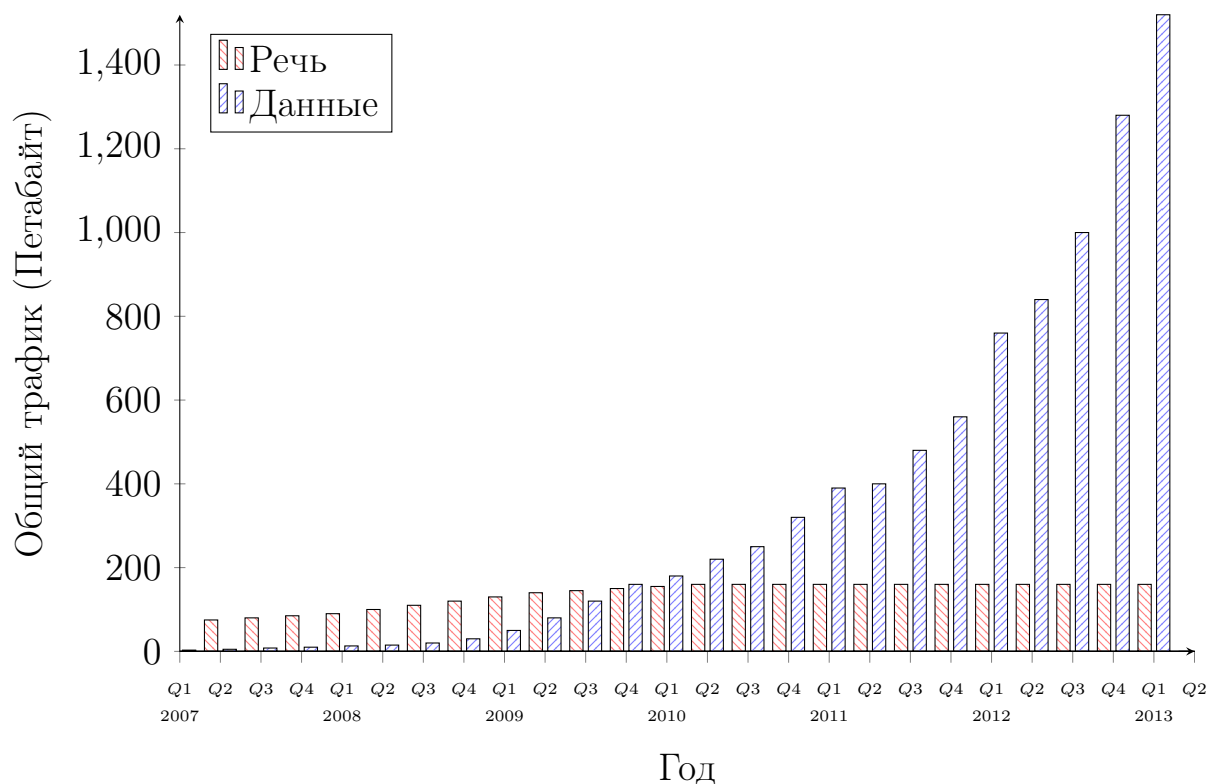


Рис. 1.5: Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [3]

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.

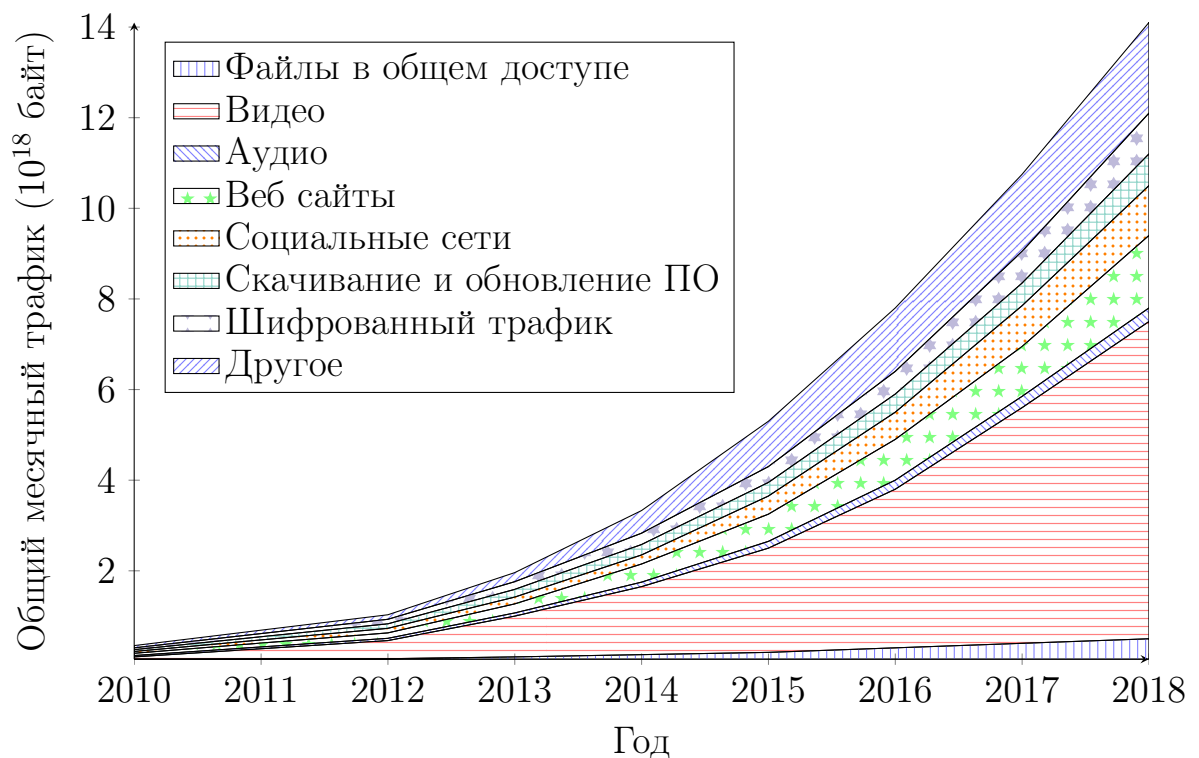


Рис. 1.6: Глобальный трафик, разбитый по приложениям, 2010-2018 [3]

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.

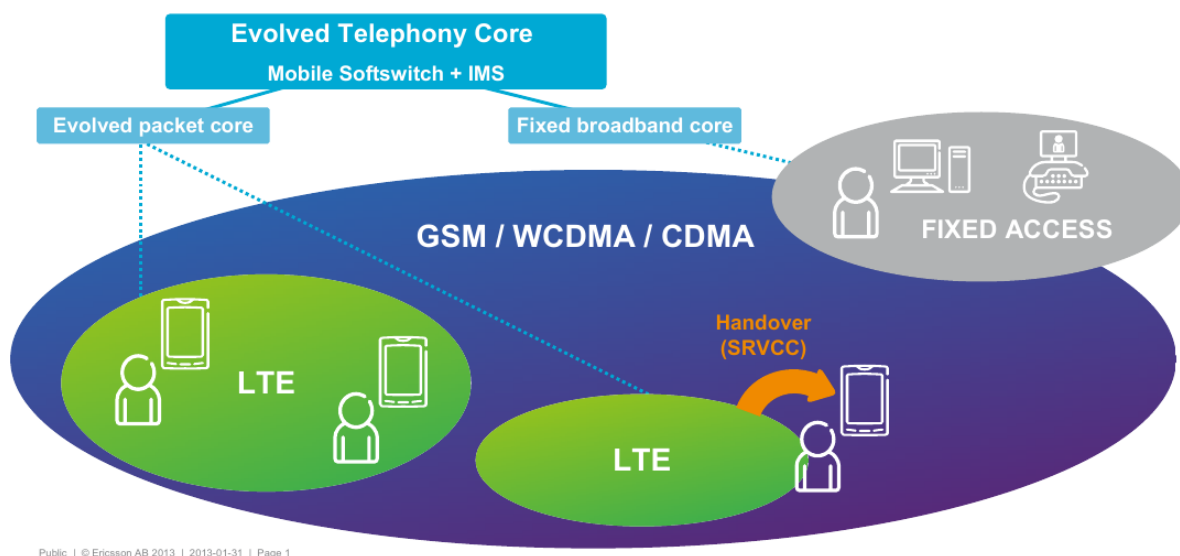


Рис. 1.7: Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [17]

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.

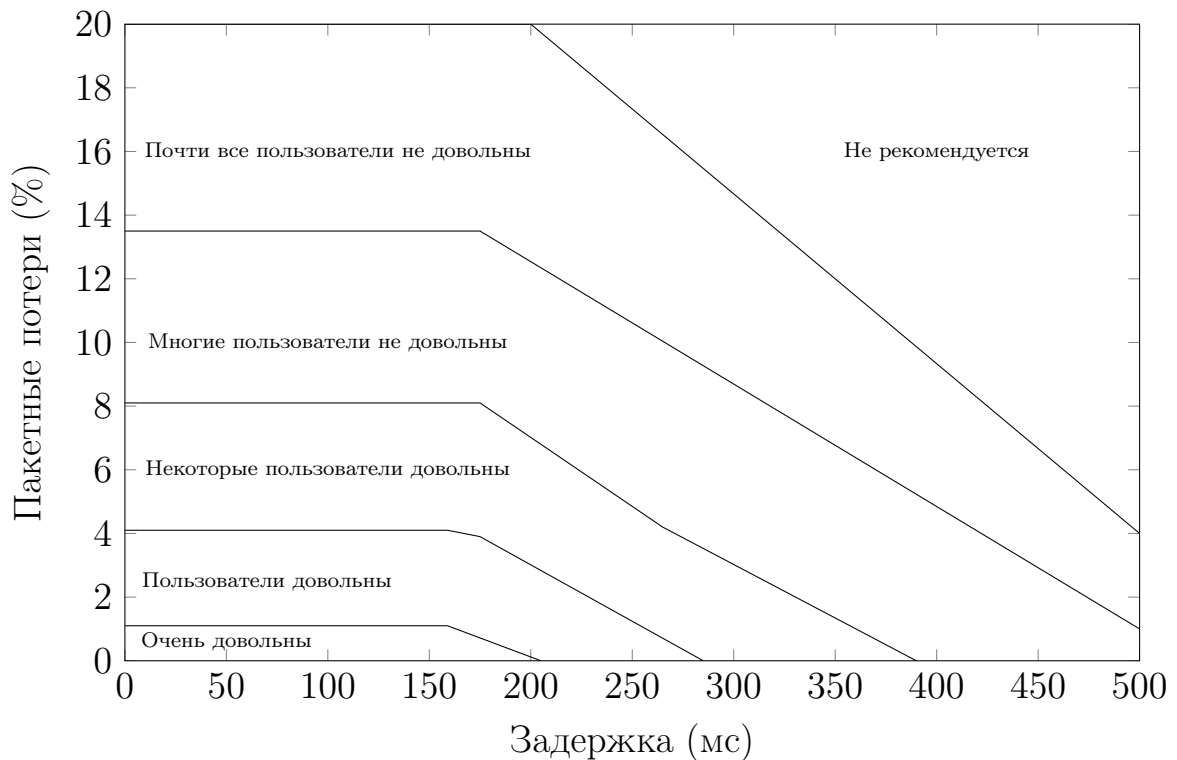


Рис. 1.8: Контуры качества передачи речи G711 с PLC

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.

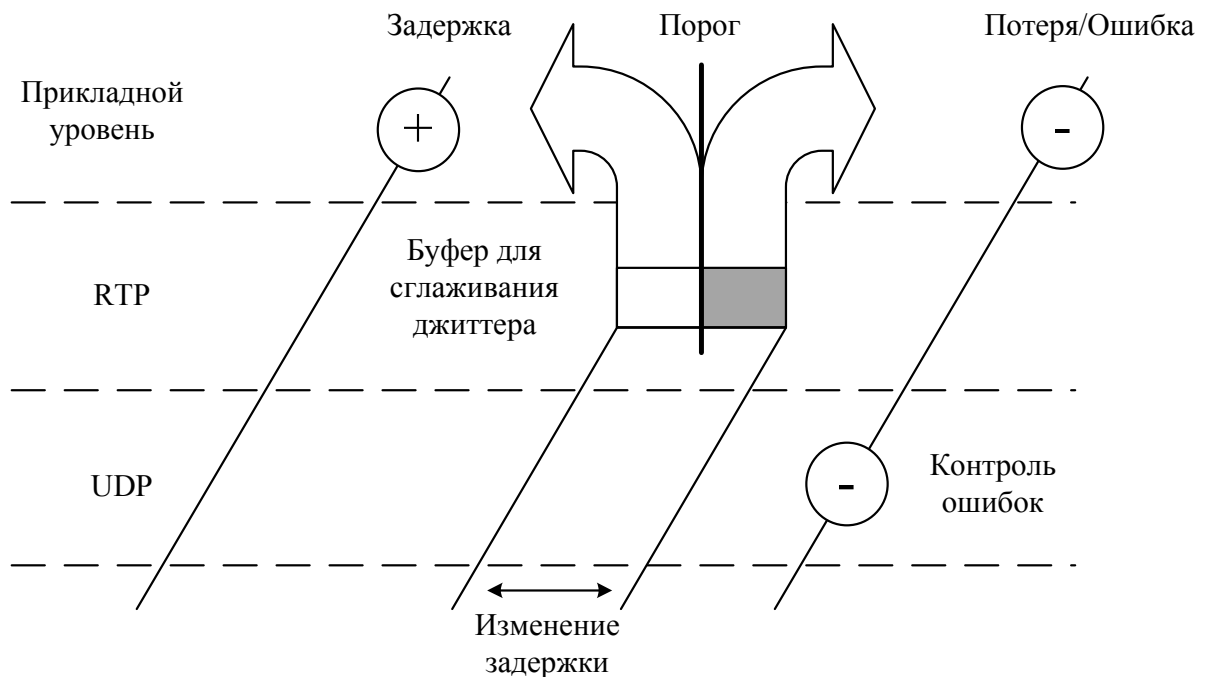


Рис. 1.9: Алгоритм обработки сетевых пакетов

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 прибудет до их времени воспроизведения и тем лучше будет компенсация джиттера. В тоже время, длительные задержки нежелательны, так как они ухудшают интерактивность человеческого общения. Отметим, что человеческое ухо терпимо относится к максимальным задержкам от 150 до 400 миллисекунд [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.

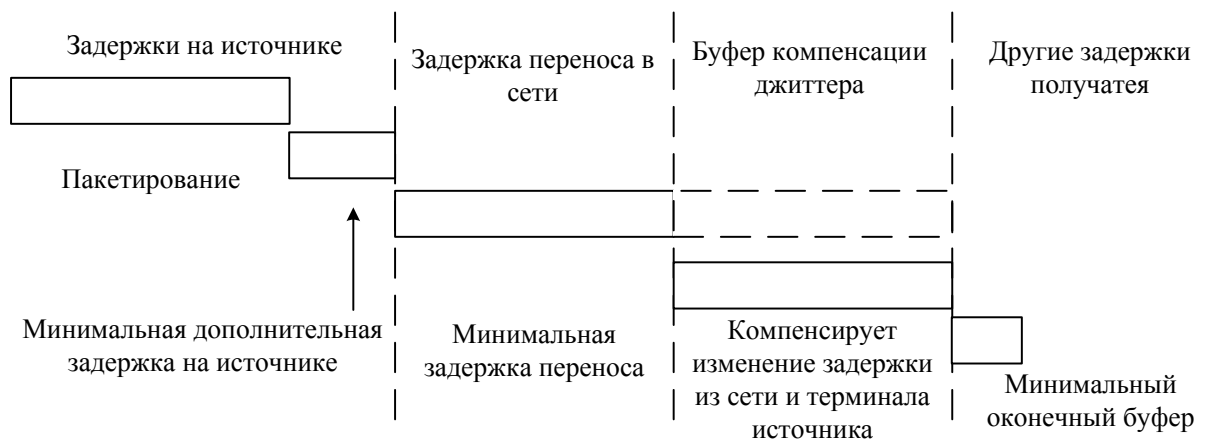


Рис. 1.10: Задержка в пакетных сетях и сетевых элементах

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 / переполнения / антипереполнения	Оценить коэффициент потерь (конфигурировать приемлемый наименьший порог и минимальный счет пакетов между подстройками)
	Подстройка	Синхронизированная	Только в промежутках молчания
	Инициализация	Первый пакет	Малая выборка
	Неравномерность подстройки	Размер пакета	Дробная часть пакета

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.

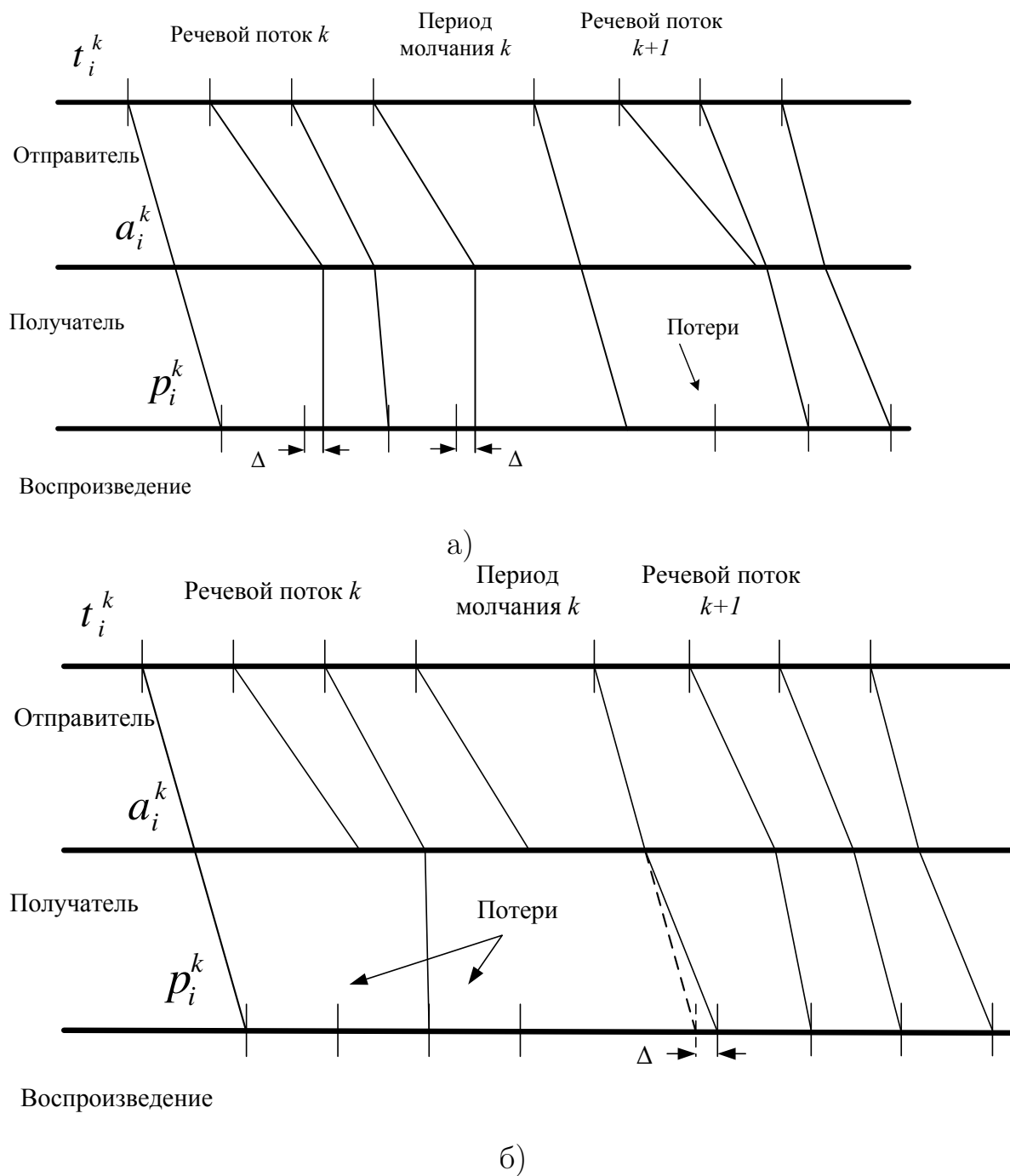


Рис. 1.11: Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками

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 уменьшиться 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.

## РАЗДЕЛ 2

### СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЗАДЕРЖКИ

Выделяют три типа джиттера [26], которые могут быть вызваны различными причинами (рис. 2.1).

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

Различные типы джиттера, являются следствием различных сетевых ситуаций. В этом разделе будут рассмотрены основные причины возникновения различных типов джиттера в проводной и беспроводной сети. Для более простой записи в дальнейшем вместо названия типов джиттера, опре-

---

<sup>1</sup>Под термином выброс задержки понимается увеличение задержки единичного пакета в потоке. В этом случае распределение вероятностей задержек имеет более «тяжелые хвосты» по сравнению с нормальным распределением [27]

<sup>2</sup>Под термином скачек задержки понимается увеличение или уменьшение задержки целого ряда пакетов в потоке [26]

деленных выше, будем использовать «тип 1», «тип 2» и «тип 3» соответственно.

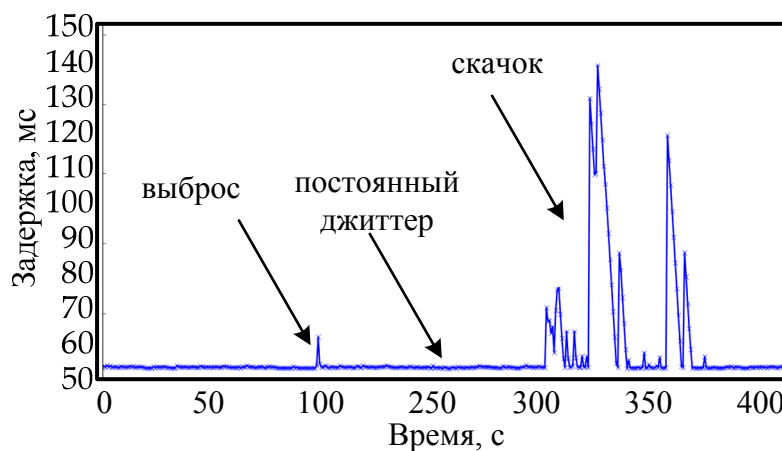


Рис. 2.1: Основные типы джиттера пакетной задержки

## 2.1. Анализ причин джиттера в проводной сети

### 2.1.1. Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 1)

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

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

Хотя средняя загрузка локальной сети обычно не высокая, локальные перегрузки происходят в течение короткого периода времени. В худшем случае, изменение задержки ограничено максимальным временем повторной попытки использовать сеть Ethernet, а в некоторых системах, также ограничено межпакетным интервалом. Если VoIP оконечное устройство не было в состоянии получить доступ к локальной сети в течение максималь-

ного времени отсрочки или до запланированного момента передачи следующего пакета, то пакет может быть отброшен. В случае 100 Мбит Ethernet максимальное время отсрочки находится в диапазоне миллисекунд и, следовательно, не должны быть основным источником джиттера. В случае 10 Мбит Ethernet максимальное время отсрочки значительно выше, чем временной интервал между голосовыми пакетами и, следовательно, джиттер может быть ограничен временным интервалом между пакетами (обычно около 10-30 мс). Перегрузки в локальной сети обычно приводят к выбросам задержки так, как если один пакет не получит доступ к сети и будет задержан, следующий пакет сразу может получить доступ к локальной сети (рис. 2.2) [26].

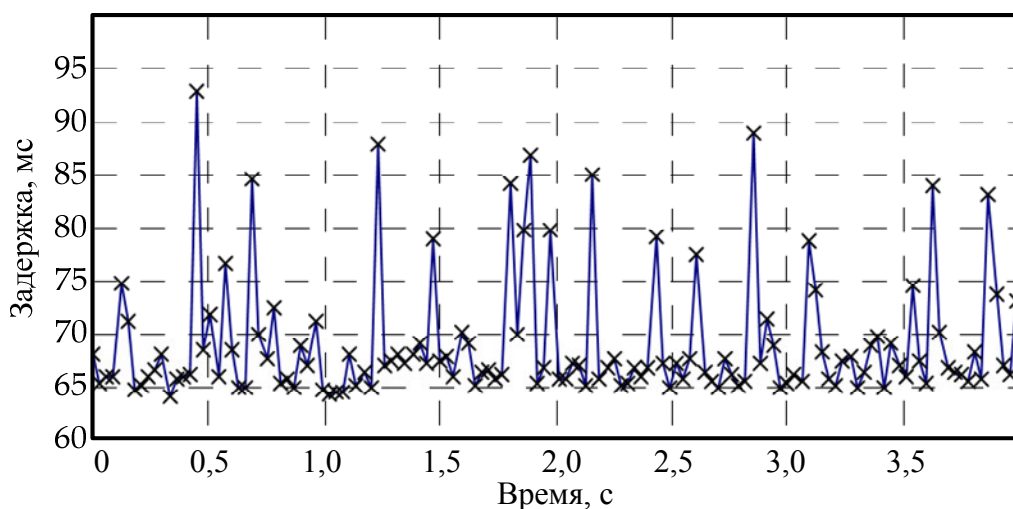


Рис. 2.2: Пример перегрузки в локальной сети

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

Доступ к каналу передачи, как правило, является одним из основных источников джиттера, поскольку представляет собой одно из узких мест на пути пакета (рис. 2.3) [26]. Например, задержка сериализации IP-пакета в 1500 байт, посланного через T1 (1,544Mbit), будет около 8 миллисекунд, поэтому если в очереди перед речевым пакетом находятся пять пакетов

данных, то вводится дополнительная задержка в 40 мс. Проблема перегрузок канала доступа может быть еще более серьезной в случае ISDN, ADSL или в случае кабельных модемов, у которых пропускная способность исходящего канала дополнительно ограничена, например, если пропускная способность исходящего канала составляет 384кбит/в секунду, то каждый 1500 байтовый IP пакет в очереди введет дополнительную задержку в 30 мс.

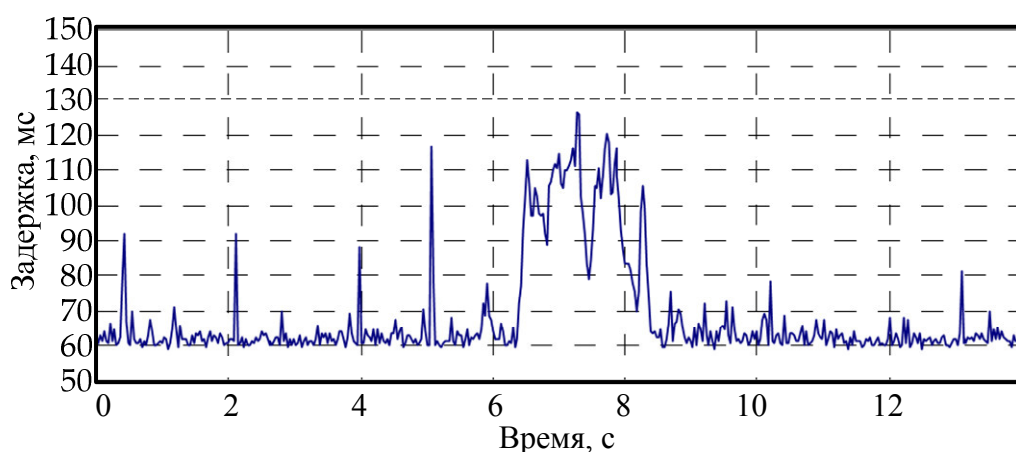


Рис. 2.3: Пример перегрузки сети доступа

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

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

#### 2.1.5. Распределение нагрузки (тип 1)

Некоторые сервис-провайдеры распределяют трафик через несколько внутренних маршрутов в пределах их сетей в целях повышения устойчиво-

сти и обеспечения более равномерной загрузки на сеть. Это вносит джиттер в результате разницы в задержке на каждом маршруте.

#### 2.1.6. Неравномерное внутреннее распределение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1)

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

#### 2.1.7. Влияние высокоприоритетного служебного трафика на менее приоритетный (тип 2)

Маршрутизаторы периодически генерируют трафик обновления с высоким приоритетом (рис. 2.4) [26] и выполняют обновления таблицы маршрутизации. Каждое такое событие может привести к задержке небольшого количества пакетов. Кроме того во время обновления таблицы маршрутизации могут существовать кратковременные петли, что может привести к чрезвычайно высокой задержке для отдельных пакетов (рис. 2.5) [26].

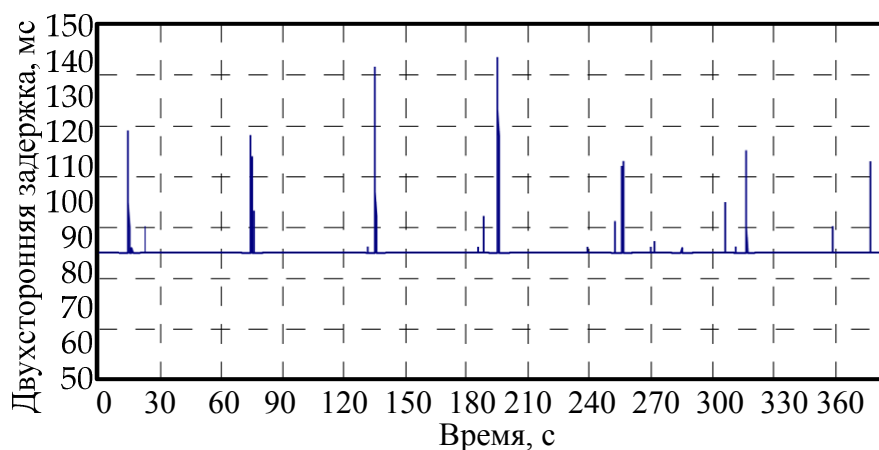


Рис. 2.4: Периодическое обновление таблицы маршрутизации без изменения маршрута

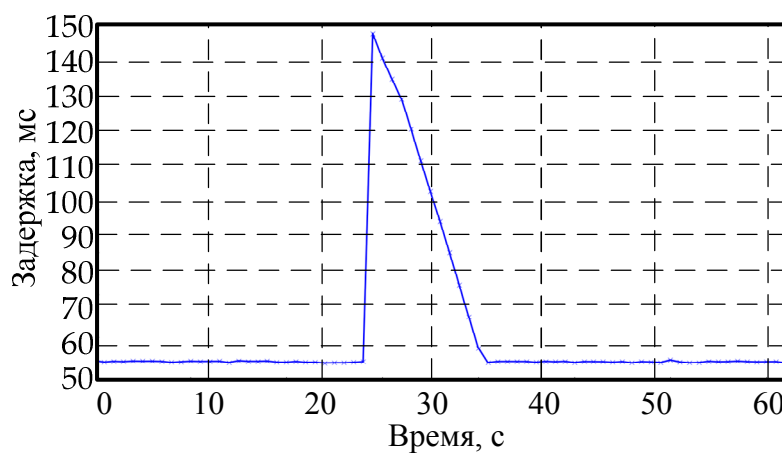


Рис. 2.5: Периодическое обновление таблицы маршрутизации при изменении маршрута

## 2.2. Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE

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

### 2.2.1. Хэндовер

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

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

Проведем моделирование влияния хэндовера на сквозную задержку в сети LTE в сетевом симуляторе NS3. На рис. 2.6 изображено изменение сквозной сетевой задержки прибытия пакетов из-за 3-х переключений сессии абонента между базовыми станциями, выполненными через некоторый промежуток времени. Также стоит заметить, что при первом установлении соединения задержка прибытия пакетов тоже была не стационарна.



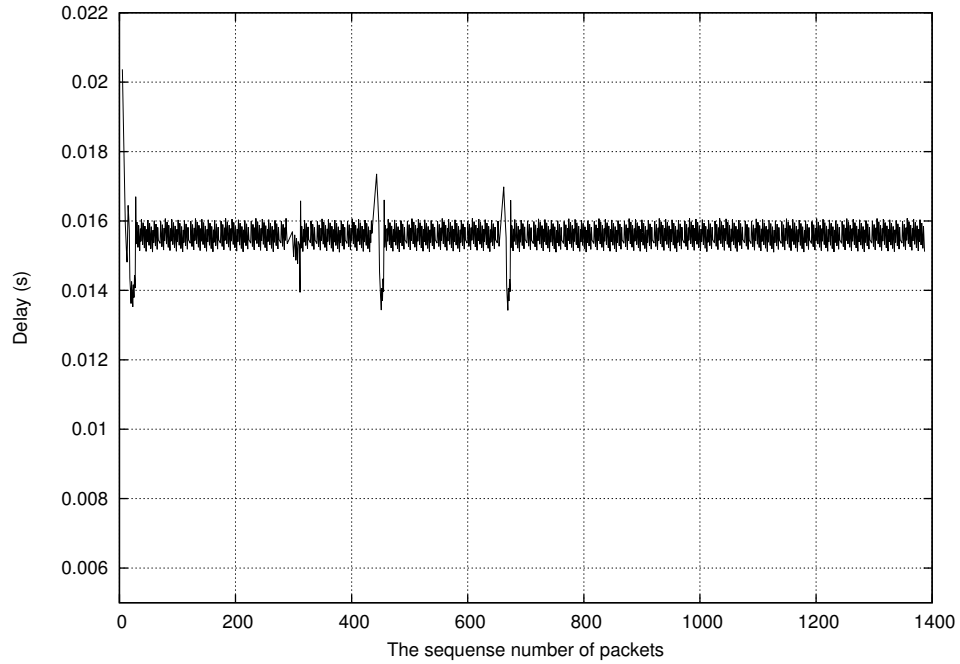


Рис. 2.6: Изменение задержки прибытия пакетов при хэндовере между базовыми станциями

### 2.2.2. Изменение расстояния между абонентом и базовой станцией

Проведем моделирование влияния расстояния между абонентом и базовой станцией на скорость передачи в канале сети LTE в сетевом симуляторе NS3.

Уравнение передачи для радиолинии протяженностью  $d$  [28]:

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

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

Для расчета пропускной способности канала воспользуемся спектраль-

ной эффективностью  $\eta_i$  из табл. 2.1 [29]. Которая рассчитывается по формуле:

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

$$\Gamma = \frac{-\ln(5 \times BER)}{1,5}, \quad (2.3)$$

$$BER = 0,00005. \quad (2.4)$$

Рассчитанная пропускная способность канала при ширине спектра канала 20МГц изображена на рис. 2.7 (г).

Таблица 2.1

**Соотношение спектральной эффективности ( $\eta_i$ ) к индексу MCS ( $I_{MCS}$ )**

Спектральная эффективность( $\eta_i$ )	$Q_m$	$R$	MCS индекс ( $I_{MCS}$ )
Reserved			0
0,15234375	2	0,076172	1
0,193359375	2	0,09668	2
0,234375	2	0,117188	3
0,305664063	2	0,152832	4
0,376953125	2	0,188477	5
0,489257813	2	0,244629	6
0,6015625	2	0,300781	7
0,739257813	2	0,369629	8
0,876953125	2	0,438477	9
1,026367188	2	0,513184	10
1,17578125	2	0,587891	11
1,326171875	4	0,331543	12
1,4765625	4	0,369141	13

Продолж. табл. 2.1

Спектральная эффективность( $\eta_i$ )	$Q_m$	$R$	MCS индекс ( $I_{MCS}$ )
1,6953125	4	0,423828	14
1,9140625	4	0,478516	15
2,16015625	4	0,540039	16
2,40625	4	0,601563	17
2,568359375	4	0,64209	18
2,73046875	6	0,455078	19
3,026367188	6	0,504395	20
3,322265625	6	0,553711	21
3,612304688	6	0,602051	22
3,90234375	6	0,650391	23
4,212890625	6	0,702148	24
4,5234375	6	0,753906	25
4,819335938	6	0,803223	26
5,115234375	6	0,852539	27
5,334960938	6	0,88916	28
5,5546875	6	0,925781	29
2,4	2	1,2	30
Reserved			31

### 2.2.3. Внутрисистемные помехи

Рассмотрим влияние всплесков внутрисистемных помех на характеристики канала передачи в сети LTE. Наличие этих помех определяет суть проблемы электромагнитной совместимости. Выброс внутрисистемных помех может быть вызван влиянием соседней базовой станции, которая работает в том же диапазоне.

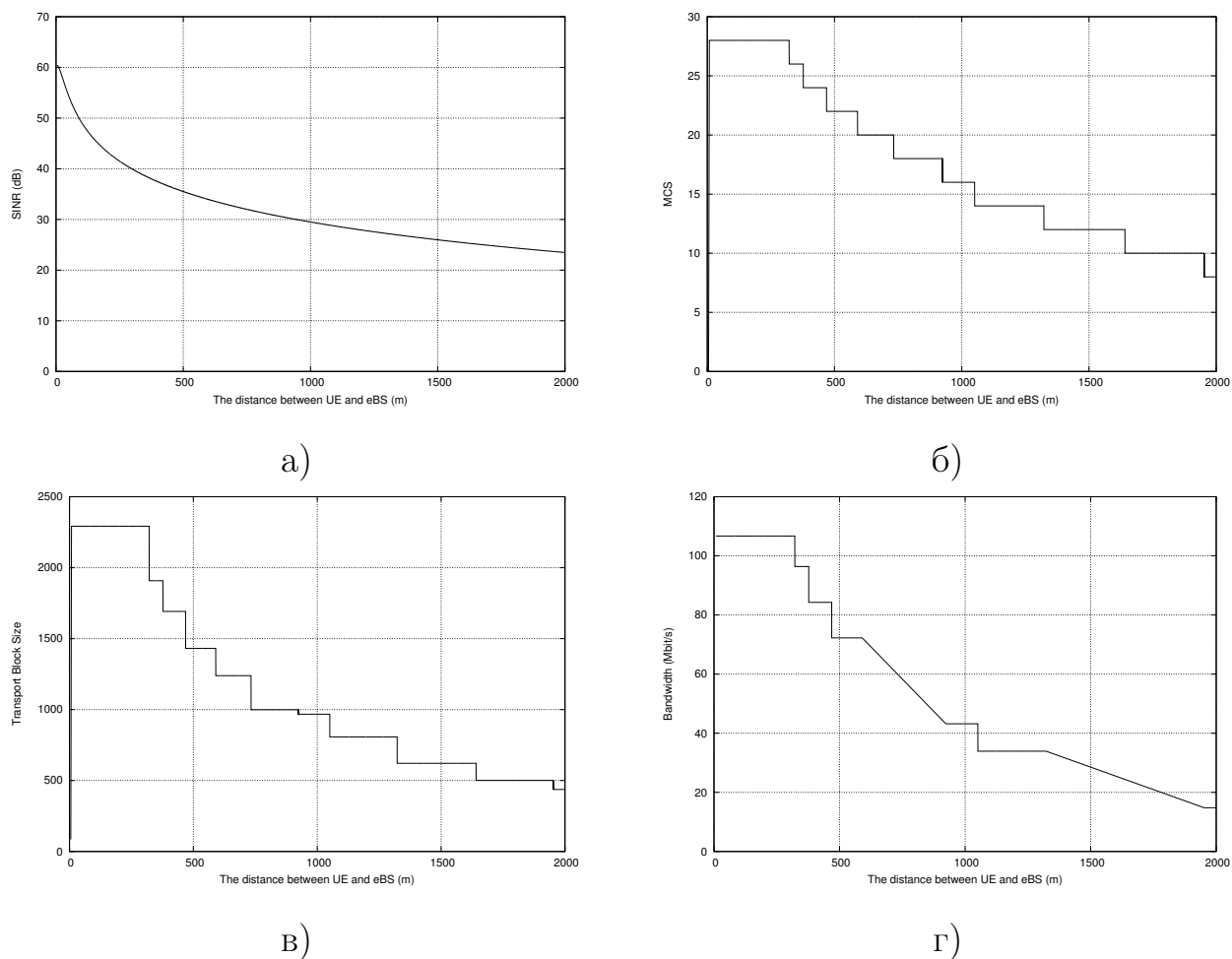


Рис. 2.7: Зависимость а) SINR б) MCS в) размера TBS г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и базовой станцией

Анализ показывает, что выбросы помех влияют на характеристики канала, в том числе на джиттер и потери пакетов. Для борьбы с внутри-системными помехами используются различные методы: уход на другую частоту, помехоустойчивое кодирование и перемежение. Тем не менее, с ухудшением условий распространения волны возникают блоковые ошибки. Это приводит к потере пакетов для IP услуг, таких как FTP и VoIP. В технологии LTE приходится использовать повторные передачи, чтобы потери пакетов не снижались ниже определенного уровня, однако эта мера может быть не достаточно эффективной, чтобы предоставить хорошее качество

для соответствующей услуги. В результате использования повторных передач появляется джиттер задержки. LTE передачи обычно планируются таким образом, чтобы быть синхронизированными с качеством канала. При этом пакеты передаются к и от пользователей, имеющих наилучшие канальные условия, а пользователи, которые испытывают провалы качества канала, будут ожидать пока условия канала не будут улучшены. Это означает, что пакеты в очереди передачи будут испытывать различные задержки из-за планирования. LTE также ограничивает количество повторных передач, чтобы избежать расхода слишком большого количества ресурсов передачи для тех пользователей, которые испытывают деградацию условий канала. Это означает, что потери пакетов могут происходить в дополнение к джиттеру задержки. Для услуг реального времени, характерно чтобы пакеты могли быть повторно переданы со сквозной задержкой до 50-100 мс. Пример задержек пакетов, которые могут произойти в присутствии внутрисистемных помех, показан на рис 2.8.

До воздействия внутрисистемной помехи пакеты передаются без или почти без джиттера. В этом примере предполагается, что постоянный джиттер отсутствует, чтобы выделить влияние помехи на задержку прибытия пакетов. На начальном этапе воздействия помехи пакеты обычно теряются. Это происходит из-за ограничений в планировании передачи пакетов и ограничений времени повторной передачи, как описано выше. Пакеты, сгенерированные в конце периода воздействия помехи, будут поставлены в очередь. Вероятней всего, отправка пакетов будет успешной только после окончания периода влияния помехи. Это может привести к большим задержкам этих пакетов. Вероятным следствием длительных задержек пакетов является то, что буфер компенсации джиттера отбросит пакеты, которые пришли слишком поздно. После периода воздействия помехи задержки пакетов медленно снижаются. Это потому, что пакеты, которые сгенерированы непосредственно после помехи еще ожидают в очереди передачи.

Передача вернется к нормальному состоянию, когда передатчик очистит очередь передачи. Скачок задержки после влияния помехи является довольно частым явлением в пакетнокоммутируемой сотовой сети, которая использует повторные передачи. Величина потерь пакетов и размер скачка задержки зависит как от помехи так и от того как система настроена.

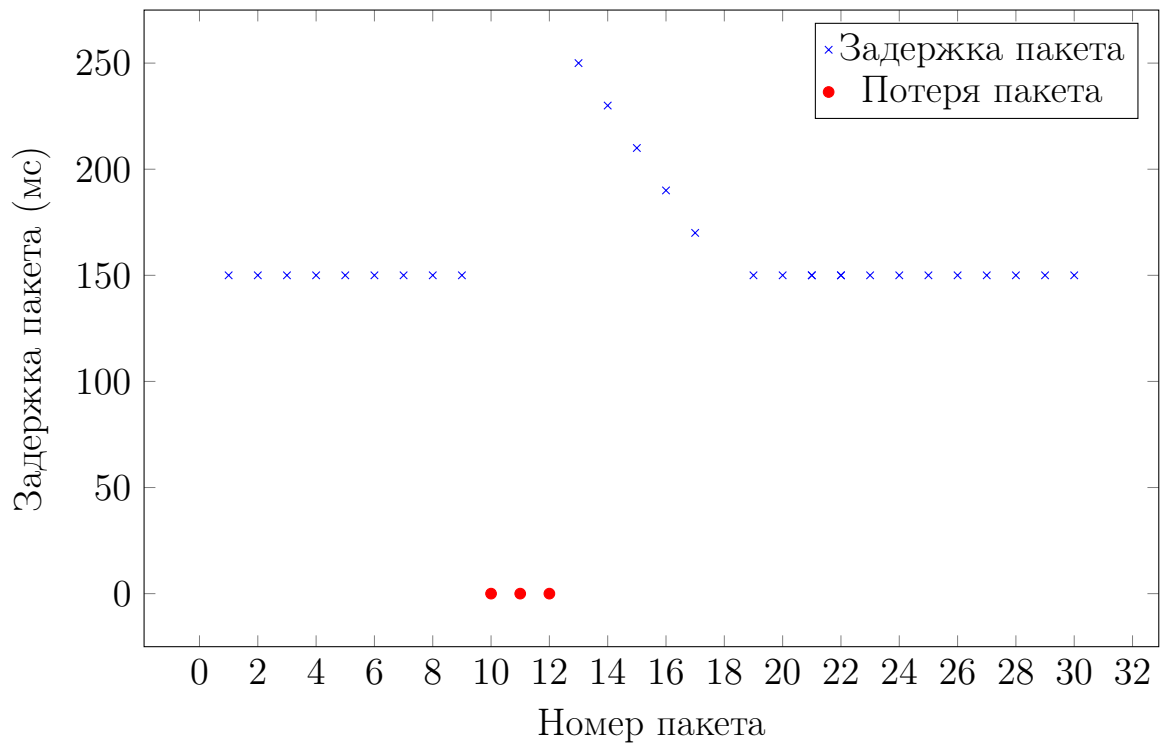


Рис. 2.8: Пример времени прибытия IP пакетов (крестообразные маркеры), потерь пакетов (круглые маркеры) и джиттера задержки в присутствии сильного всплеска внутрисистемных помех.

Проведем моделирование влияния внутрисистемных помех на параметры передачи пакетов в сети LTE. Схема моделирования в NS3 изображена на рис. 2.9. С уменьшением расстояния до источника помехи, мощность помехи увеличивается, и характеристики канала начинают деградировать, когда SINR достигает некоего критического уровня (рис. 2.10). Из рис. 2.11-2.12 видно, что чем больше скорость передачи потока, тем значительно увеличивается джиттер и пакетные потери из-за влияния внутрисистемной помехи.

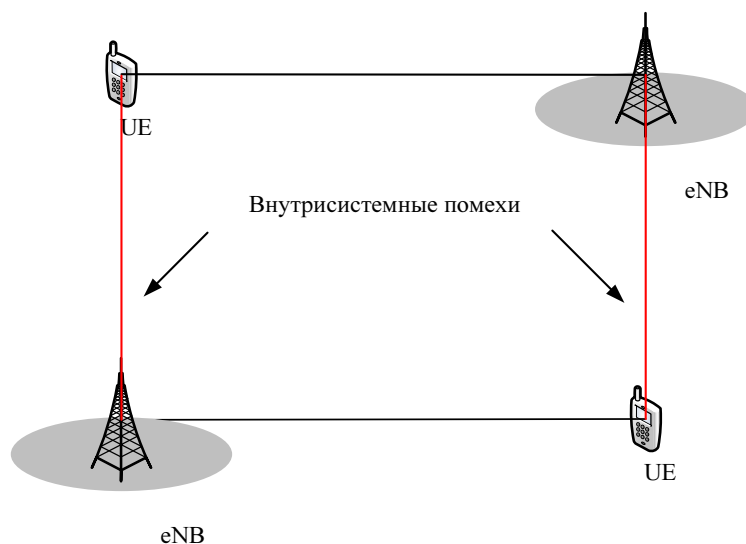


Рис. 2.9: Схема моделирования влияния внутрисистемных помех в NS3

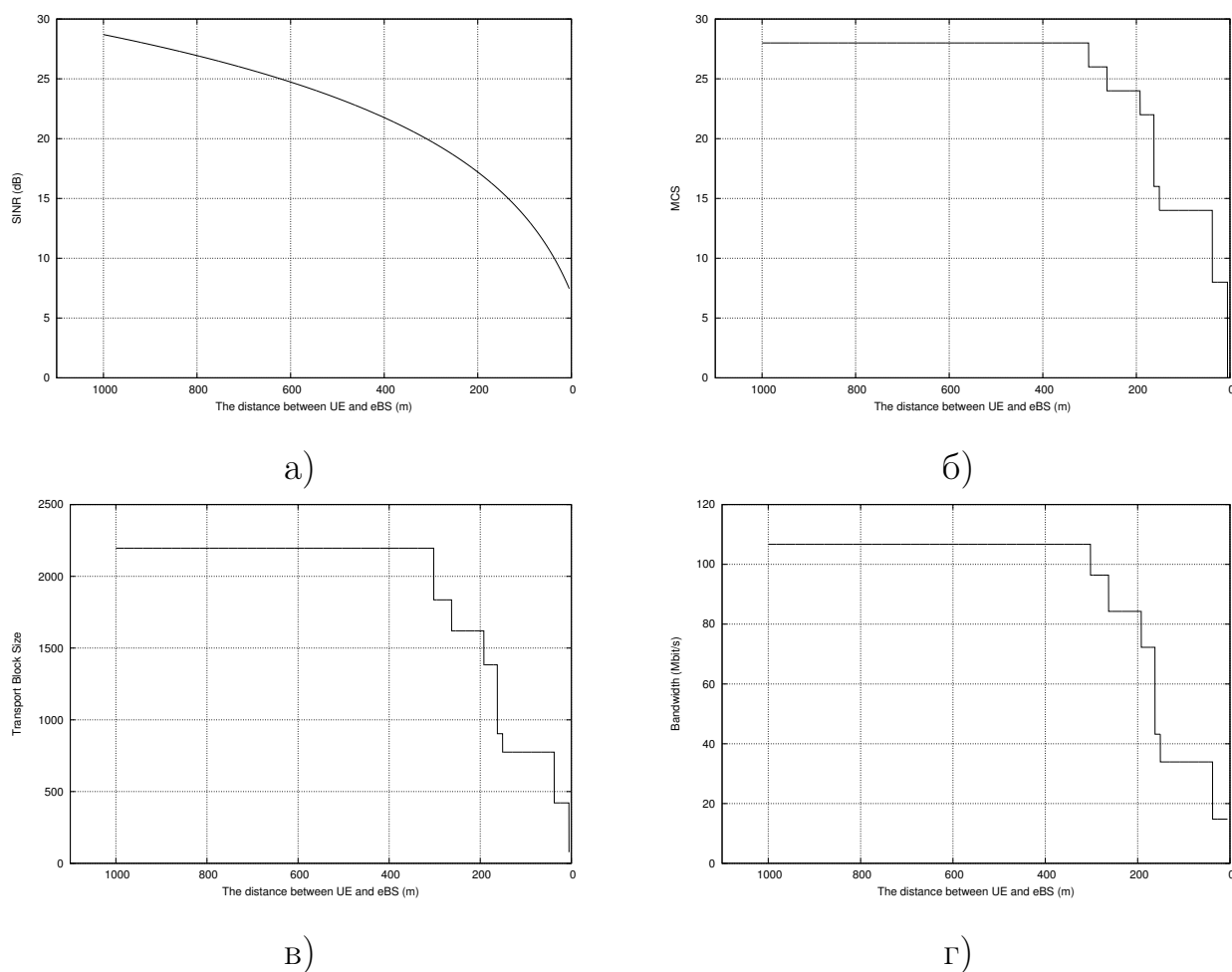


Рис. 2.10: Зависимость а) SINR б) MCS в) размера ТВ г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и помеховой базовой станцией

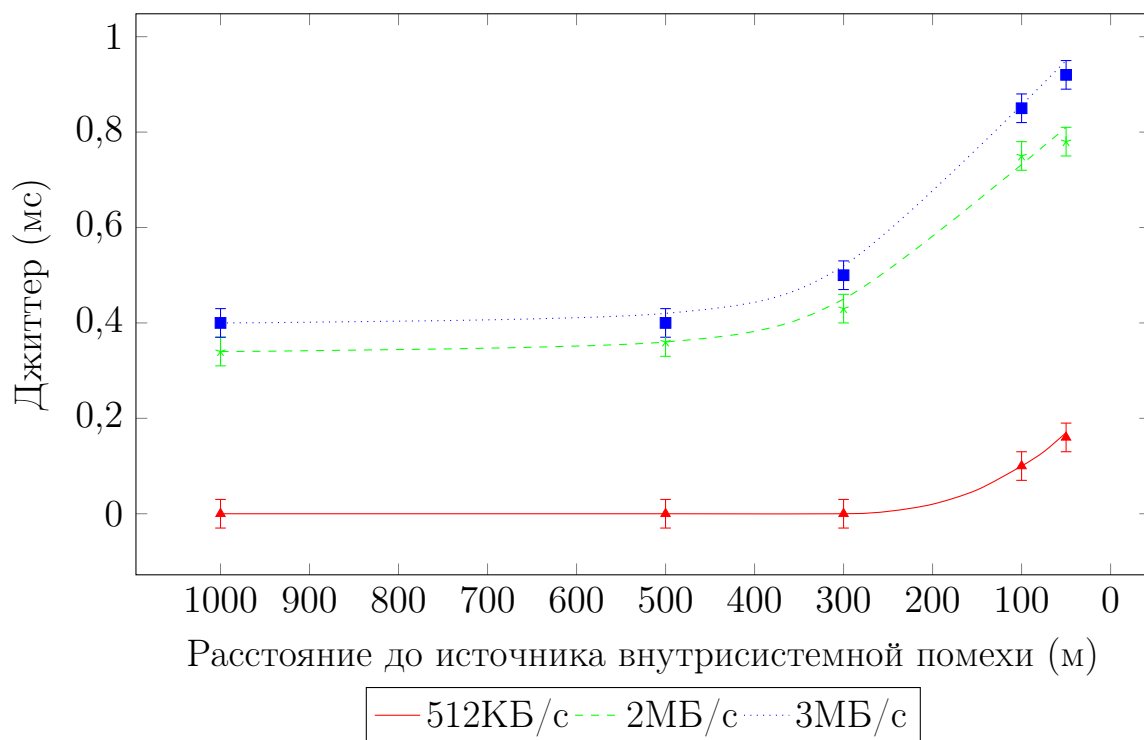


Рис. 2.11: Зависимость джиттера от расстояния до источника внутрисистемной помехи

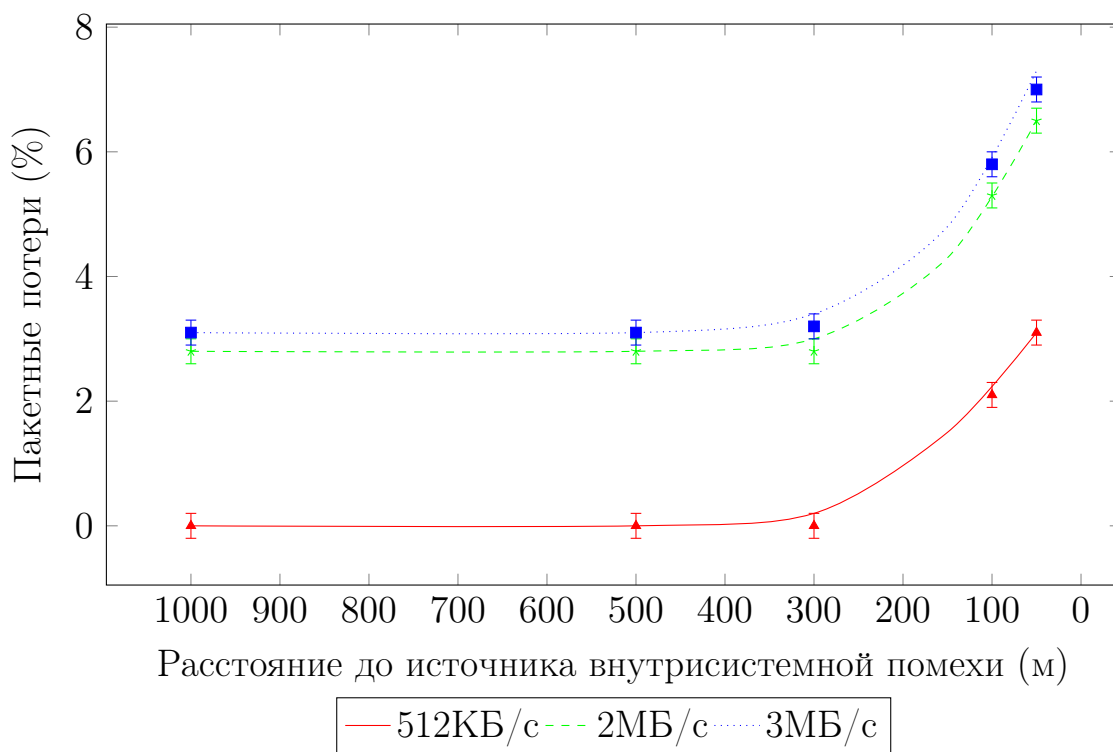


Рис. 2.12: Зависимость пакетных потерь от расстояния до источника внутрисистемной помехи



#### 2.2.4. Замирания в канале

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

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

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

По мере увеличения количества путей распространения сигнала растет и число наложений его копий с разной синхронизацией, амплитудой, частотой и фазой. В результате сигнал становится стохастическим (недетерминированным) с рэлеевским распределением. Как известно, рэлеев-

ское распределение достаточно точно отображает колебания амплитуды и изменения частоты (называемые еще доплеровским расширением), характерные для городской застройки.

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

Профиль задержки определяет количество путей распространения, самому задержку и ослабление сигнала. Кроме того, по этому профилю можно вычислить среднеквадратичное отклонение (разброс) задержки. Для технологии LTE выбраны три профиля: для пешехода (табл. 2.2), мобильного пользователя в автомобиле (табл. 2.3) и для типовой городской застройки (табл. 2.4) [30]. Суммарная информация по профилям задержек для технологии LTE находится в табл. 2.5 [31].

Таблица 2.2

### Расширенная А модель пешехода (ЕРА)

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	0,0
30	-1,0
70	-2,0
90	-3,0
110	-8,0
190	-17,2
410	-20,8

Таблица 2.3

**Расширенная А-модель при движении в автомобиле (EVA)**

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	0,0
30	-1,5
150	-1,4
310	-3,6
370	-0,6
710	-9,1
1090	-7,0
1730	-12,0
2510	-16,9

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

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

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

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

где  $f \in [-f_D; f_D]$ . Для LTE-сетей обычно применяются три значения: 5 Гц, 70 Гц и 300 Гц – для низко, средне и высокоскоростных объектов. При работе в диапазоне 2 ГГц эти частоты соответствуют следующим скоростям движения пользовательского терминала: 2,7 км/ч, 38,4 км/ч и 162 км/ч.

Таблица 2.4

**Расширенная модель для типовой городской застройки  
(ETU)**

Задержка за счет отклонения от трассы в нс	Соответствующая мощность в дБ
0	-1,0
50	-1,0
120	-1,0
200	0,0
230	0,0
500	0,0
1600	-3,0
2300	-5,0
5000	-7,0

Требования к работе приемника формируются с учетом комбинации этих доплеровских сдвигов частоты с профилями задержки. И хотя существуют три профиля и три доплеровских сдвига частоты, из возможных сочетаний используются пять (табл. 2.6) [31]. Профиль пешехода как низкоскоростного объекта определен только для частоты 5 Гц; профиль пользователя в автомобиле – для 5 и 70 Гц, а типовой профиль для города не включает частоту 5 Гц.

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

Замирания в канале, в конечном счете, влияют на прикладной уровень

услуг. Далее представим результаты моделирующего эксперимента, проведенного в сетевом симуляторе NS3, который демонстрирует влияние различных типов замирания на задержку, джиттер и пакетные потери в зависимости от расстояния между абонентом и базовой станцией (рис. 2.15).

Таблица 2.5

### Профили задержек для технологии LTE

Модель	Количество путей в канале	Разброс за- держки в нс	Максимальная за- держка по траек- тории в нс
Расширенная А- модель пешехода (ЕРА)	7	45	410
Расширенная А-модель при движении в авто- мобиле (ЕVА)	9	367	2510
Расширенная модель для ти- повой городской застройки (ЕТU)	9	991	5000

На рис. 2.15 (б) изображено изменение джиттера в зависимости от расстояния для трех профилей задержки: ЕРА, EVA, ETU. При моделировании между абонентом и базовой станцией передается поток со скоростью 512кБ/с. Как мы видим в нашем случае, джиттер и пакетные потери, существенно увеличиваются с увеличением расстояния и при замираниях в канале, которые соответствуют профилю EVA и ETU, даже на небольшом расстоянии предоставление каких либо услуг становится невозможным.

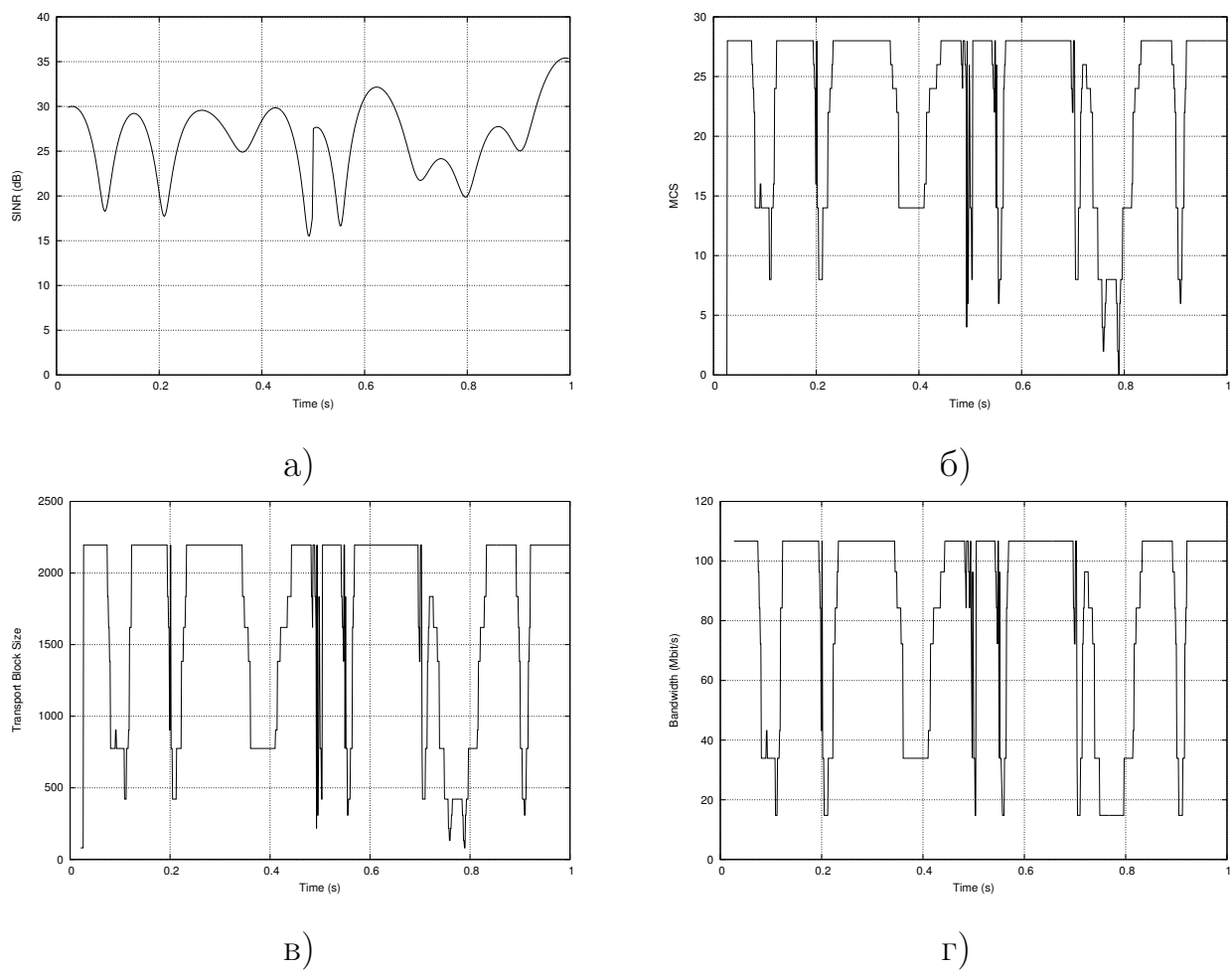


Рис. 2.13: Влияние замираний на а) SINR б) MCS в) размер ТВ г) скорость передачи нисходящего канала передачи при пешеходном сценарии (ЕРА 0-3 км/ч)

Таблица 2.6

### Параметры модели канала

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

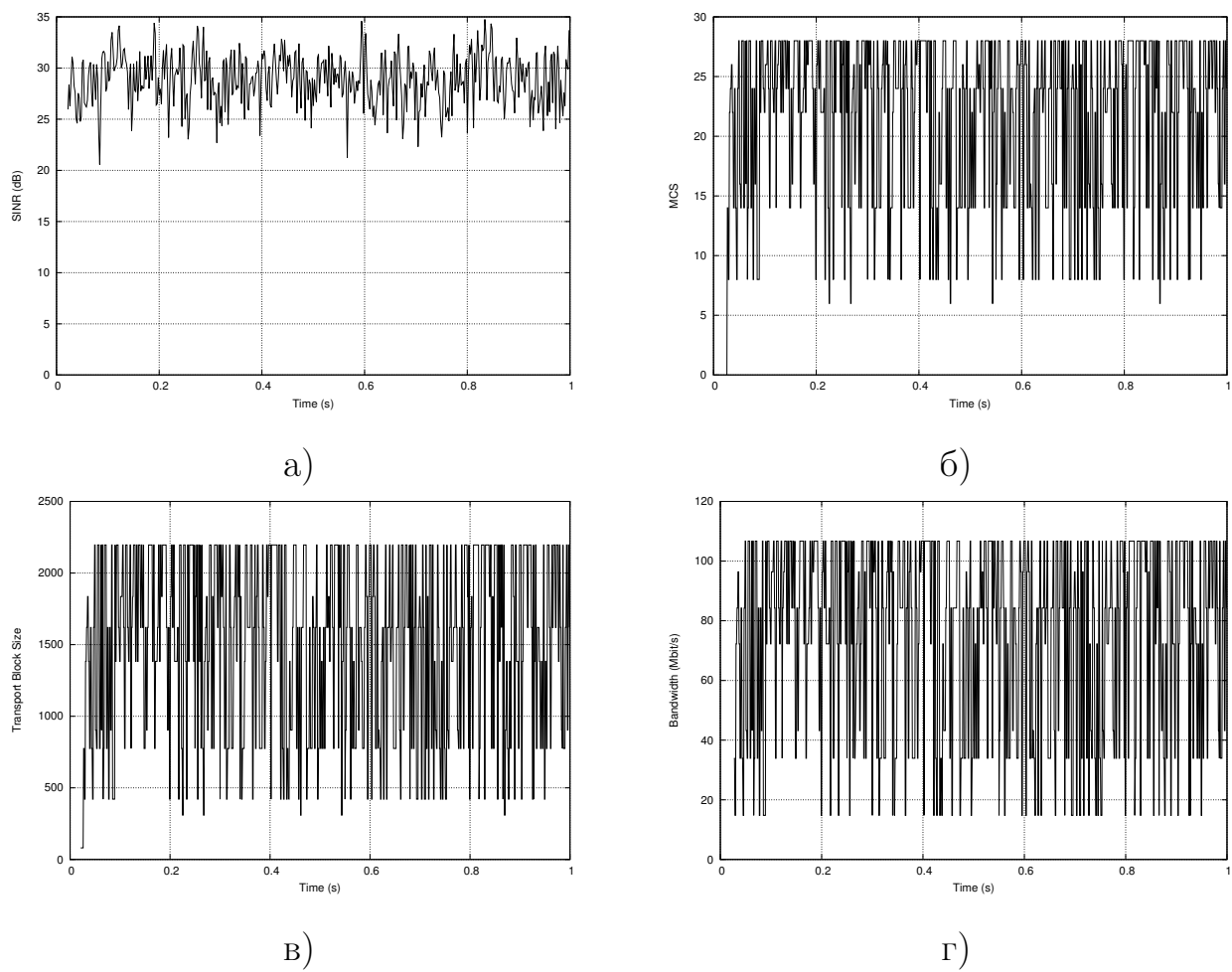
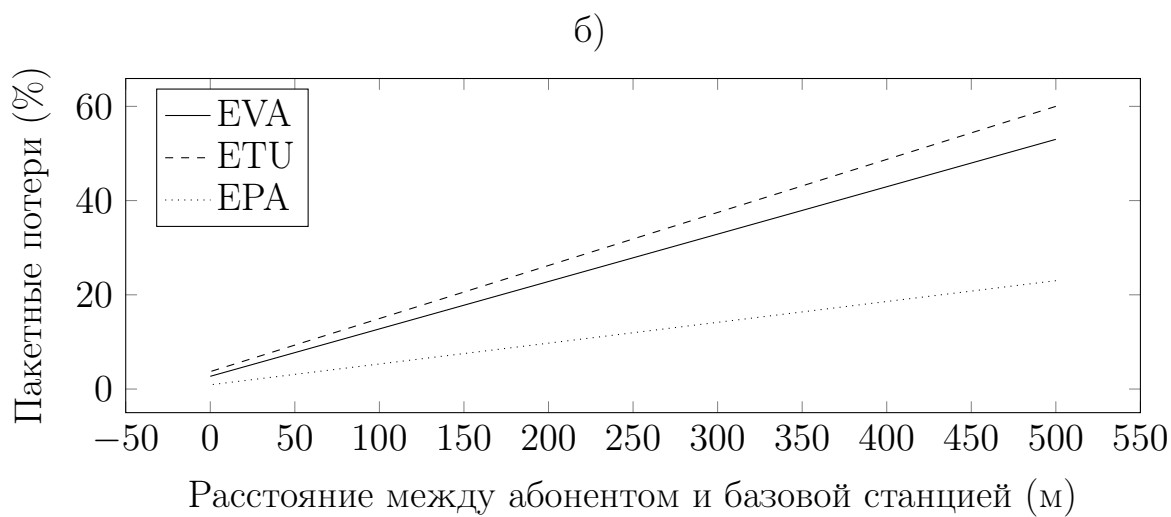
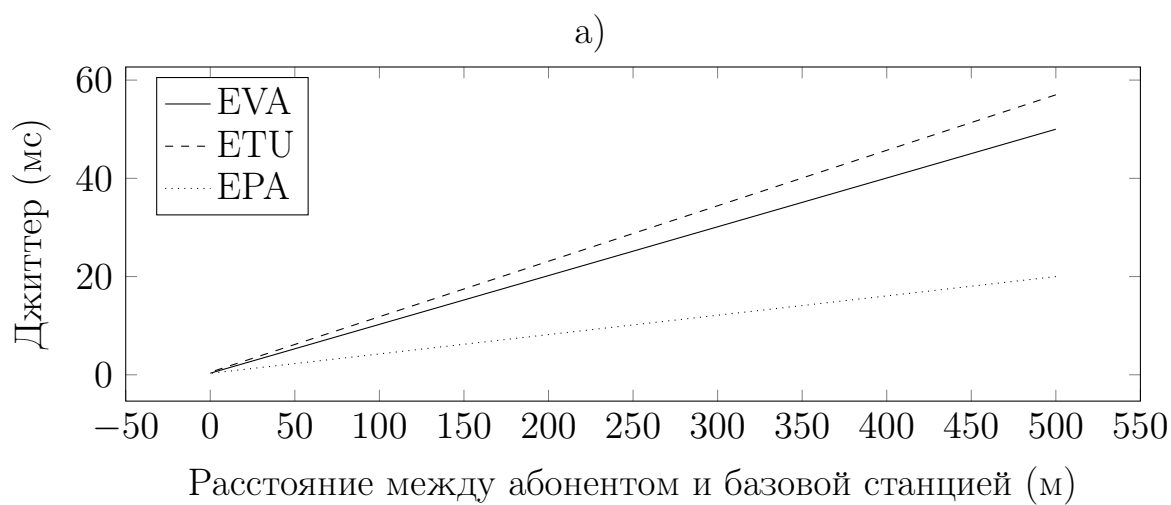
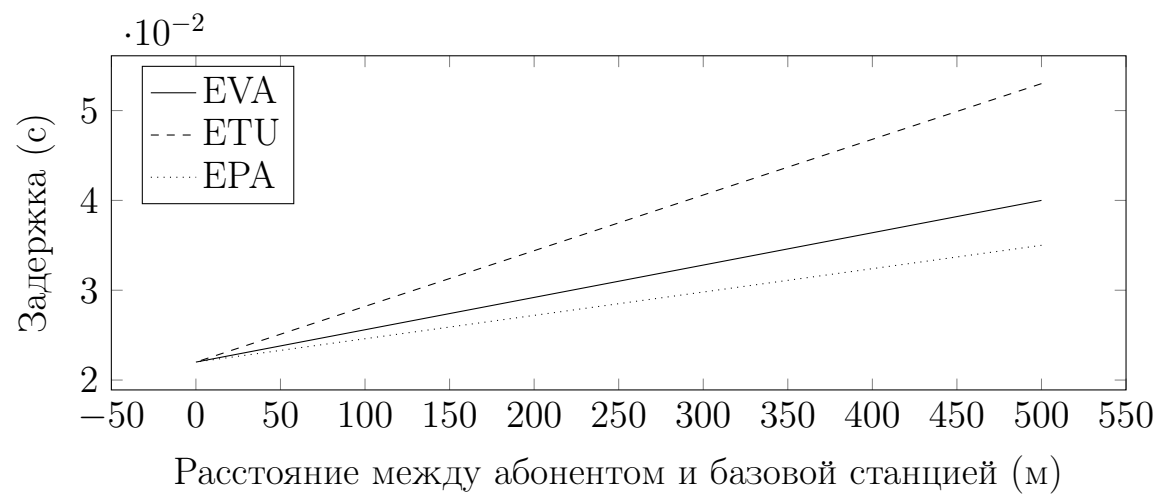


Рис. 2.14: Влияние замираний на а) SINR б) MCS в) размер ТВ г) скорость передачи нисходящего канала передачи при автомобильном сценарии (EVA 30-60 км/ч)



в)

Рис. 2.15: Зависимость а) задержки; б) джиттера; в) пакетных потерь от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях



### 2.3. Синтез математической модели процесса задержки

Перед синтезом алгоритма буфера компенсации джиттера необходимо определиться с моделью задержки, которая представляет собой случайный гауссовский процесс. Достаточно конструктивной моделью случайного динамического процесса, является процесс  $x(t)$  на выходе формирующего фильтра, описываемого уравнением состояния:

$$dx(t)/dt = \Phi x(t) + G\xi(t). \quad (2.7)$$

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

$$x(k+1) = \Phi x(k) + G\xi(k), \quad (2.8)$$

где  $\Phi$  - коэффициент (в многомерном случае матрица перехода состояний);  $G$  - порождающий коэффициент;  $\xi(k)$  - порождающая последовательность представляющая собой выборку из гауссовского белого шума (ГБШ), со спектральной плотностью мощности  $N_\xi$ .

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

$$y(k) = Hx(k) + \nu(k), \quad (2.9)$$

где  $\nu(k)$  - фазовый шум состоящий из ошибок измерений, являющийся последовательностью выборки из гауссовского белого шума со спектральной плотностью мощности  $N_\nu$ , некоррелированный с процессом  $\xi(k)$ . Модель описанная, уравнением (2.8), является стационарной, в реальных же ситуациях процесс задержки претерпевает различные случайные скачки и выбросы, обусловленные наличием инерционных элементов, таких как буфе-

ры, маршрутизаторы и др. Таким образом, могут быть выделены участки квазистационарности и определенные временные промежутки, где процесс  $x(t)$  нестационарен.

Как мы видим из первых частей второго раздела, процесс задержки имеет различные возмущения, вызванные различными причинами и, следовательно, математическая модель задержки должна учитывать все эти возмущения. Очевидно, указанные выбросы и скачки задержки можно учитывать, как в уравнении состояния (2.8) так и в уравнении наблюдения (2.9). Но смотря на то, что выбросы существенно ухудшают качество оценок, получаемых с помощью линейных алгоритмов, оптимальных для гауссовского распределения, разрабатываемый алгоритм компенсации джиттера, должен будет игнорировать единичные выбросы. Тогда логичнее ввести выбросы задержки в уравнение наблюдения для того чтобы принимать выброс как ошибку наблюдения. И, наоборот, при скачке задержки алгоритм компенсации джиттера должен, как можно раньше, увеличить размер буфера до необходимого значения, чтобы снизить пакетные потери. Тогда логичнее ввести скачки задержки в уравнение состояния.

Для описания помех  $\nu_{re}(k)$ , содержащих выбросы, могут быть использованы различные модели. Алгоритмы фильтрации, представленные в [32–35], основаны на описании помех в виде:

$$\nu_{re}(k) = (1 - r_v(k))\nu_{id}(k) + r_v(k)\nu_{di}(k), \quad (2.10)$$

$$P[\nu_{re}(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_1(k)] + \varepsilon N[0, R_2(k)], \quad (2.11)$$

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

$$P[r_v(k) = 1] = \varepsilon, P[r_v(k) = 0] = 1 - \varepsilon, \|R_2\| \gg \|R_1\|. \quad (2.12)$$

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

$$\xi_{re}(k) = (1 - r_s(k))\xi_{id}(k) + r_s(k)\xi_{di}(k), \quad (2.13)$$

$$P[\xi_{re}(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_3(k)] + \varepsilon N[0, R_4(k)], \quad (2.14)$$

где  $\xi_{di}(k)$  - случайный процесс скачка,  $r_s(k)$  - случайная величина, принимающая значения 0 и 1 с вероятностями:

$$P[r_s(k) = 1] = \varepsilon, P[r_s(k) = 0] = 1 - \varepsilon, \|R_2\| \gg \|R_1\|. \quad (2.15)$$

Вероятность появления этих значений определяет долю засоренности скачками уравнения состояния. Учитывая то, что в рассматриваемой модели имеет место два типа уравнений состояния: для выброса и для скачка, необходимо дополнительное устройство, предназначенное для идентификации типа изменений, которое будет рассмотрено дальше. С помощью предложенной модели случайного процесса сгенерируем ряд задержек с выбросами на рис. 2.16 а) и ряд задержек со скачками задержки на рис. 2.16 б), со следующими параметрами:  $\xi_{id}(k), \nu_{id}(k) \sim N(0, 1)$ ;  $P[r_v = 1] = P[r_s = 1] = 0,02$ ;  $\xi_{di}(k), \nu_{di}(k) \sim N(30, 10)$ .

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

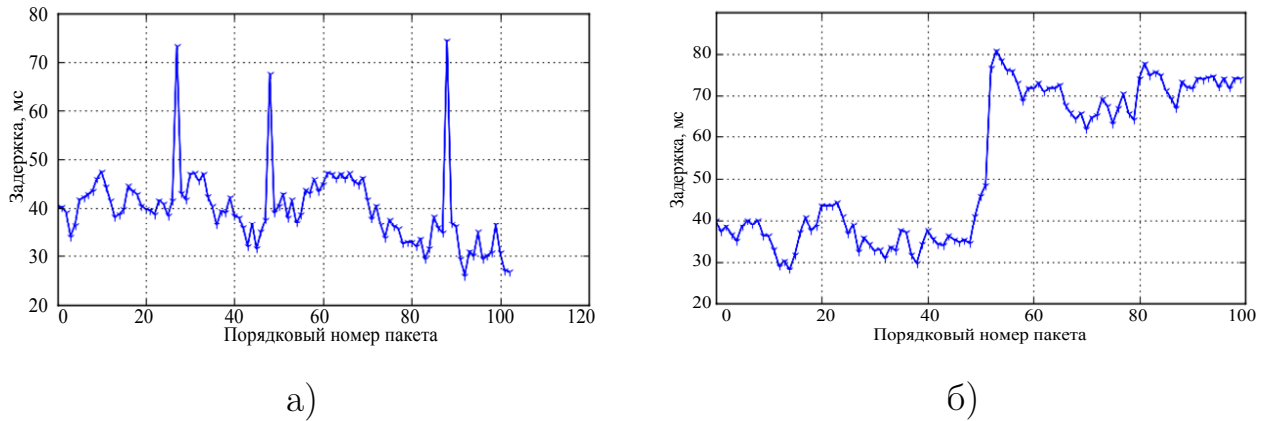


Рис. 2.16: Моделирование ряда задержек а) с выбросами, б) со скачками

## 2.4. Выводы ко второму разделу

1. Практика показывает, что джиттер имеет три различных проявления: в виде случайного процесса, в виде процесса содержащего выбросы задержки и в виде процесса содержащего скачки задержки. Проведен анализ причин возникновения джиттера в гибридных сетях. Эти причины различны и характерны для проводных и беспроводных сетей. Также для каждой из этих причин определен характерный тип джиттера, согласно выбранной градации по трем основным типам. Источником постоянного джиттера может являться пакетное планирование на стороне отправителя, балансировка нагрузки между несколькими линиями доступа или между различными маршрутами и внутреннее распределение нагрузки на маршрутизаторе. Источником выбросов задержки могут являться перегрузки в локальной сети, влияние высокоприоритетного трафика на менее приоритетный и хэндовер между базовыми станциями. Источником скачков задержки могут являться перегрузки в канале доступа, изменение расстояния между абонентом и базовой станцией, внутрисистемные помехи и замирания в радиоканале связи. Наличие скачков и выбросов приводит к искажению, отклонению

статистики от гауссовой, что в свою очередь приведет к потерям оптимальности алгоритма компенсации джиттера. Таким образом, возникает задача поиска методов решения для такой нестационарной ситуации и нахождение приемлемых подоптимальных решений.

2. Указанные разновидности джиттера требуют дифференцированного подхода к компенсации той или иной разновидности джиттера. Вместе с тем, сам рабочий алгоритм компенсации джиттера должен быть универсальным, обеспечивая автоматическое изменение функционирования при различных ситуациях.
3. Для борьбы с выбросами и скачками задержки имеет смысл применить следующую стратегию функционирования буфера компенсации джиттера. Учитывая кратковременность действия единичного выброса и то, что система после его действия возвращается в первоначальное состояние, следует игнорировать выбросы при оценке текущего состояния системы, а учитывать его в расчете буфера компенсации джиттера, как отклонение (дисперсию) от текущего состояния задержки. Указанные выбросы следует включить в уравнение наблюдения так, как выброс задержки не должен влиять на состояние системы и будет учитываться при расчете буфера компенсации джиттера, как отклонение от текущего значения задержки. В тоже время появление скачка имеет достаточную продолжительность и существенным образом изменяет наблюдаемую статистику, вследствие чего задачей синтезируемого метода будет являться изменение состояния системы на новое значение задержки. В связи, с чем скачки задержки введены в уравнение состояния.
4. Проведено математическое моделирование процесса задержки на основе синтезированной математической модели, что позволило проверить и доказать адекватность полученной модели.

## РАЗДЕЛ 3

### СИНТЕЗ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА ДЛЯ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

#### 3.1. Обзор методов оценки джиттера

##### 3.1.1. Обзор метода оценки джиттера в стационарном состоянии

В стационарном состоянии сети задержка  $x(t)$  представляет собой случайную величину, распределение вероятностей которой близкое к нормальному  $N(0, \xi_x)$  [26]. Однако реальная статистика сети не является стационарной, как мы видим из второго раздела. Таким образом, возникают флуктуации задержки, которые могут иметь как разовый характер, так и продолжаться длительное время. Все это приводит к тому, что плотность задержки  $p(x)$  нельзя считать идеально распределенной. Более того из-за значительного уровня априорной неопределенности, реальную статистику, как правило, не удастся параметризовать. Поэтому традиционные, хорошо разработанные параметрические процедуры, которые будут рассмотрены далее, для построения алгоритмов оценки задержки применить сложно и рискованно. В этом случае имеет смысл перейти к непараметрическим робастным алгоритмам, которые хоть и не являются оптимальными, однако отличаются устойчивостью и при прочих равных условиях не проигрывают параметрическим [?].

Интерес к робастной обработке возник из осознания того факта, что исследователь никогда не располагает полными знаниями о действительной статистике. Кроме того, предположение о гауссовом характере мешающих воздействий слишком идеализировано. Как правило, мешающие воз-

действия имеют небольшой процент аномальных “выбросов”, что приводит к утяжелению хвостов распределения. Эта статистическая неопределенность, а также наличие аномалий может быть учтена в модели “засоренного” распределения, предложенного Хьюбером [?].

$$P(x) = (1 - \varepsilon)P_0(x) + \varepsilon P_1(x), \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  - небольшое положительное действительное число ( $\varepsilon < 0, 1$ ),  $F_0(x)$  - известное распределение,  $P_1(x)$  - распределение, принадлежащее некоторому классу, симметричное с конечной дисперсией.

Далее при построении алгоритма за основу взят принцип минимакса, т.е. алгоритм строится в расчете на наименее благоприятное распределение.

Используем такой подход к построению алгоритма оценки процесса джиттера  $S(\varphi)$ . В качестве модели помех используем модель “засоренного” нормального распределения

$$W(k) = (1 - \varepsilon)N(0, \sigma) + \varepsilon N_1(0, \sigma_1), \quad (3.2)$$

где  $N(0, \sigma)$  и  $N_1(0, \sigma_1)$  - нормальные распределения с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma$  и  $\sigma_1$ . Такая модель является наиболее характерной: составляющая  $N_1$  описывает аномальную долю помех; составляющая  $N$  прочие помехи, имеющие вид гауссовых.

Тогда плотность совместного распределения аддитивной смеси процесса и шума будет иметь вид:

$$W(V) = \frac{1 - \varepsilon}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(V - S)^2}{2\sigma^2}\right) + \varepsilon \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(V - S)^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (3.3)$$

где  $V = S(t) + n(t)$  - наблюдение процесса  $S(\varphi)$ , соответствующее уравнению наблюдения (2.9).

Если наблюдение производится в дискретные моменты времени, то функция правдоподобия фазы джиттера  $\varphi$  может быть записана в виде:

$$L(\varphi) = \prod_{i=1}^M \left\{ (1 - \varepsilon) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{[V_i - S_i(\varphi)]^2}{2\sigma^2} + \right. \\ \left. + \varepsilon \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{[V_i - S_i(\varphi)]^2}{2\sigma_1^2} \right\}. \quad (3.4)$$

Для определения алгоритма оценки воспользуемся методом максимума функции правдоподобия [?], т.е. в качестве оценки примем значение фазы  $\hat{\varphi}$ , являющейся решением уравнения:

$$\frac{dL}{d\varphi} /_{\varphi=\hat{\varphi}} = 0. \quad (3.5)$$

Подставим в уравнение (3.5) значение функции правдоподобия (3.4), получим уравнение:

$$\sum_{i=1}^M \left[ \frac{V_i - S_i(\varphi)}{\sigma^2} \right] \frac{dS(\varphi)}{d\varphi} - \\ - \sum_{i=1}^M \frac{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{\sigma_1^2 - \sigma^2}{\sigma_1^3 \sigma} [V_i - S_i(\varphi)] \frac{dS_i(\varphi)}{d\varphi} \exp \left\{ \frac{\sigma_1^2 - \sigma^2}{2\sigma_1^2 \sigma^2} [V_i - S_i(\varphi)] \right\}}{1 + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \exp \left\{ \frac{\sigma_1^2 - \sigma^2}{2\sigma_1^2 \sigma^2} [V_i - S_i(\varepsilon)]^2 \right\}} = 0. \quad (3.6)$$

В [?] используются следующие значения величин:  $\varepsilon \leq 0,1$  и  $\sigma_1 \geq 10\sigma$ .

Рассмотрим вторую сумму сначала уравнения. Если  $V_i \geq 3\sigma_1$ , то единиц в знаменателе можно пренебречь и тогда этот член в сумме имеет вид:

$$\frac{1}{\sigma^2} [V_i - S_i(\varphi)] \frac{dS(\varphi)}{d\varphi}, \quad (3.7)$$

т.е. равен соответствующему члену первой суммы, а их разность равна 0, т.е. в оптимальном алгоритме при обработке эти члены не учитываются.

Если  $V_i \leq 3\sigma$ , то вторым членом в знаменателе второй суммы можно пренебречь по сравнению с единицей. Числитель второй суммы будет иметь значение  $\leq 0,01$  и этими составляющими первой суммы можно пренебречь.



Данный алгоритм следует использовать, когда ситуация сугубо стационарна, а сам джиттер будет представлять собой случайную величину. В нестационарных условиях необходимо переходить к рекурсивным процедурам, позволяющим находить решения с случае, когда джиттер представляет собой случайный процесс с выбросами и скачками.

### 3.1.2. Рекурсивные методы оценки джиттера

Рассмотренная процедура оценки джиттера (3.5), (3.6) является точечной, привязанной к конкретной ситуации. В этой процедуре, не учитывается предыстория и не используется экстраполяция, что для решений сетевых задач имеет принципиальное значение. Очевидно, можно создать процедуру, состоящую из последовательности точечных оценок в каждой из временных позиций по алгоритму (3.6). Но данная процедура не ориентирована на учет корреляционных связей между соседними позициями  $i$  и  $i + 1$ .

Применим более общую марковскую модель, при которой соседние позиции связаны соотношением:

$$x(i + 1) = P(x_{i+1}/x_i)x(i), \quad (3.8)$$

где  $P(x_{i+1}/x_i)$  - вероятность перехода, представляющая по сути коэффициент корреляции между указанными позициями процесса  $x(i)$ .

Выбор модели (3.8) позволяет построить рекурсивную процедуру, как самой модели состояния процесса  $x(i)$ , так и алгоритма оценки в виде фильтра Калмана-Бьюси или в виде более простой процедуры стохастической аппроксимации [?].

Фильтр Калмана-Бьюси дает решение задачи оптимального оценивания в линейных динамических системах при гауссовском распределении процессов и помех. Однако в прикладной задаче диссертации, распределение шумов не является гауссовским, причем распространенной причиной

отклонения распределения вероятностей помех от гауссовского является наличие выбросов и скачков в оцениваемом процессе. Хорошо известно [?], что такие отклонения существенно ухудшают качество оценок, получаемых с помощью алгоритмов, оптимальных для гауссовских помех. Поэтому не случайно большое внимание уделяется разработке робастных алгоритмов фильтрации, стабильно работающих в условиях, когда помехи содержат выбросы или скачки [?, 27, 32–35]. В [32] задача фильтрации при наличии выбросов решалась, как задача негауссовской фильтрации, однако реализация полученного алгоритма на ЭВМ представляет значительные трудности. Дальнейшее развитие этот подход получил в [33]. Однако этот алгоритм фильтрации имеет ряд недостатков: для его построения необходимо знать вероятность появления выброса и распределение вероятностей помех должно быть симметричным. Данный подход не подходит для решения нашей задачи, так как задержка в телекоммуникационных системах является нестационарной.

Другой подход к решению задачи фильтрации помех, содержащих выбросы, представлен в [34, 35]. В представлении шумов предполагается, что с большей вероятностью помехи измерения распределены нормально с нулевым средним и заданной ковариационной матрицей и с малой вероятностью распределены также нормально, но с ковариационной матрицей, имеющей большую норму. Алгоритм фильтрации основан на обнаружении момента появления выброса и изменении коэффициента усиления в зависимости от результатов обнаружения. Для модификации коэффициента используется ковариационная матрица источников выбросов.

В [27] предполагается, что в штатном режиме работы измерительного устройства помехи распределены нормально с нулевым средним и известной ковариационной матрицей, а в режиме сбоев помехи имеют нормальное распределение с неизвестным средним и той же ковариационной матрицей. Алгоритм фильтрации получен на основе обнаружения момента появления

выброса, оценивания его амплитуду и соответственно модифицируя коэффициент усиления и ковариационную матрицу. В этом случае априорной информации о характеристиках выбросов не требуется.

Рассмотрим более детально рекурсивные алгоритмы фильтрации.

### 3.1.3. Фильтр Калмана-Бьюси (ФКБ)

ФКБ синтезирован с учетом того, что наблюдаемый процесс соответствует уравнению (2.8) и наблюдается на фоне гауссовского белого шума. Уравнение оценки в виде условного среднего значения задержки с использованием ФКБ имеет вид:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)\Delta y, \quad (3.9)$$

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

$$K(k) = V(k)H^T N_\nu^{-1}, \quad (3.10)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1), \quad (3.11)$$

$$V(k, k-1) = \Phi^T V(k-1)\Phi + N_\xi, \quad (3.12)$$

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

На рис. 3.1 представлена схема фильтра оценки, построенная в соответствии с (3.9). Ключевую роль в оценке ФКБ текущего значения задержки,

играет параметр  $\Phi$ , позволяющий регулировать сглаживающие свойства фильтра.

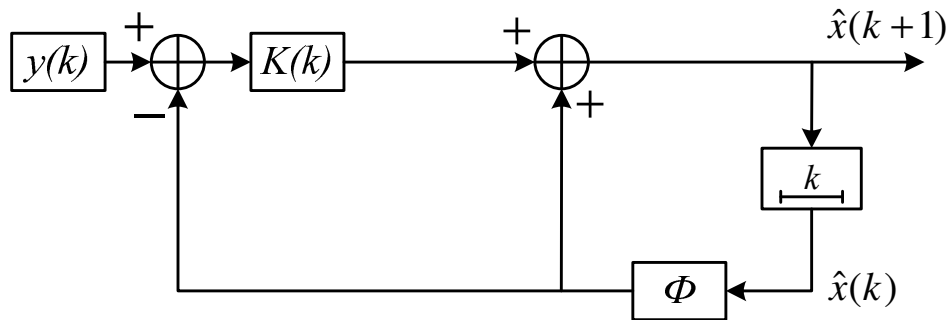


Рис. 3.1: Схема ФКБ

### 3.2. Синтез алгоритма ФКБ в различных условиях априорной неопределенности

Как следует из 3.1.3 для классического алгоритма ФКБ необходимы априорные данные о значениях спектральной плотности шума модели  $N_\xi$  шума наблюдения  $N_\nu$ , а также значения интервалов корреляции, определяемой матрицей  $\Phi$ . В реальных условиях эти априорные данные могут отсутствовать, а вместо них могут быть известны другие данные статистики связанные с указанными выше. Рассмотрим ряд таких алгоритмов, отличающихся различным уровнем априорной неопределенности.

#### 3.2.1. Алгоритм фильтрации для известной последовательности мест выбросов и дисперсии процесса выбросов

Выражения, описывающие алгоритм, имеют вид:

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

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} K(k) = & V(k|k-1)H^T(k)\{H(k)V(k|k-1)H^T(k) + \\ & + [1 - r_v(k)]R_1(k) + r_v(k)R_2(k)\}^{-1}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1). \quad (3.16)$$

3.2.2. Алгоритм фильтрации для известной вероятности появления выбросов и известной дисперсии процесса выбросов

Выражения, описывающие алгоритм, имеют вид:

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

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

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

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

3.2.3. Алгоритм фильтрации, требующий информацию о характеристиках процесса выбросов

Выражения, описывающие алгоритм, имеют вид:

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

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

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)\{H(k)V(k|k-1)H^T(k) + (1 - \hat{r}_v(k))R_1(k) + \hat{r}_v(k)R_2(k)\}^{-1}, \quad (3.23)$$

$$V(k) = [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1)[I - K(k-1)H(k)]^T + K(k)R_1(k)K^T(k). \quad (3.24)$$

$$\hat{r}_v(k) = \begin{cases} 0, & \|\Delta y(k)\| \leq c_1 \\ 1, & \|\Delta y(k)\| > c_1 \end{cases} \quad (3.25)$$

Рассмотренные алгоритмы ориентированы на использование их в стационарных условиях. По анализу качества этих алгоритмов имеются обширные исследования [?, ?, 27]. В реальных нестационарных условиях качество их оценки резко снижается, как правило, пропорционально отклонению от выбранной математической модели. На практике обычно поступают следующим образом, если отклонение от статистической модели незначительное, то ими пренебрегают и рассматривают квазистационарный вариант ФКБ. При более выраженных нестационарных отклонениях прибегают к адаптивным процедурам [?, ?] при этом предполагается известность статистики самих нестационарных воздействий. Получаемая при этом оценка нестационарности подставляется в основной алгоритм, который далее рассматривается как стационарный.

Другим методом решения нестационарных явлений является метод кусочностационарных моделей, при этом переход на ту или иную модель управления осуществляется за счет обнаружения интервала корреляции квазистационарности [?].

Более общим является выбор алгоритма фильтрации не требующего информации о вероятностях амплитудных выбросов нестационарности. Рассмотрим его более подробно.

#### 3.2.4. Алгоритм фильтрации, не требующий информации о вероятности появления и амплитудах выбросов.

Алгоритм использует следующую модель помех:

$$\nu_{re}(k) = \nu_{id}(k) + r_v(k)Bu(k), \quad (3.26)$$

$$P[\xi(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_1(k)] + \varepsilon N[Bu(k), R_1(k)], \quad (3.27)$$

где  $u(k)$  - неизвестный, неслучайный вектор,  $B$  - известная матрица соответствующих размеров.

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + [1 - \hat{r}_v(k)BL(k)]K(k)\Delta y, \quad (3.28)$$

$$L(k) = [B^T V v^{-1}(k) B]^{-1} B^T V^{-1}(k), \quad (3.29)$$

$$Vv(k)H(k)V(k, k-1)H^T(k) + R_1(k), \quad (3.30)$$

$$V(k|k-1) = \Phi(k-1)V(k-1)\Phi^T(k-1) + N_\xi, \quad (3.31)$$

$$K(k) = V(k|k-1)H^T(k)[H(k)V(k|k-1)H^T(k) + R_1(k)]^{-1}, \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} V(k) = & [I - K(k-1)H(k)]V(k, k-1)[I - K(k-1)H(k)]^T + \\ & + K(k)R_1(k)K^T(k) + \hat{r}_v K(k)BD(k)B^T K^T(k), \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$D(k) = [B^T V^{-1}(k) B]^{-1}, \quad (3.34)$$

$$\hat{r}_v(k) = \begin{cases} 0, & \|l(k)\| \leq c_2; \\ 1, & \|l(k)\| > c_2, \end{cases} \quad (3.35)$$

$$l(k) = \Delta y^T V^{-1}(k) B [B^T V^{-1}(k) B]^{-1} B^T V^{-1}(k) \Delta y. \quad (3.36)$$

Из [27] отметим, что алгоритмы (3.21)-(3.24) и (3.28)-(3.36) уступают по точности второму алгоритму фильтрации, но дают более точные оценки, чем ФКБ. Особенно это характерно в случае мощных выбросов. По точности алгоритмы (3.21)-(3.24) и (3.28)-(3.36) различаются незначительно, однако в отличие от первого второй не требует информации о характеристиках выбросов

Рассмотренный ряд рекурсивных алгоритмов ФКБ показывает возможности их эффективного использования в условиях хорошо параметризированной статистической ситуации. В телекоммуникационных системах сам трафик представляет собой сугубо нестационарный случайный процесс и как показали последние исследования, этот процесс обладает значительным последствием и самоподобными свойствами, что существенно затрудняет его параметризацию. С другой стороны, рекурсивные фильтры Калмана-Бьюси обладают свойствами получения оценки состояния трафика в реальном масштабе времени, что позволяет использовать его непосредственно после оценки для управления джиттером. Поэтому возникает задача поиска алгоритма, обладающего эффективностью ФКБ и одновременно нечувствительного к нестационарным изменениям математической модели. Имеется ряд непараметрических алгоритмов, так называемых, алгоритмов свободных от распределения. Найдем решение в рамках этих алгоритмов



Таблица 3.1

Дисперсия ошибок оценивания в момент  $k = 20$ .  $\sigma_{OPT}^2$  - для оптимального фильтра (3.13)-(3.16),  $\sigma_{LIN}^2$  - для линейного фильтра (3.17)-(3.20),  $\sigma_{KAL}^2$  - для ФКБ,  $\sigma_{RB1}^2$  - для алгоритма (3.21)-(3.24),  $\sigma_{RB2}^2$  - для алгоритма (3.28)-(3.36) [27]

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

### 3.3. Обзор робастных алгоритмов фильтрации на основе фильтра Калмана для случайных процессов, содержащих выбросы и скачки

Метод РФКБ для случайного процесса, содержащего выбросы, согласно [?] выглядит следующим образом (рис. 3.2):

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k)\Delta y \cdot \min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\}, \quad (3.37)$$

где  $b$  является некоторым ограничителем изменения значения функции.

Это позволяет решить проблему неограниченного изменения оценки за один шаг в классическом фильтре Калмана, оставаясь при этом достаточно простой.

Если  $b \geq |K(k)\Delta y|$ , то  $\min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\}$  принимает значение 1 и фильтр работает в обычном режиме как ФКБ (3.9). Если же  $b \leq |K(k)\Delta y|$ , то из этого следует, что произошел выброс и невязка умножается на понижающий коэффициент, равный  $\frac{b}{|K(k)\Delta y|}$ , что опять же приводит РФКБ к обычному виду (3.9).

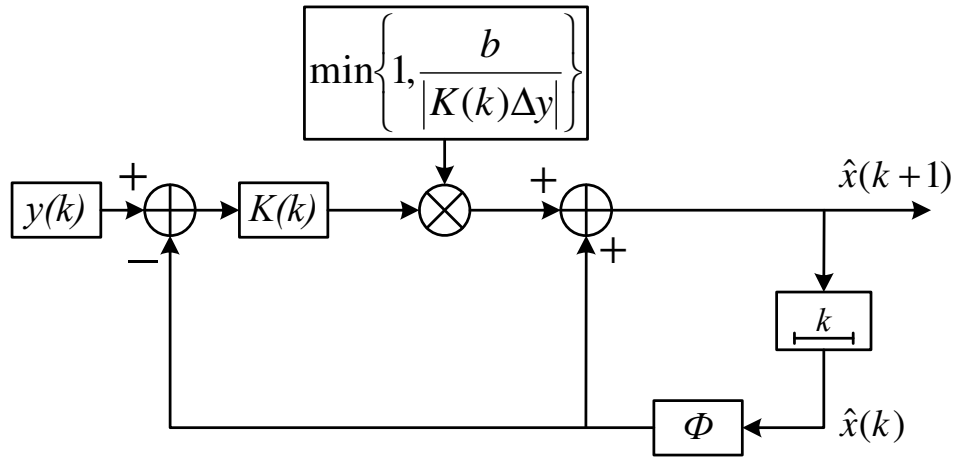


Рис. 3.2: Схема РФКБ для фильтрации случайных процессов содержащих выбросы

Метод РФКБ для случайного процесса, содержащего скачки, согласно [?] выглядит следующим образом (рис. 3.3):

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + H(k)[I - H(k)K(k)\Delta y] \times \\ & \times \min \left\{ 1, \frac{b}{|I - H(k)K(k)\Delta y|} \right\}, \end{aligned} \quad (3.38)$$

где  $b$  тот же аргумент, ограничивающий изменение значения функции, что и для РФКБ для ситуации выброса (3.37).

Гибридный робастный фильтр Калмана (ГРФКБ) Очевидно, одновременная фильтрация возможна только с некоторой задержкой  $\Delta\tau$ . Это необ-

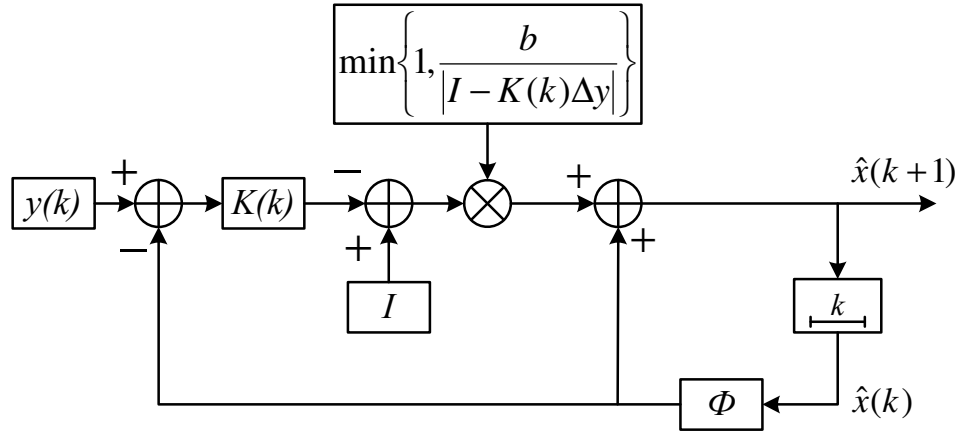


Рис. 3.3: Схема РФКБ для фильтрации случайных процессов содержащих скачки

ходимо для принятия решения о типе отклонения от нормального распределения. Вследствие выброса скорей всего увидим один большой выброс (2.10), а вследствие скачка – подряд целую последовательность (2.13). ГРФКБ может быть реализован следующим образом [?]: РФКБ для случайного процесса с выбросами работает по умолчанию и всякий раз, когда ширина выброса больше, чем окно наблюдения  $\Delta\tau$ , единожды используется процедура РФКБ для случайных процессов со скачками. Формализуем описанный алгоритм:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + (1 - \eta)K(k)\Delta y \times \\ & \times \min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\} + \eta H(k)[I - H(k)K(k)\Delta y] \times \\ & \times \left\{ 1, \frac{b}{|I - H(k)K(k)\Delta y|} \right\}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\eta = \begin{cases} 0, & \text{cond}(k) \\ 1, & \text{cond}(k), \end{cases} \quad (3.40)$$

где  $\text{cond}(k)$  - функция, которая определяет, произошел ли скачок задержки в окне наблюдения или нет:

```

1  def cond(arr , w, b):
2      try:  # check that the number of elements in
3             # the array is less than the viewing window
4          arr[-w]
5      except IndexError:
6          return False
7      if arr[-w]<b:
8          return False
9      if w==1 and arr[-w]>=b:
10         return True
11     if k==1 and arr[-w]<b:
12         return False
13     else:
14         if cond(arr , w-1, b):
15             return True  # detected nonstationarity delay
16         else:
17             return False  # no detected nonstationarity delay

```

[?]

### 3.4. Обзор методов выбор высоты отсечения $b$

Чтобы выбрать высоту отсечения  $b$  [?, ?], сделаем простое допущение, что условное математическое ожидание  $E[\Delta x(k)|\Delta y(k)]$  линейное, где  $\Delta x = x(k) - \hat{x}(k)$ , которое является верным только приблизительно. В этих условиях есть два предложения: Первый критерий Анскомб страхования. Для данного предложения «страховая премия»  $\sigma$ , подлежит уплате в условиях потери эффективности в идеальной модели по сравнению с оптимальной процедурой в этих (идеальных) условиях, то есть для классического фильтра Калмана выбираем  $b = b(\sigma)$  такое, что для выброса:

$$E \left| \Delta x(k) - H(k)[I - H(k)K(k)\Delta y] \times \right. \\ \left. \times \min \left\{ 1, \frac{b}{|I - H(k)K(k)\Delta y|} \right\} \right| = (1 + \sigma)E|\Delta x(k) - K(k)\Delta y|, \quad (3.41)$$

и для скачка:

$$E \left| \Delta x(k) - K(k)\Delta y \cdot \min \left\{ 1, \frac{b}{|K(k)\Delta y|} \right\} \right| = \\ (1 + \sigma)E|\Delta x(k) - K(k)\Delta y|. \quad (3.42)$$

Другую возможность дает размер окрестности  $U_r$ , определенный радиусом  $r \in [0, 1]$ . Определим  $b = b(r)$  такое что:

$$(1 - r)E|K(k)\Delta y - b|_+ = rb. \quad (3.43)$$

Если радиус неизвестен, можно воспользоваться идеей разработанной [?, ?], которая позволяет определить наименьший благоприятный радиус  $r_0$  с помощью следующих уравнений:

$$r_0 = \operatorname{argmin}_{s \in [0, 1]} \rho_0(s), \quad (3.44)$$

$$\rho_0(s) = \max_{r \in [0, 1]} \rho(r, s), \quad (3.45)$$

$$\rho(r, s) = \frac{\max_{U_r} \operatorname{MSE}(rLS(b(s)))}{\max_{U_r} \operatorname{MSE}(rLS(b(r)))}, \quad (3.46)$$

где  $s$  радиус фиксированного размера  $s \in [0, 1]$  симметричной окрестности загрязнения идеального случайного процесса  $P(k)$ , который предполагается симметричен относительно 0:

$$Q(k) = (1 - s)P(k) + sZ(k), \quad (3.47)$$

где  $Z(k)$  является случайным процессом с неизвестной вероятностью, который симметричен относительно 0.

Если знания о  $r$  ограничены, скажем  $r \in [r_l, r_u]$ ,  $0 < r_l < r_u < 1$ , мы можем ограничить диапазон изменения  $s$  и  $r$ , для этого определим:

$$A_r = E [trCov[\Delta x(k)|\Delta y(k)] + (|K(k)\Delta y| - b(r))_+^2], \quad (3.48)$$

$$B_r = E [|K(k)\Delta y|^2 - (|K(k)\Delta y| - b(r))_+^2] + b^2(r), \quad (3.49)$$

$$\rho_0(s) = \max\{A_r/A_{rl}, B_r/B_{ru}\}. \quad (3.50)$$

### 3.5. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для случайных процессов джиттера, содержащего выбросы и скачки

Чтобы сравнить алгоритмы фильтрации проведем моделирование оценки случайного процесса с помощью приведенных робастных алгоритмов фильтрации и фильтра Калмана параметрами, используемые для построения рис. 2.1 и с  $r_v = 0,01$ ,  $r_s = 0,001$ . Результаты приведены на рис. 3.4-3.7. Сплошной линией со снежинками показан наблюдаемый процесс, сплошной – оценка ФКБ, штрихпунктирной с точками – РФКБ для ситуации с выбросами, штрихпунктирной – РФКБ для ситуации со скачками и штрихпунктирной со снежинками – ГРФКБ. На рис. 3.4 представлены результаты оценивания временного процесса без выбросов и скачков (2.9), из графика следует, что рассмотренные робастные алгоритмы, не теряют своей оптимальности по сравнению с ФКБ, во время оценивания процесса без выбросов и скачков. На рис. 3.5 представлены результаты оценивания временного процесса с выбросами (2.10), из графика следует, что РФКБ для ситуации выброса и ГРФКБ позволяют игнорировать выбросы, что обеспечивает оптимальную оценку процесса. На рис. 3.6 представлены результаты оценивания временного процесса со скачками (2.10), из графика следует, что РФКБ для ситуации скачка и ГРФКБ позволяют быстро переключиться на новое значение задержки. В то время как РФКБ для ситуации выброса оказался не в состоянии отслеживать скачки. В заключение,

на рис. 3.7 представлены результаты оценивания временного процесса со скачками и с выбросами, из графика следует, что, ГРФКБ позволяет получить оптимальную оценку в смешанной ситуации, в то время как остальные алгоритмы выполняют оценку недопустимо плохо.

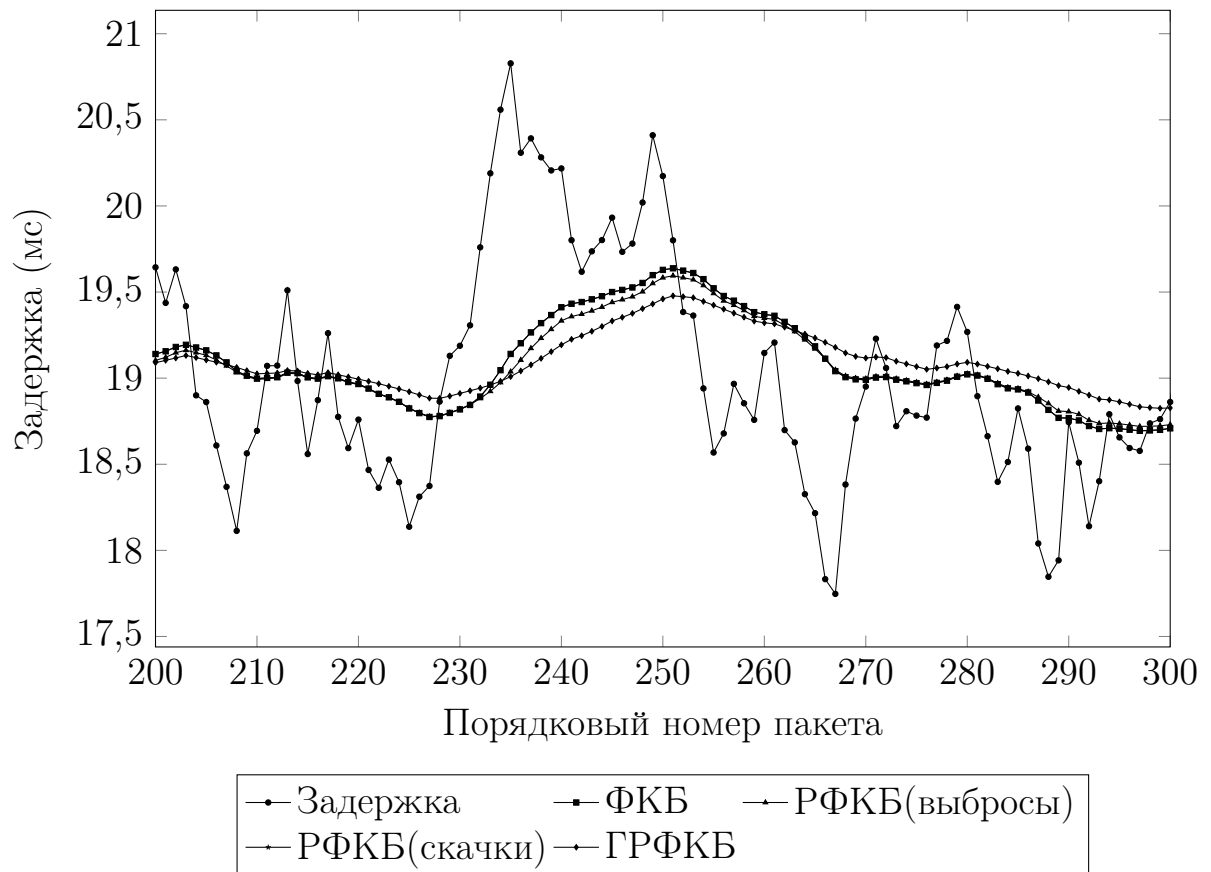


Рис. 3.4: Моделирование фильтрации в идеальных условиях

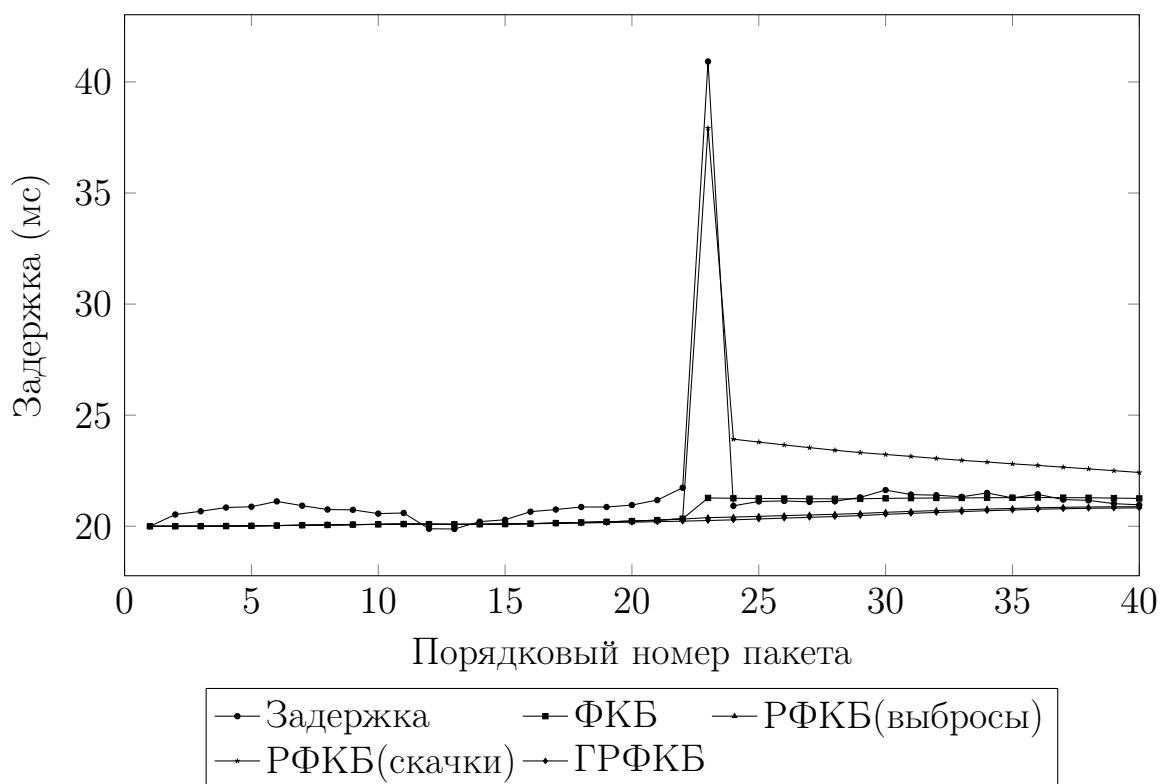


Рис. 3.5: Моделирование фильтрации при выбросах

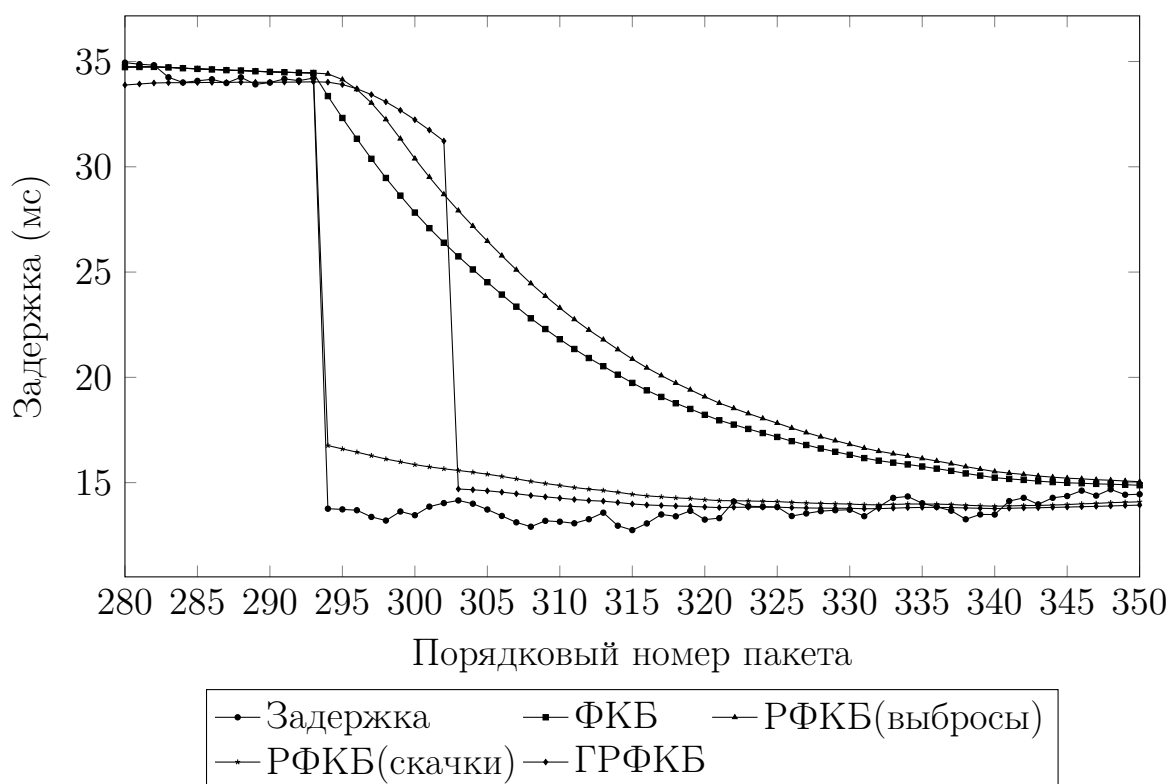


Рис. 3.6: Моделирование фильтрации при скачках



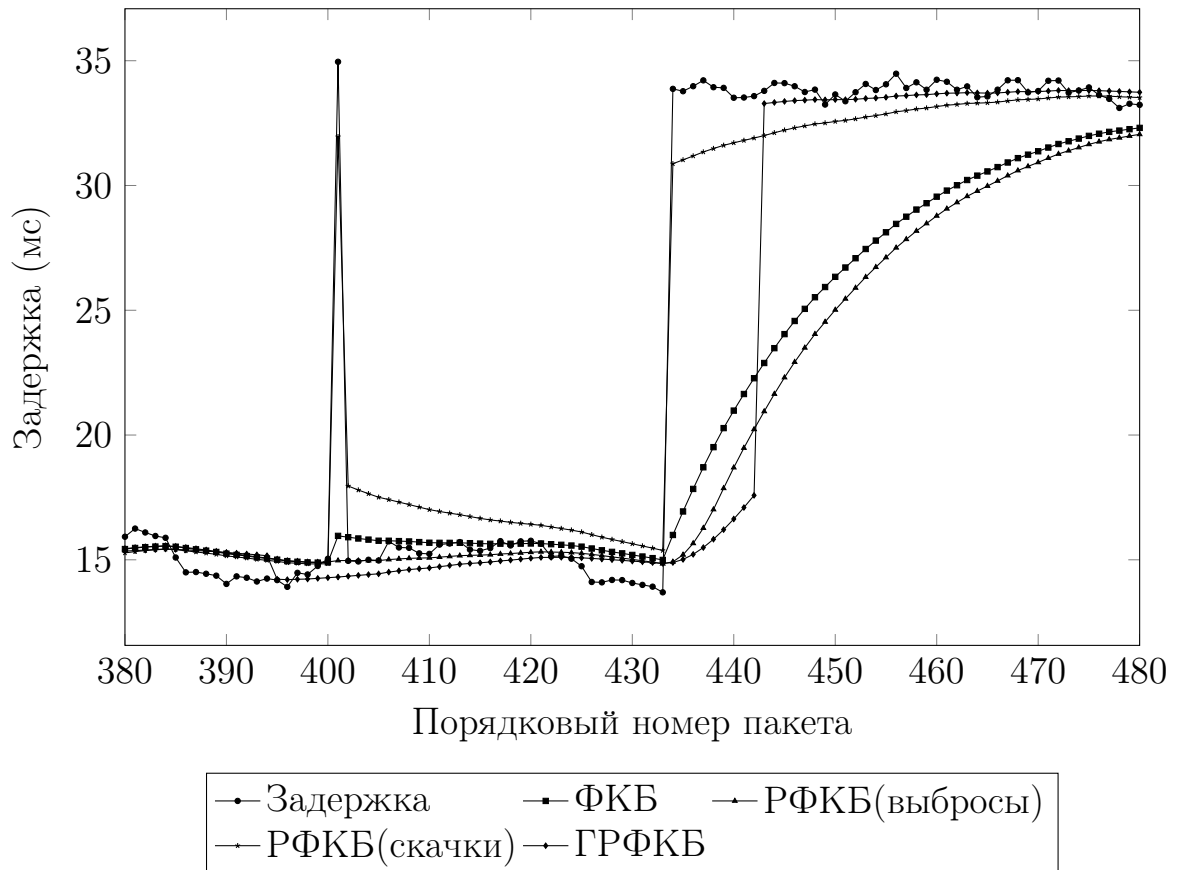


Рис. 3.7: Моделирование фильтрации в смешанной ситуации скачков и выбросов

Исследования СКО оценок джиттера задержки для рассмотренных алгоритмов выполнялись методом прямого вероятностного моделирования. В случае отсутствия скачков и выбросов задержки эмпирические оценки СКО погрешности фильтрации задержки пакетов были получены путем усреднения по времени одной реализации объемом  $10^5$  отсчетов. При оценке ошибки фильтрации задержки с выбросами и скачками оценка выполнялась усреднено по ансамблю реализаций того же объема входных данных на интервалах времени, которые содержат нестационарность. Интервал, на котором рассчитывалась ошибка фильтрации для каждого выброса и скачка, в работе был выбран равным 40 тактам работы фильтра.

Жирным шрифтом выделены лучшие результаты оценок по сравнению с другими фильтрами для каждой шумовой ситуации. Для ситуации с вы-

Таблица 3.2

**СКО оценки фильтров в разных ситуациях  
зашумленности**

Тип фильтра	Условия без выбросов и скачков	Условия с выбросами	Условия со скачками	Условия с выбросами и скачками
ФКБ	<b>0,1327</b>	0,1722	0,6024	0,2371
РФКБ (для выбросов)	0,1685	<b>0,163</b>	0,6515	0,3052
РФКБ (для скачков)	0,135	0,19	<b>0,5024</b>	0,2630
ГРФКБ	0,139	0,168	0,5523	<b>0,1869</b>

бросами и скачками наилучший результат показал гибридный робастный фильтр Калмана.

### 3.6. Выводы по третьему разделу

1. Учитывая нелинейный и нестационарный характер математической модели джиттера, применение классических методов управления, способных скомпенсировать нежелательные скачки и выбросы в рамках линейных процедур, представляется невозможным. Отсутствие надежных статистических данных о нестационарной обстановке не дает возможности использовать параметрические методы принятия решений. В этих условиях рациональней всего использовать непараметрические, робастные алгоритмы свободные от распределения.
2. В работе рассмотрены различные состояния статистики процесса джиттера и разработаны робастные алгоритмы, как для стационарного, так и для нестационарного состояния. Общей моделью наблю-

дения для этих алгоритмов является модель засоренного распределения Хьюберта.

3. Для нестационарной обстановки, преимущественно имеющей место на практике, предложено использовать рекурсивные методы оценки и управления джиттером. К рекурсивным методам, реализованным в пространстве состояний, относятся методы стохастической аппроксимации, которые оптимальны для оценки случайных величин, а также фильтры Калмана-Бьюси, которые оптимальны для случайных процессов.
4. С использованием модернизированных уравнений состояния и наблюдения удалось синтезировать робастные процедуры оценки состояния джиттера, основываясь на выборе универсального вида управления — управление наблюдением. Робастный фильтр Калмана-Бьюси удалось представить в виде гибридного алгоритма, который при оценке случайных процессов содержащих скачки и выбросы, обеспечивает переход из одного режима в другой автоматически. Предложенный метод является универсальным для решения широкого круга задач при неопределенной статистике в частности в алгоритмах, которые содержат процедуры автоматического выбора режима оценки с ориентацией на наличие выбросов и скачков.
5. Проведен сопоставительный анализ качества оценивания джиттера для различных модернизаций фильтра Калмана-Бьюси и получены численные данные. При сопоставлении полученных результатов с данными оптимального фильтра оказалось, что модернизированный фильтр обладает устойчивым режимом в широком диапазоне изменения статистических параметров.
6. Проведен сравнительный анализ ряда робастных и традиционных линейных алгоритмов. В результате анализа оказалось, что робастные алгоритмы имеют время сходимости, исчисляемое 3-5 шагами,

в то время как линейные сходятся за 50-100 шагов. Было проведено исследование точности робастных алгоритмов. Как показал анализ, в установившемся режиме робастные и линейные алгоритмы сопоставимы по эффективности: их апостериорные дисперсии практически идентичны. В ситуации скачка или выброса линейные алгоритмы, как правило, расходятся, в то время как робастный дает устойчивую оценку.

7. Учитывая возможность использования теоремы о разделении, алгоритм управления компенсацией джиттера может состоять из двух частей: оптимальной оценки стохастического процесса и детерминированного управления, как функции от оценки. В качестве управления может быть использован алгоритм управления состоянием или наблюдением. Как в том, так и в другом случае алгоритм оценки остается практически неизменным.

## РАЗДЕЛ 4

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ БУФЕРОМ КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА

Существующие телекоммуникационные системы активно используют различные методы управления: ситуационные, основанные на логике лиц, принимающих решение; автоматические; автоматизированные. Вместе с тем, за последние годы все более процедур в телекоммуникационных сетях новых поколений осуществляется автоматически, с оптимизацией этих процедур, что позволяет за кратчайшее время получать наибольший эффект от управления данными процедурами.

В существующих технологиях большой удельный вес занимают методы управления, основанные на принципах Понселе. Данный принцип основан на предположении о том, что любому обнаруженному возмущению находится адекватное управление, реагирующее на это возмущение. Структурная схема управления, функционирующая по принципу Понселе, показана на рис. 4.1 [?].

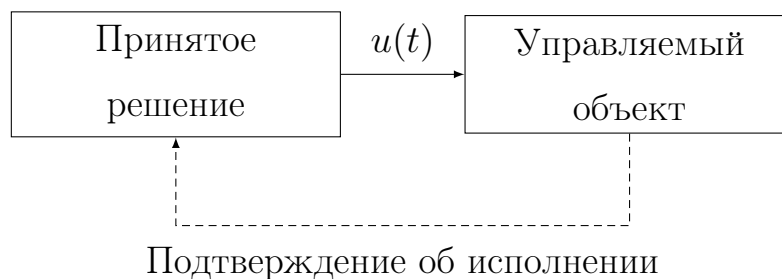


Рис. 4.1: Схема управления по возмущению (принцип Понселе)

Логично, что алгоритм компенсации джиттера должен быть реализован на основе подстройки линии задержки, как результат на отклонение оценки задержки. Из этого следует, что принцип управления Понселе для синтеза

алгоритма управления буфером не подходит. Рассмотрим принцип Уатта, который основан на управлении по отклонению. Данный принцип управления используется в тех устройствах, выходные сигналы которых имеют те или иные отклонения от средних или типовых значений. По сути, принцип Уатта лежит в основе построения систем автоматического управления. Структурная схема устройства управления, построенного по принципу Уатта, представлена на рис. 4.2 [?].

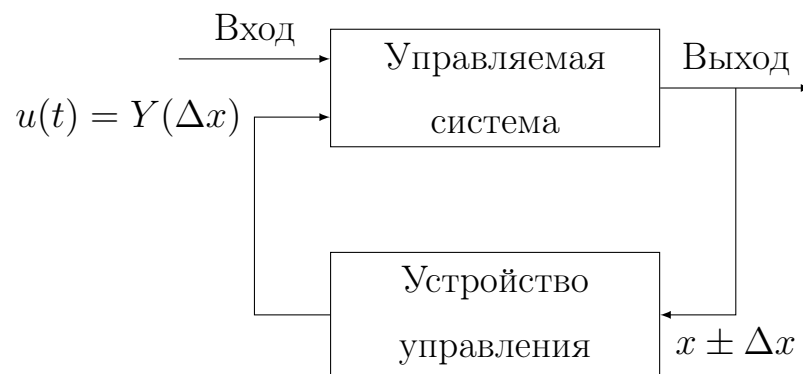


Рис. 4.2: Схема управления по отклонению (принцип Уатта)

Методы, основанные на данном принципе, могут быть реализованы как в централизованном, так и в децентрализованном варианте. Их реализация основывается на методах теории оптимального управления, в терминах переменных состояния. В рамках методов переменных состояния рассматривают два основных вида управления:

- управление состоянием системы;
- управление наблюдением.

Близкие по теоретическим методам, эти виды управлений приводят к различным алгоритмическим решениям. Назначение этих управлений также различно.

## 4.1. Анализ методов оптимального управления

### 4.1.1. Управление состоянием системы

Данный вид управления предназначен для перевода состояния системы из одних фазовых координат в другие для достижения требуемой структуры или режима сетевого элемента или всей сети в целом. Для нахождения нужного управления выбирают критерий оптимальности, в качестве которого обычно используют среднеквадратичный критерий [?]:

$$J(\vec{x}, u) = \frac{1}{2}x^T(t_F)Dx(t_F) + \frac{1}{2} \int_0^{t_F} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt, \quad (4.1)$$

где  $t_F$  - финальное время, за которое достигается цель управления. Если система стохастическая, то вместо (4.1) используют математическое ожидание критерия [?]:

$$M\{J(\vec{x}, u)\} \rightarrow \min_x. \quad (4.2)$$

Значение управления  $u(t)$  находят, подставляя в (4.1) или (4.2) соответствующее уравнение состояния:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + C\xi(t). \quad (4.3)$$

Для решения различных задач связи наиболее адекватным оказывается критерий (4.2). При этом, условия теоремы о разделении дают основание вместо переменной  $x(t)$  в уравнениях (4.1-4.3) подставить значения оценки  $\hat{x}(t)$  и синтезировать управление по детерминистской схеме. Структура управления по состоянию системы представлена на рис. 4.3.

В соответствии с теорией управления, оптимальная траектория, по которой система переводится в требуемое фазовое состояние, определяется при минимизации гамильтона  $\mathcal{H}(t)$  вдоль этой траектории [?]:

$$\frac{d\mathcal{H}(t)}{du} \rightarrow 0, \quad (4.4)$$

где  $\mathcal{H}(t) = \frac{1}{2}x^T(t)Qx(t) + \frac{1}{2}u^T(t)Ru(t) + \lambda^T(t)Ax(t) + \lambda^T(t)Bu(t)$ .

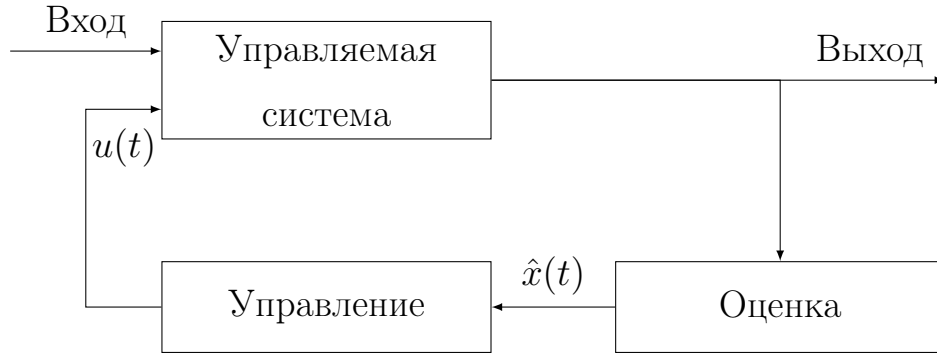


Рис. 4.3: Структурная схема управления системы с разделением на отдельные блоки стохастической оценки и детерминированного управления

При выполнении условий (4.4) оптимальное управление, соответствующее (4.4), находится в виде [?]:

$$u(t) = R^{-1}B\lambda(t), \quad (4.5)$$

где  $\lambda(t) = D(t_F)x(t_F)$  - приведенное, конечное в момент  $t_F$  состояние управляемой системы. После преобразования для дискретной системы управляющее воздействие имеет вид [?]:

$$u(k) = L(k, k-1)x(k-1), \quad (4.6)$$

где  $L(k, k-1) = -R^{-1}B^T P(k)$ ;  $P(k) = Q(k) + A^T[P^{-1}(k-1) + BR^{-1}B]A$ .

Рассмотренное управление носит название терминального или финального, поскольку считается, что после окончания времени  $t_F$  управление завершено и система переходит в равновесное состояние. Однако в нашем случае с помощью управления решается задача поддержания того или иного состояния джиттера на протяжении довольно длительного времени. В этом случае верхний предел интегрирования в (4.1) можно отнести в бесконечность.

Уравнение состояния системы  $x(k)$  можно представить в виде:

$$x(k+1) = e^{-\alpha\Delta t}x(k) + \sqrt{\sigma_x^2(1 - e^{-\alpha\Delta t})}\xi(k) + Bu(k), \quad (4.7)$$



где  $\alpha = \tau_{cor}^{-1}$ ,  $\Delta t$  - шаг дискретизации.

Предполагая состояние управляемой системы  $x(k)$  случайным, решение для критерия (4.1) будем находить в соответствии с (4.2), однако при этом придется использовать специальные методы интегрирования стохастических функций. Более рационально применить условия теоремы о разделении и вместо случайного состояния  $x(k)$  использовать его оценку  $\hat{x}(k)$ . Уравнение (4.5) при этом будем находить в виде:

$$u(k) = -\frac{BP(k)\hat{x}(k)}{R}. \quad (4.8)$$

Представленное выражение для уравнения (4.8) включает переходный и установившийся режимы. Для установившегося режима динамика управления зависит лишь от оценки состояния

$$u(k) = -\frac{BP\hat{x}(k)}{R}, \quad (4.9)$$

где  $\hat{x}(k+1) = e^{-\alpha\Delta t}\hat{x}(k) + \frac{P}{N_v}(y(k) - \hat{x}(k))$  - оценка дискретного состояния системы (4.7). Точность управления определяется точностью оценки состояния, поскольку в (4.9) другие неизвестные параметры и данные не входят.

#### 4.1.2. Управление наблюдением системы

В отличие от управления состоянием управление наблюдением не предполагает каких либо изменений внутренних свойств системы, наоборот - за счет управлений осуществляется преобразование базиса наблюдения.

Рассмотрим типовую ситуацию, пусть уравнение наблюдения содержит полезный сигнал  $c(t)$ , помеху  $n(t)$  и белый шум  $v(t)$  (рис. 4.4) [?]:

$$y(t) = c(t) + n(t) + v(t). \quad (4.10)$$

В качестве помехи может выступать сторонний сигнал, в другом случае помехой является отношение сигнала  $c(t) \pm \Delta c$ , где  $\Delta c \equiv n(t)$ . В частности,

если в качестве сигнала  $c(t)$  рассматривать фазу появления информационного пакета, то  $\Delta c(t)$  - является отклонением (джиттером). Решая задачу оценки джиттера в алгоритме управления наблюдением (4.8), решаем задачу управления компенсацией джиттера.

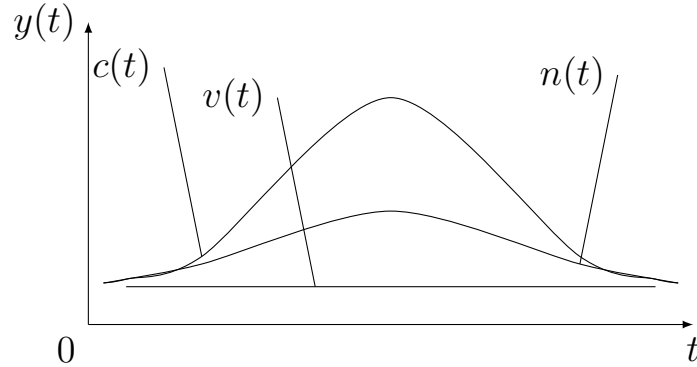


Рис. 4.4: Наблюдение сигнала с помехой и белым шумом

Очевидно, что когда уровни полезной составляющей и помеховой составляющей соизмеримы между собой, как это следует из рис. 4.4, получить удовлетворительное качество оценки затруднительно. В этой ситуации уместно использовать адаптивную компенсацию помеховой составляющей  $n(t)$ .

Необходимо сформировать такой сигнал, который способен уравновесить действие помехового воздействия  $n^*(t) \approx -n(t)$  [?], чтобы вычесть его из наблюдаемой реализации:

$$y^*(t) = c(t) + n(t) - n^*(t) + v(t) = c(t) + v(t) + \Delta n(t), \quad (4.11)$$

где  $\Delta n(t)$  - остаток некомпенсированной помеховой составляющей (остаточный джиттер).

Однако формированию компенсационного воздействия  $n^*(t)$  из основного источника наблюдения (4.10) мешает полезная составляющая  $c(t)$  и шум наблюдения  $\nu(t)$  - уровень которого может быть значительным (рис. 4.4). Таким образом, прямого решения нет. В связи с этим, задача компенсации расширяется и реализуется в два этапа: вначале находится

возможность создания компенсационного сигнала, а потом осуществляется сама компенсация помехи в алгоритме управления наблюдением.

#### 4.2. Синтез метода управления буфером компенсации джиттера на основе управления наблюдением системы

Как упоминалось ранее, из теории автоматического управления известна теорема о разделении [?, ?], утверждающая о том, что при среднеквадратичном критерии качества и при гауссовской ситуации, оптимальное управление можно построить из двух отдельных процедур: оптимальной стохастической оценки  $\hat{x}(k)$  и детерминированной процедуры управления:

$$u(t) = \mathcal{L}(k)\hat{x}(k), \quad (4.12)$$

Воспользуемся результатами данной теоремы.

Прежде, чем приступить к синтезу методов управления, следует уточнить, каким способом будет осуществляться управление буфером компенсации джиттера поступающих пакетов. Очевидно, это может быть реализовано с помощью аддитивной коррекции:

$$y(k) \pm \hat{u}(k) \quad (4.13)$$

или мультипликативной коррекции:

$$y(k)(l\hat{u}(k)), \quad (4.14)$$

где  $l$  - масштабирующий множитель.

Для разработки методов управления воспользуемся процедурой ФКБ (3.9). Очевидно, для решения задачи необходимо выбрать вариант управления наблюдением (4.11), поскольку именно наблюдаемую величину необходимо корректировать, выбирая или оценивая соответствующую величину коэффициента  $H(k)$ . В литературе [?, ?] процедуры оценки весовых коэффициентов известны как адаптивные алгоритмы Уидроу-Хоффа. Следуя

данной литературе, переобозначим  $H(k) \equiv W(k)$  и будем находить оптимальную оценку этого коэффициента на основании уравнения (3.9):

$$\hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) + A(k)[y(k) - \hat{W}(k)t_p(k)]t_p(k), \quad (4.15)$$

Значение  $W(k)$  представляет собой комплексный весовой коэффициент, обеспечивающий корректировку фазы компенсации джиттера.

Весовой коэффициент  $\hat{W}(k)$  может быть как вещественным, так и комплексным. В первом случае буфер компенсации джиттера обеспечивает процедуру в соответствии с (4.13). Структурная схема устройства управления, реализующего метод (4.15), представлена на рис. 4.5

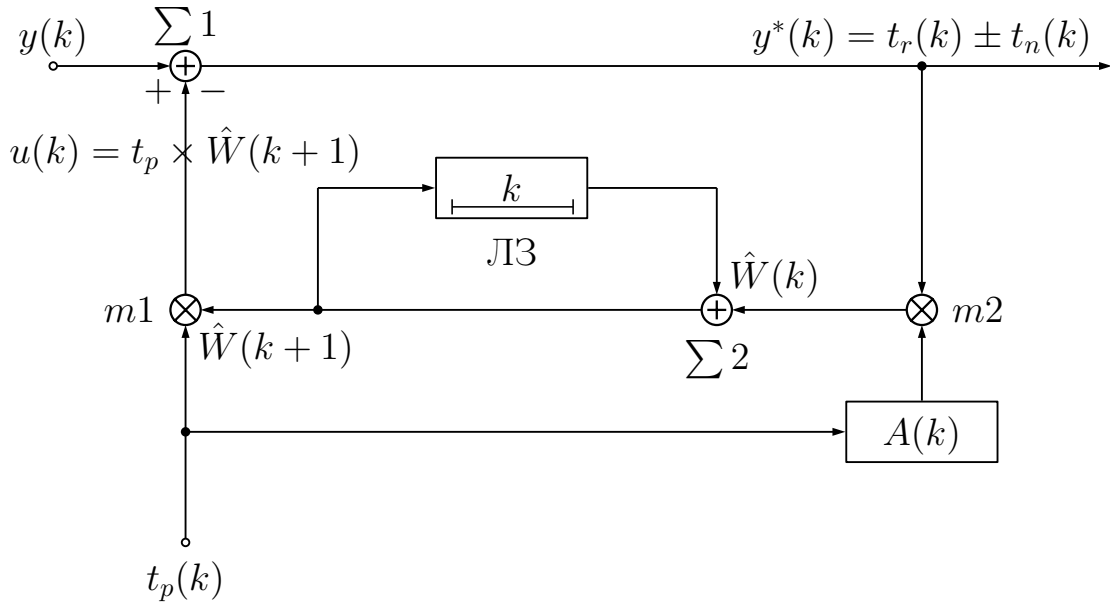


Рис. 4.5: Метод управления буфером компенсации джиттера с аддитивной коррекцией

Аналогично предыдущему методу также можно построить управление буфером компенсации джиттера с мультипликативной коррекцией (рис. 4.6)

Метод работает следующим образом. Время задержки каждого прибывшего пакета поступает на сумматор  $\Sigma 1$ . На второй вход этого устройства поступает управляющий сигнал  $u(k)$ , который содержит информацию о том, на сколько следует скорректировать задержку прибытия пакета:

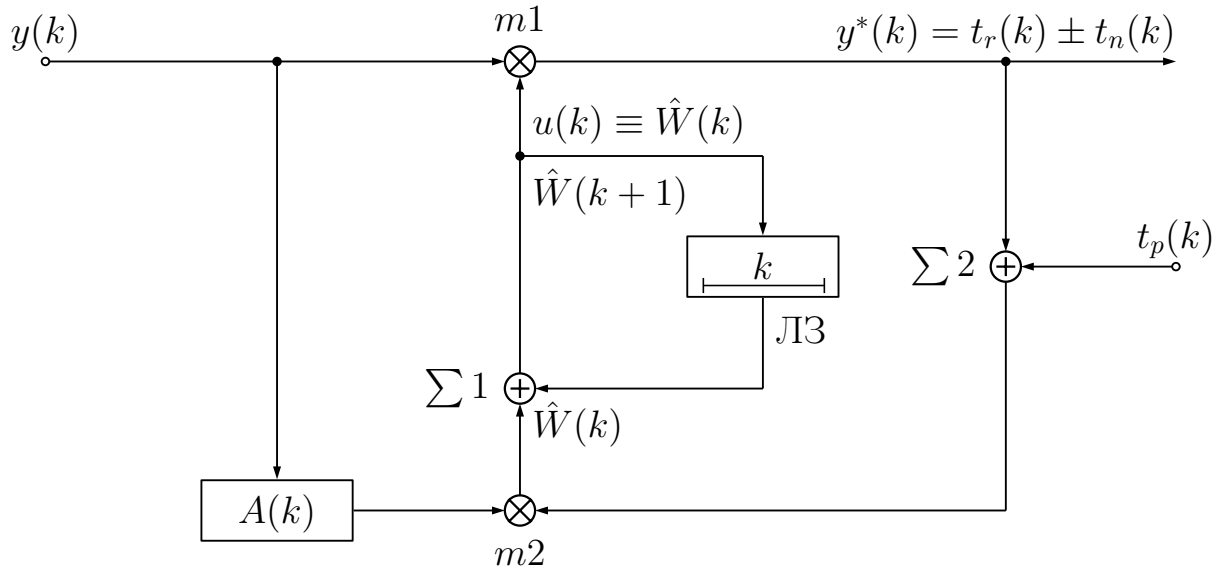


Рис. 4.6: Метод управления буфером компенсации джиттера с мультипликативной коррекцией

$$u(k) = t_p(k) \times \hat{W}(k+1), \quad (4.16)$$

где  $t_p(k)$  - ожидаемое время воспроизведения, которое состоит из двух составляющих: интервала между пакетами, полученного из заголовков пакета с помощью спецификации кодека передачи и начального смещения  $\Delta t^i$  (рис. 4.7), которое и является, на практике, размером буфера компенсации джиттера. Поскольку задержка  $y(k)$  носит случайный характер, то на выходе  $\Sigma 1$  всегда будет иметь место остаточная расстройка фазы  $\pm t_n(k)$ . Сигнал этой расстройки поступает на перемножитель  $m2$  на второй вход его поступает сигнал о фазе опорного сигнала  $t_p(k)$ . В результате перемножения на выходе  $m2$  имеем:

$$U_{m2} = (U_{tr} + U_{tn})U_{tp} = U_{tr}U_{tp} + U_{tn}U_{tp}. \quad (4.17)$$

После интегрирования все слагаемые, кроме последнего, в среднем равны нулю, поскольку они не коррелированы между собой.

$$U_u = \int U_{tn}U_{tp}dt \neq 0. \quad (4.18)$$

Полученное управление (4.18) является, по сути, сигналом весового коэффициента:

$$u(k) \equiv \hat{W}(k+1). \quad (4.19)$$

В результате действия такой кольцевой схемы с обратной связью постепенно уменьшается остаточная задержка  $t_n(k)$  и после некоего минимального значения наступает стабилизация.

Данная структура (рис. 4.5) используется многими специалистами и хорошо зарекомендовала себя на практике в алгоритмах управления адаптивными решетками (ААР) [?, ?, ?].

Близкой по принципу является работа другой адаптивной схемы (рис. 4.6). Здесь сигнал рассогласования  $U_{tn}$  между  $t_p(k)$  и  $t_r$  формируется на выходе сумматора  $\sum 2$ . Далее на выходе перемножителя  $m2$  образовывается суммарный сигнал рассогласования фаз, аналогичный рис. 4.5 и после интегратора ( $\sum 1$  и ЛЗ) формируется весовой коэффициент  $\hat{W}(k+1)$ , мультипликативно воздействующий на устройство  $m1$ , содержащий корректор фазы последовательности  $t_r(k)$  до тех пор, пока на выходе  $\sum 2$  будет действовать сигнал рассогласования фаз  $t_n(k)$ .

Размер буфера  $\Delta t^i$  рассчитывается только для первого пакета каждого речевого потока на основе оценки отклонения  $\hat{V}(k)$  от условного среднего значения сетевой задержки (3.39-3.40):

$$\hat{V}(k) = \alpha \cdot \hat{V}(k-1) + (1-\alpha) \cdot V(k), \quad (4.20)$$

$$V^i(k) = \begin{cases} |\hat{x}(k) - x(k)|, & K(k)\Delta y \leq b; \\ V(k-1), & K(k)\Delta y > b, \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\Delta t^i = \begin{cases} \gamma \cdot \hat{V}^{i-1}, & \hat{V}^{i-1} \geq \Delta t_{min}; \\ \gamma \cdot \Delta t_{min}, & \hat{V}^{i-1} < \Delta t_{min}, \end{cases} \quad (4.22)$$

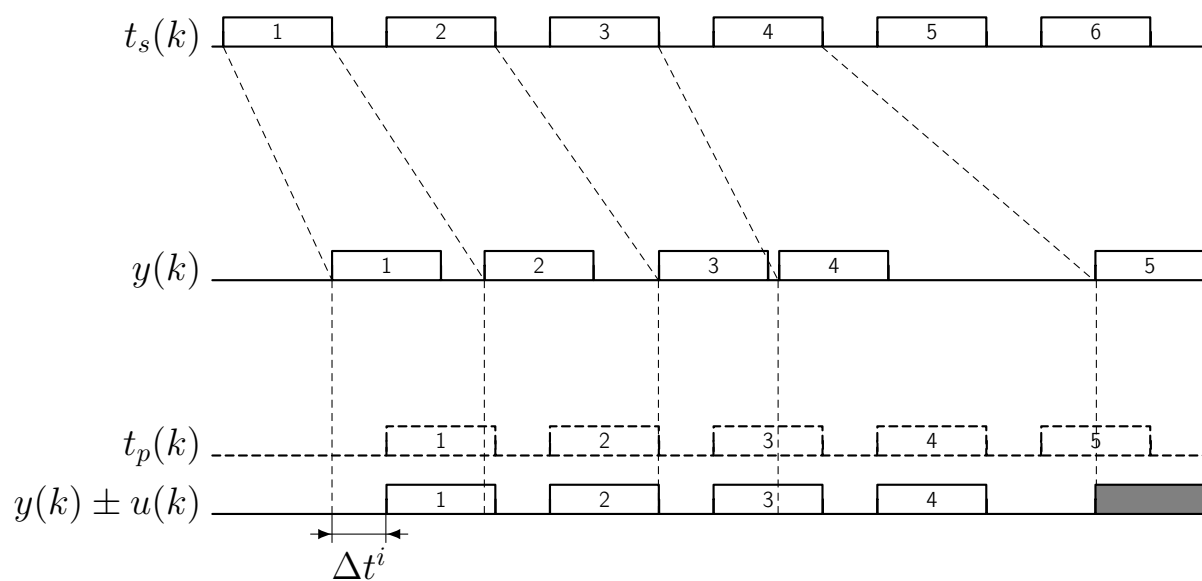


Рис. 4.7: Управление буфером компенсации джиттера с помощью предложенных методов

где  $\gamma$  - константа для управления процентом отбрасываемых пакетов и задержкой.

### 4.3. Синтез метода управления буфером компенсации джиттера на основе оценки джиттера ГРФКБ

Полученный метод управления, изображенные на рис. 4.6-4.5 обладает рядом недостатков:

- рассчитан на работу с входящим воздействием гауссовского распределения, в то время, как у нас сугубо не линейная задача;
- полученный метод управления является чрезмерно усложненным по сравнению с простыми методами управления буфером, которые уже реализованы на практике [?, ?, ?, ?, 24].

Вследствие чего рассмотрим более простой метод управления буфером (рис. 4.8).

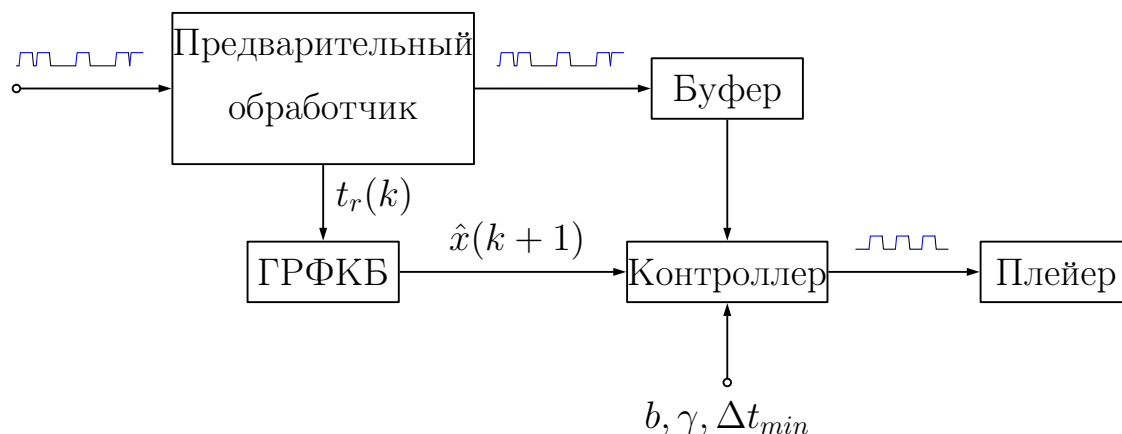


Рис. 4.8: Блок-схема метода управления буфером компенсации джиттера

На рис. 4.8 пакеты прибывают на блок предварительной обработки, где анализируются заголовки пакетов, после чего принимается решение о помещении пакета в буфер. Полученные временные характеристики пакета передаются на блок ГРФКБ, где производится оценка текущего джиттера задержки для конкретного потока данных. Основное управление производится на контроллере:

- определяются речевые потоки;
- на основе оценки полученной от ГРФКБ (3.39-3.40) и данных опре-



- деленных администратором системы рассчитывается размер буфера для первого пакета в речевом потоке;
- если предварительная статистика отсутствует или устарела, то для первого пакета в речевом потоке устанавливается размер буфера по умолчанию;
  - для всех остальных пакетов размер буфера детерминировано рассчитывается на основе времени воспроизведения первого пакета этого речевого потока и интервала между пакетами, который был определен во время передачи.

#### 4.4. Выводы по четвертому разделу

1. В соответствии с теорией об оптимальном управлении, управление может быть реализовано с помощью двух методов: управление наблюдением и управление состоянием. В работе рассмотрены оба эти метода. В алгоритме управления состоянием полученная оценка текущего состояния джиттера воздействует непосредственно на указанное состояние и соответствующим образом корректирует его. В алгоритме управления наблюдением предполагается осуществление автоматического слежения за состоянием процесса джиттера с тем, чтобы временной зазор между генерируемой последовательностью пакетов на стороне отправителя и получаемой последовательностью на стороне получателя оставался минимальный.
2. Для синтеза алгоритма управления буфером компенсации джиттера целесообразно выбрать метод автоматического управления, функционирующего по принципу Уатта. Сама компенсация при этом относится к классу управления наблюдением.
3. Функционирование метода компенсации джиттера основано на компенсационной процедуре при которой фаза первого пакета  $n$ -ого ре-

чевого потока выбирается на основании статистики наблюдаемой в канале.

4. В качестве управляемого объекта в методе компенсации джиттера используется комплекс весовых коэффициентов, подстраивающих фазу приходящей из линии последовательности пакетов к фазе опорной последовательности.
5. Предложено два метода управления алгоритмом компенсацией джиттера за счет преобразования базиса наблюдения, обеспечивающих возможность использования для аддитивной и мультипликативной коррекции фазы джиттера.
6. Предложена более простой адаптивный метод управления алгоритмом компенсацией джиттера, позволяющий формировать буфер для каждого речевого потока, который и будет использован в дальнейшем для моделирования и анализа эффективности для предложенного метода.

## РАЗДЕЛ 5

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО БУФЕРА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА С ОСНОВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЖИТТЕРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

Одним из важнейших этапов в ходе разработки математической модели джиттера задержки прибытия пакетов и методов компенсации джиттера являются экспериментальные исследования этих решений. Содержание подобных исследований удобно представить в виде следующих частных задач:

- анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации изменения маршрута передачи пакетов;
- анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации хэндовера между базовыми станциями;
- анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети;
- анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE;
- анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех;
- Выработка рекомендаций по практическому применению разработанных методов компенсации джиттера в сетях LTE.

При решении поставленной задачи для получения наиболее точной информации о функционировании предложенного алгоритма буфера компенсации джиттера используются методы имитационного моделирования. Для анализа эффективности предложенных методов компенсации джитте-

ра (3.37,3.38), описанных в третьем и четвертом разделе, проведем сравнение с классическим адаптивным алгоритмом буфера компенсации джиттера (1.1-1.3), который описан в первом разделе [25]. Для моделирования использовались следующие входные данные  $\gamma = 4$  и  $\Delta t = 5$ .

### 5.1. Описание имитационного эксперимента по исследованию джиттера в сетях LTE

С целью проверки эффективности предложенных сетевых решений обычно применяются средства аналитического и имитационного моделирования и натурного или лабораторного эксперимента. Причем в рамках средств аналитического моделирования используются программные пакеты MatLab, Octave, MathCad, Maple [?, ?, ?, ?], имитационного — NS2 (Network Simulator 2), NS3 (Network Simulator 3) [?], TOTEM (TOolbox for Traffic Engineering Methods), EQRS (Extended QoS-based Routing Simulator), MaRS (Maryland Routing Simulator). Эти специализированные пакеты позволяют достаточно точно отобразить функционирование телекоммуникационной сети или отдельных ее процессов.

Рассмотрим более детально инструмент имитационного моделирования NS3. NS3 представляет собой симулятор дискретных событий сети, который ориентирован в первую очередь для научных исследований и образовательных целей. NS3 является свободным программным обеспечением под лицензией GNU GPLv2, и находится в открытом доступе для исследований, разработки и использования.

NS3 проект стремится к созданию твердого ядра моделирования, которое хорошо документировано, простое в использование и отладке, и которое обеспечивает потребности всего рабочего процесса моделирования, от моделирования до сбора и анализа данных. Кроме того, NS3 программная инфраструктура способствует развитию имитационных моделей, которые

являются достаточно реалистичными, чтобы использовать NS3 в качестве эмулятора сети в реальном времени. NS3 симулятор поддерживает моделирование как проводных, так и беспроводных сетей, тем не менее, подавляющее большинство разрабатываемых моделей сфокусировано на моделировании беспроводных IP сетей, которые включают модели для Wi-Fi, WiMAX и LTE.

Опишем имитационную модель эксперимента для исследования джиттера в сетях LTE. Обзор имитационной модели LTE-EPC изображен на рис.

**5.1.** Состоит из двух основных компонентов:

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

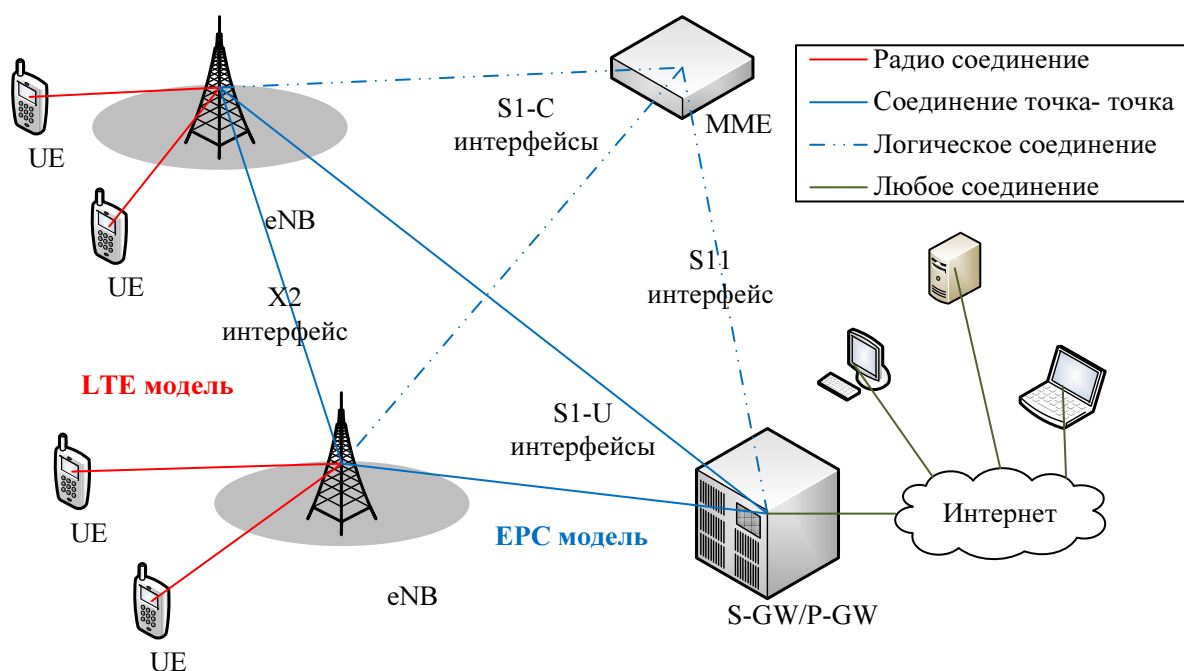


Рис. 5.1: Обзор имитационной модели LTE-EPC [?]

### 5.1.1. Обзор архитектуры LTE модели в сетевом симуляторе NS3

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

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

Архитектура физического и канального уровня для модели узла UE представлена на рис. 5.2 и для модели узла eNB представлена на рис 5.3.

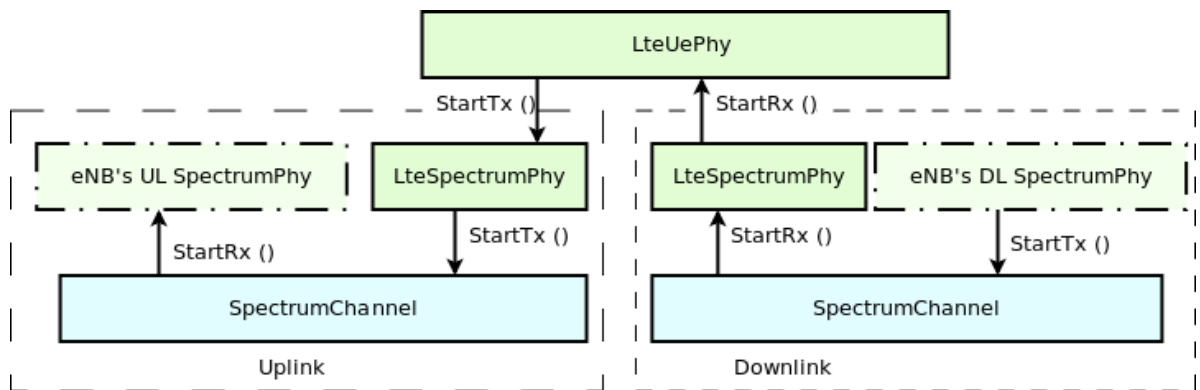


Рис. 5.2: Архитектура физического и канального уровня для модели UE [?]

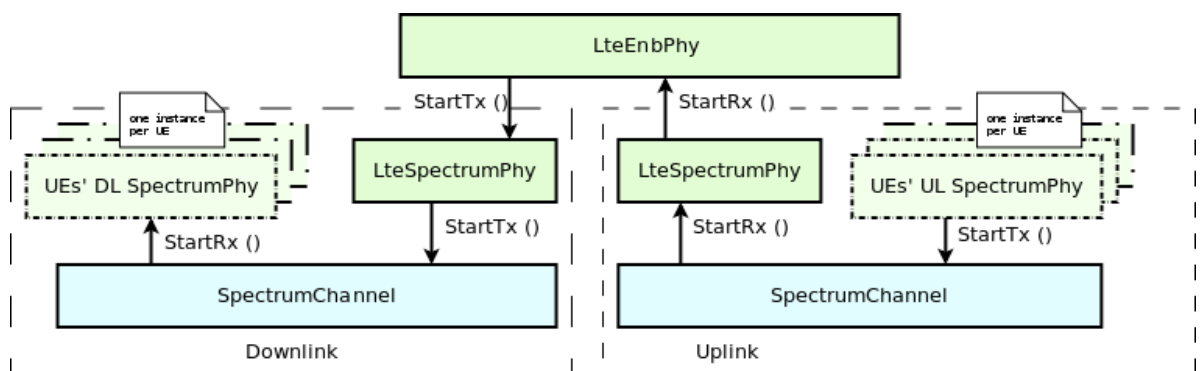


Рис. 5.3: Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [?]

### 5.1.2. Обзор архитектуры EPC модели в сетевом симуляторе NS3

Модели EPC обеспечивают средства для моделирования сквозного IP соединения поверх LTE модели. В частности, поддерживают соединение нескольких UE с интернетом через сеть радиодоступа с несколькими узлами eNB, подключенными к одному S-GW/P-GW узлу. Эта топология сети изображена на рис. 5.4. Основное внимание в модели EPC в настоящее время сфокусировано на плоскости данных EPC. Чтобы понять архитектуру этой модели, необходимо ознакомиться с рис. 5.4, где представлен сквозной LTE-EPC стек протоколов, таким образом, каким это реализовано в симуляторе. Из рисунка видно, что самым большим упрощением, введенным в модель EPC для плоскости данных, является включение функций S-GW и P-GW в один узел S-GW/P-GW, который устраняет необходимость S5 или S8 интерфейсов, определенных в 3GPP. С другой стороны, все уровни протокола S1-U и протокола радиосвязи LTE стека, указанные в 3GPP, присутствуют.

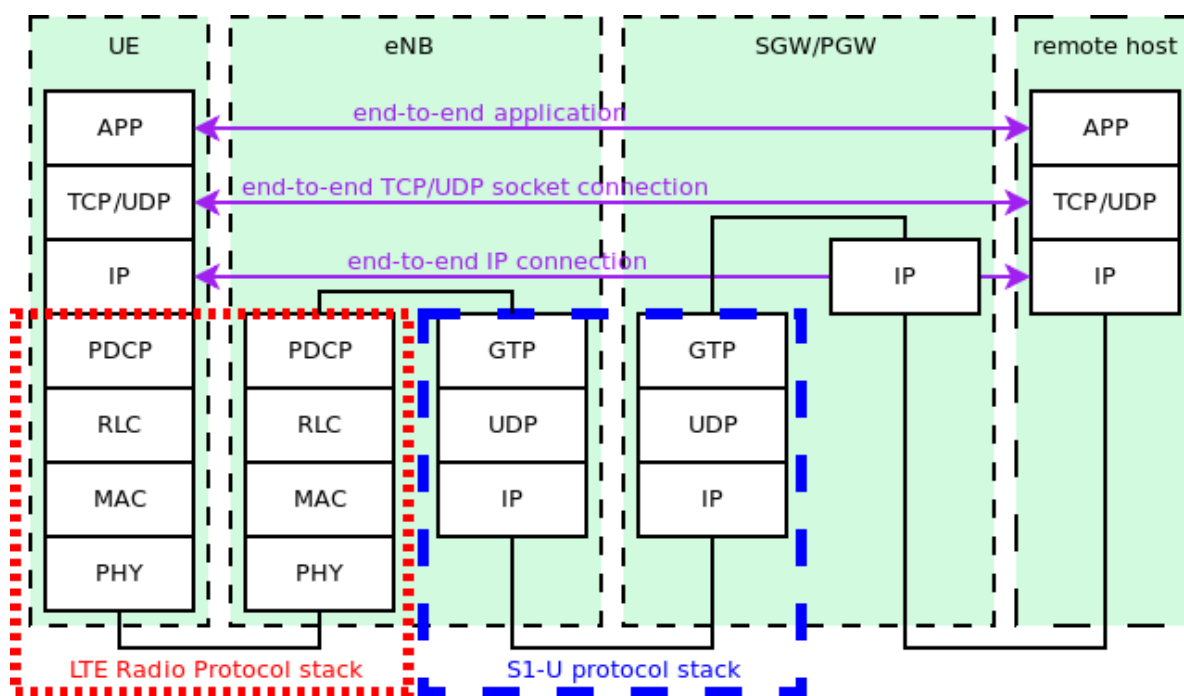


Рис. 5.4: Архитектура физического и канального уровня для модели eNB [?]

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

Для начала, рассмотрим случай нисходящей линии связи, который изображен на рис 5.5. IPv4 пакеты нисходящей линии связи генерируются от общего удаленного хоста и адресуются к одному из устройств UE. Интернет маршрутизация будет заботиться о пересылке пакета на публичный сетевой интерфейс NetDevice узла S-GW/P-GW, который подключен к Интернету (этот интерфейс Gi в соответствии с 3GPP терминологией). S-GW/P-GW имеет сетевой интерфейс VirtualNetDevice которому присваивается IP-адрес шлюза для подсети UE, следовательно, правило статической маршрутизации приведет к тому, что входящий пакет из Интернета будут проходить через VirtualNetDevice. Это сетевое устройство начинает GTP/UDP/IP туннельную процедуру, путем пересылки пакетов на выделенное приложение на узле S-GW/P-GW, которое называется



EpcSgwPgwApplication. Это приложение выполняет следующие операции:

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

Как следствие, пакет со сквозным IP заголовком с добавленными IP, UDP и GTP заголовками отправляется через S1 соединение к eNB, где он принимается и доставляется локально (в качестве адреса назначения подставляется приватный адрес eNB). Локальный процесс доставки отправит пакет через UDP сокет к выделенному приложению EpcEnbApplication.

Это приложение выполняет следующие операции:

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

Следует отметить, что в этот момент, внешним заголовком пакета является

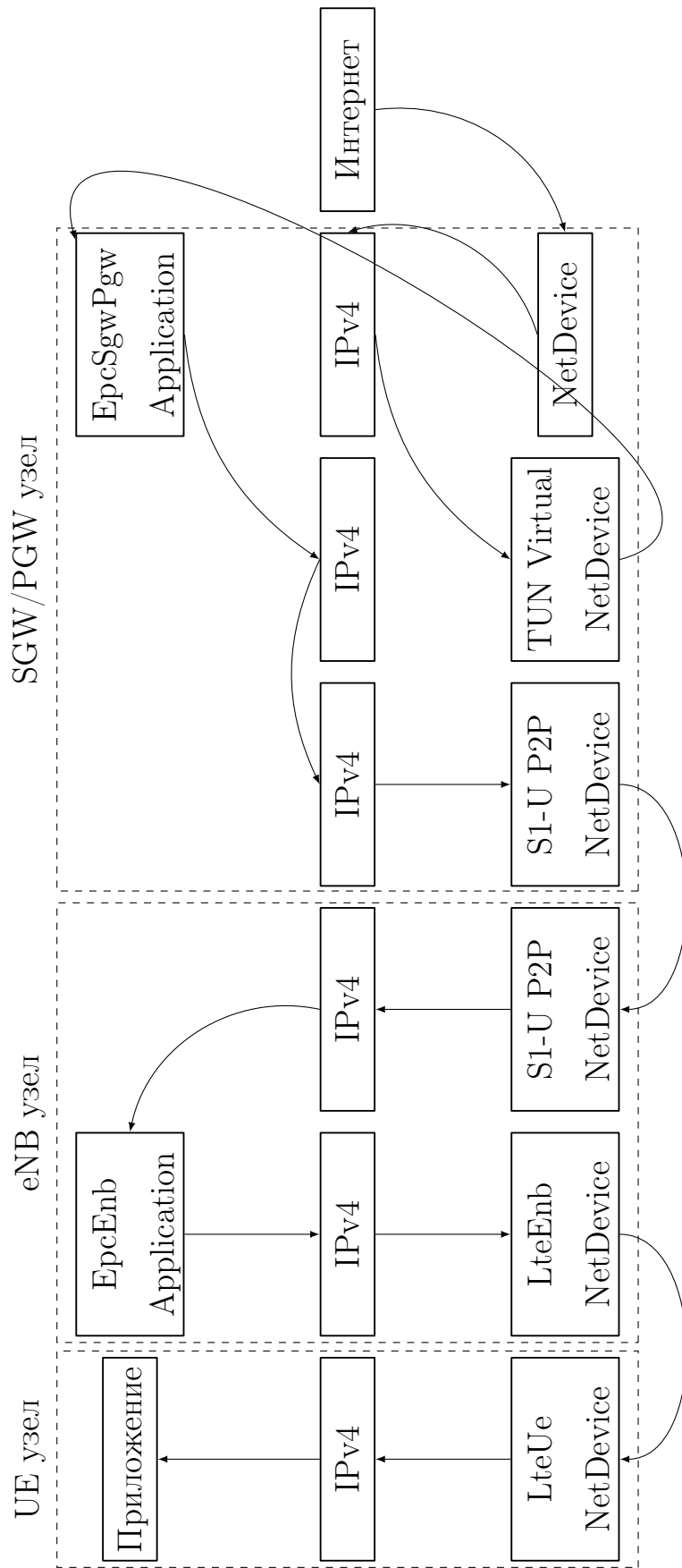


Рис. 5.5: Поток данных нисходящей линии связи между интернетом и узлом UE [?]

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

В случае восходящего соединения, показанного на рис. 5.6, IP пакеты создаются приложением внутри UE, и передаются через локальный стек протоколов TCP/IP к приложению LteUeNetDevice узла UE. LteUeNetDevice затем выполняет следующие операции:

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

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

1. Извлекает RBID из тега LteRadioBearerTag в пакете.
2. Определяет соответствующий ePS канал и GTP-U TEID за счет использования взаимно-однозначного соответствия между S1-U каналами и радиоканалами.

3. Добавляет GTP-U заголовок пакета, в том числе TEID, который был определен ранее.
4. Посылает пакет на S-GW/P-GW узел через UDP сокет подключенный к S1-U сетевому точка-точка устройству.

В этот момент пакет содержит S1-U IP, UDP и GTP заголовки в дополнение к первоначальному сквозному IP заголовку. Когда пакет поступает на соответствующий S1-U P2P NetDevice на узле S-GW/P-GW, он доставляется локально. Локальный процесс доставки направляет пакет к EpcSgwPgwApplication через соответствующий UDP сокет.

EpcSgwPgwApplication затем удаляет заголовок GTP и пересылает пакет на VirtualNetDevice. На данный момент, внешним заголовком пакета является сквозной IP заголовок. Следовательно, если адрес назначения в этом заголовке является удаленным узлом в интернете, пакет отправляется в интернет через соответствующее сетевое устройство NetDevice на узле S-GW/P-GW. В случае, если пакет адресован другому UE, IP стек S-GW/P-GW перенаправит пакет снова к сетевому устройству VirtualNetDevice, и пакет будет проходить процесс доставки через нисходящее соединение для того, чтобы достичь пункта назначения UE.

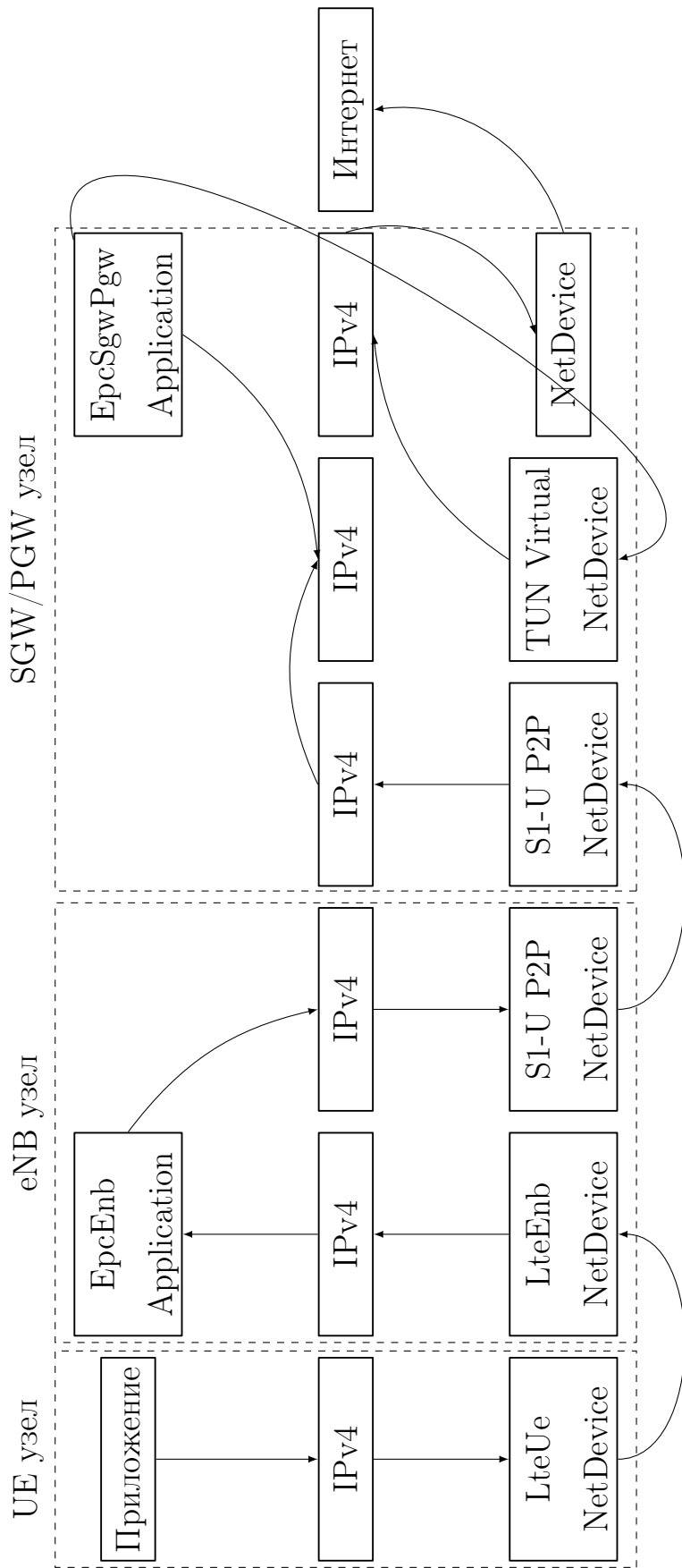


Рис. 5.6: Поток данных восходящей линии связи между узлом UE и интернетом [?]

## 5.2. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации изменения маршрута передачи пакетов

Как уже упоминалось во втором разделе, обновление таблицы маршрутизации может привести к задержке небольшого количества пакетов. Проведем эксперимент для анализа эффективности работы предложенного метода компенсации джиттера. На рис. 5.7 изображен ряд задержек, полученных в сетевом симуляторе NS3 и основные промежуточные величины необходимы для расчета размера буфера: оценка задержки (1.2) и дисперсия оценки (1.3) для классического адаптивного буфера [25] и оценка задержки (3.37, 3.38) и дисперсия оценки (1.3) для предложенного метода.

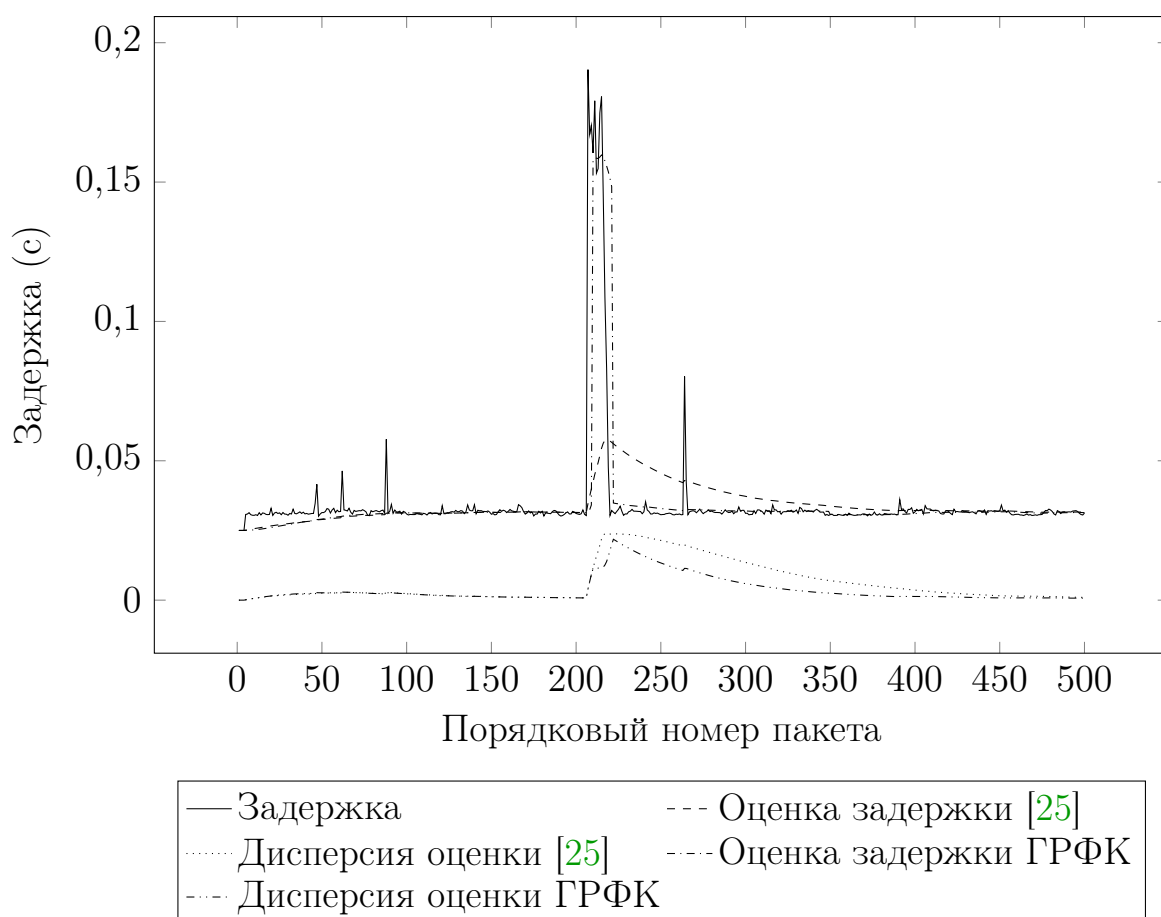


Рис. 5.7: Основные промежуточные величины, необходимые для расчета размера буфера

Оценка задержки используется как время отправки первого пакета ре-

чевой активности. Дисперсия оценки используется для расчета времени задержки буфера на основе (4.20-4.22). Как можно увидеть на рис. 5.8, размер классического буфера компенсации джиттера значительное время остается завышенным (в данном случае на протяжении 3 интервалов речевой активности), в то время как предложенный метод менее инерционен и быстрее адаптируется к изменениям сетевой ситуации.

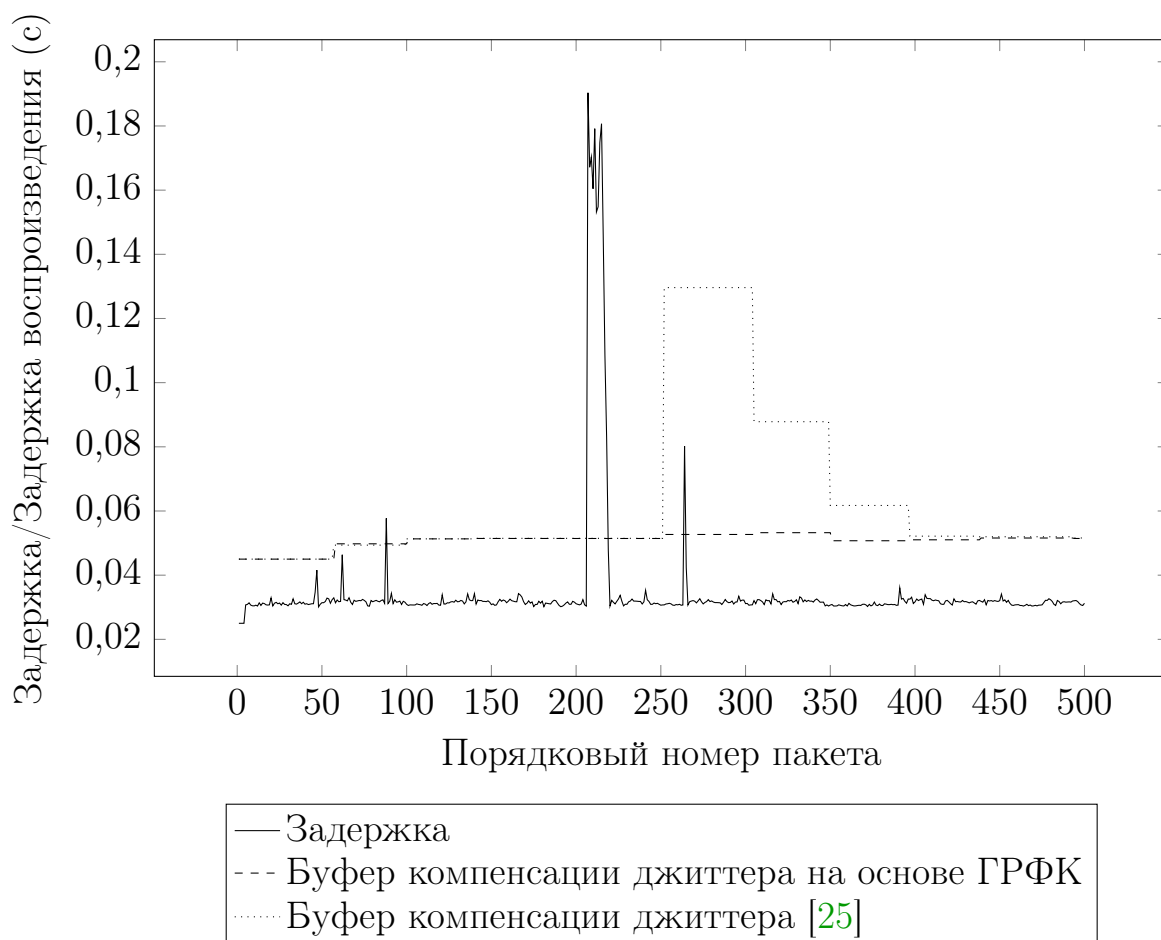


Рис. 5.8: Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [25] в ситуации изменения маршрута передачи пакетов

Благодаря предложенному методу компенсации джиттера удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 63 мс до 50 мс, при этом вероятность потери пакетов увеличилась с 2,7% до 2,8%. В текущей реализации оценка качества на основе Е-модели показала улучшение качества на 2 пункта.

### 5.3. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации хэндовера между базовыми станциями

Проведем моделирование оценки буфера компенсатора джиттера при хэндовере в сети LTE. Для моделирования будем использовать данные, полученные во втором разделе. Как можно увидеть из рис. 5.9, размер классического адаптивного буфера значительное время остается завышенным после выброса задержки во время установления соединения, в то время как в предложенном методе отсутствует этот недостаток. Во время переключения абонента между базовыми станциями, выбросы задержек оказались незначительными и практически не влияли на качество предоставления речи.

В текущей реализации благодаря предложенному методу компенсации джиттера удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 31 мс до 23 мс, при этом вероятность потери пакетов практически не изменилась, и составила 1,7% для обоих методов компенсации джиттера. В текущей реализации оценка качества на основе E-модели показала улучшение качества на 1 пункт.



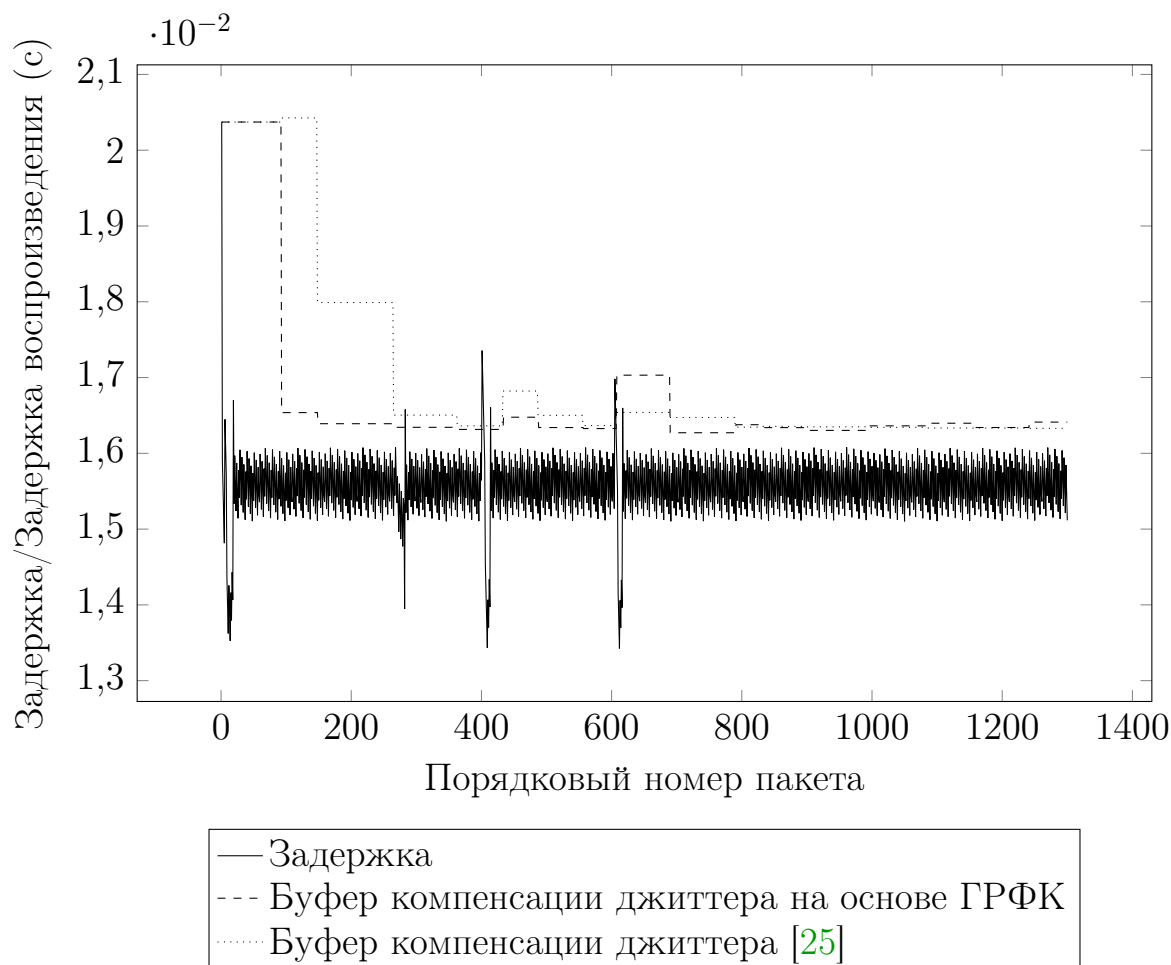


Рис. 5.9: Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [25] в ситуации хэндовера

#### 5.4. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети

Проведем моделирование оценки буфера компенсатора джиттера в ситуации перегрузки в сети. Как уже упоминалось во втором разделе, перегрузки в каналах связи могут привести к длительным скачкообразным изменениям сетевой задержки (рис. 5.10). На рис. 5.10 видно, что предложенный метод компенсации джиттера позволяет более точно оценить текущее состояние сетевой задержки, что позволяет значительно уменьшить вносимую буфером задержку.

В текущей реализации благодаря предложенному методу компенсации

джиттера удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 31 мс до 12 мс, при этом удалось уменьшить вероятность потери пакетов с 30% до 12%. В текущей реализации оценка качества на основе E-модели показала улучшение качества на 5 пунктов.

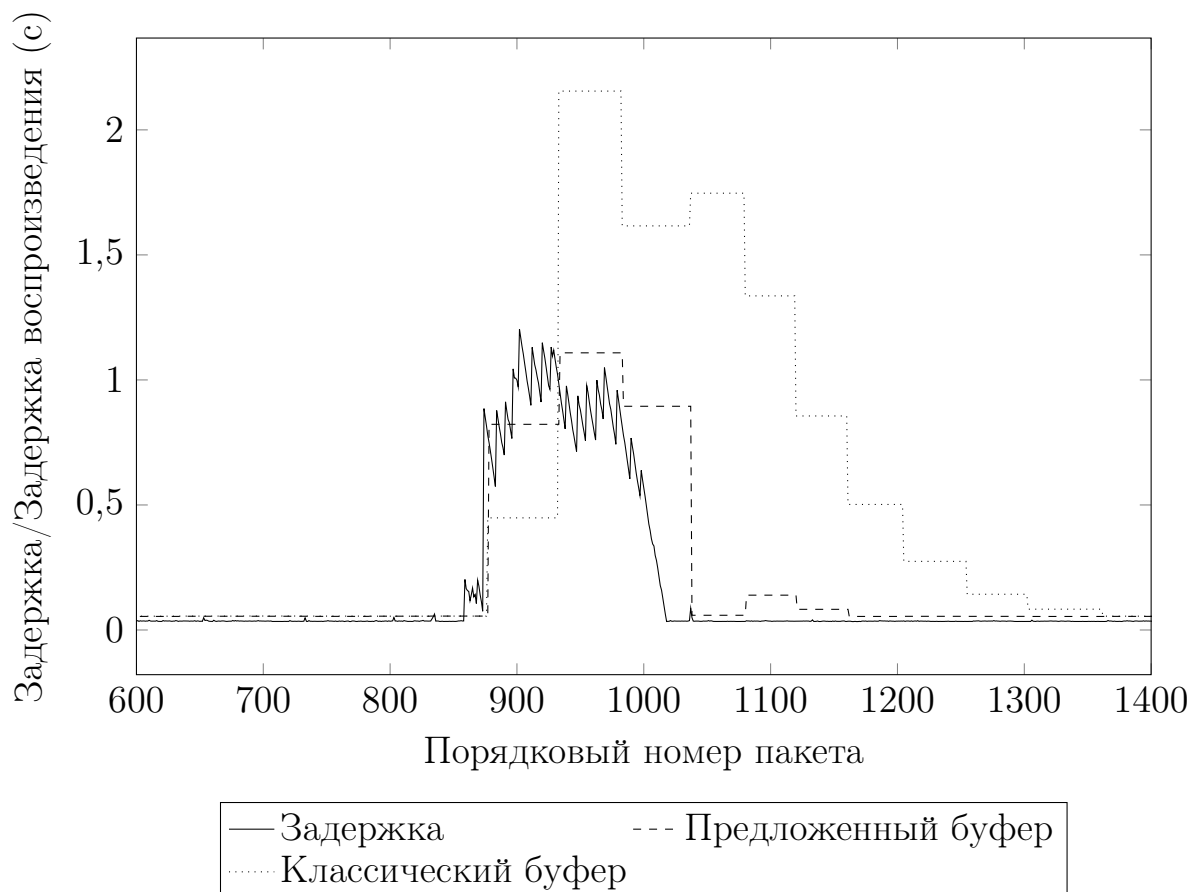


Рис. 5.10: Сравнение предложенного алгоритма с классическим буфером компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети

### 5.5. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE

С увеличением расстояния между абонентом и базовой станцией уменьшается отношение сигнал шум. Вместе с уменьшением SINR также уменьшается MCS и TBS, что приводит к ступенеобразному изменению про-

пускной способности. Проведем моделирование оценки буфера компенсации джиттера для этой ситуации на основе предложенного метода. На рис. 5.11 изображен ряд задержек, полученных в сетевом симуляторе NS3 и основные промежуточные величины необходимые для расчета размера буфера: оценка задержки (1.2) и дисперсия оценки (1.3) для классического адаптивного буфера [25] и оценка задержки (3.37, 3.38) и дисперсия оценки (1.3) для предложенного метода.

Как можно увидеть из рис. 5.13, размер классического адаптивного буфера значительно ниже необходимого уровня во время первого выброса задержки из своих инерционных свойств и большая часть пакетов первого скачка задержки была отброшена. В то время, как предложенный буфер детектировал начало скачка, что позволило выбрать благоприятный размер буфера.

В текущей реализации благодаря предложенному методу компенсации джиттера удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения со 106 мс до 64 мс, при этом удалось уменьшить вероятность потери пакетов с 14% до 13%. В текущей реализации оценка качества на основе E-модели показала улучшение качества на 2 пункта.

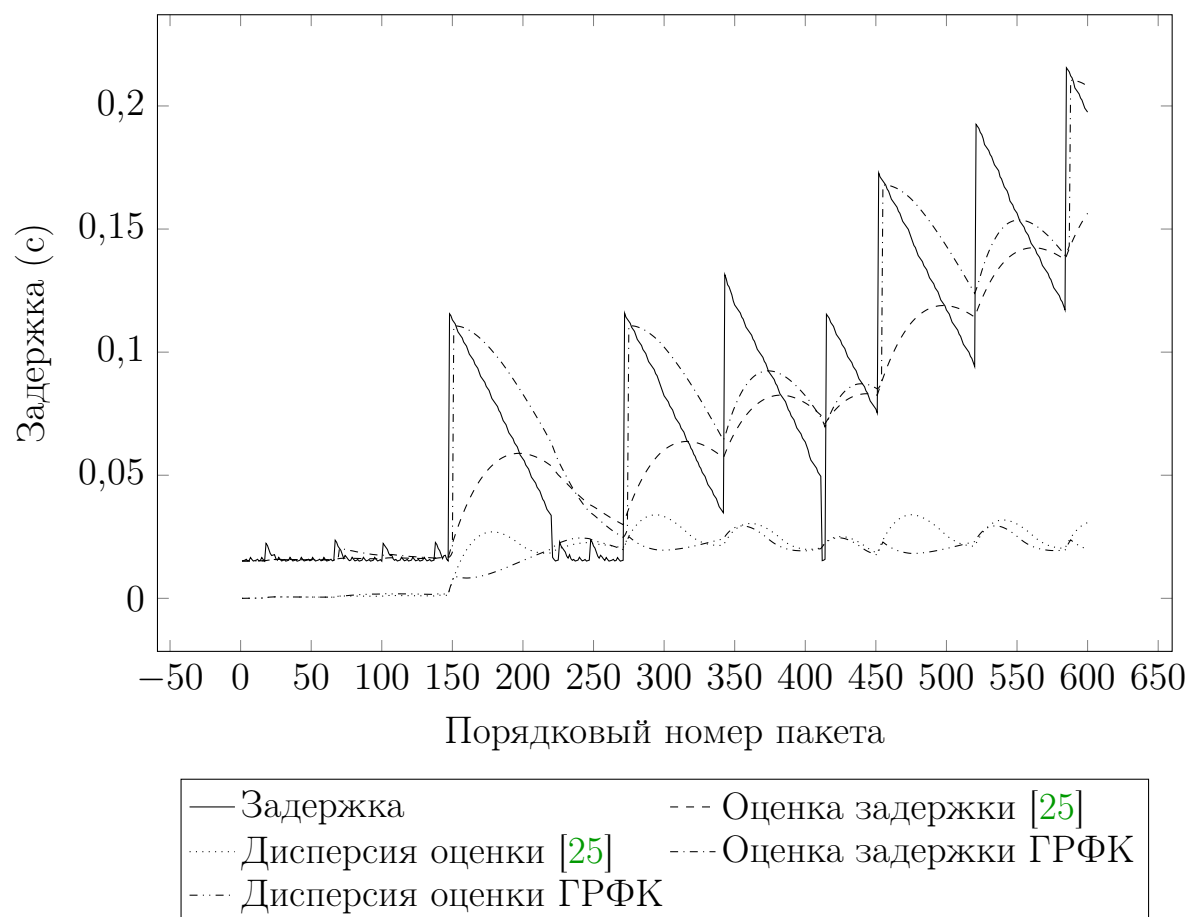


Рис. 5.11: Основные промежуточные величины, необходимые для расчета размера буфера

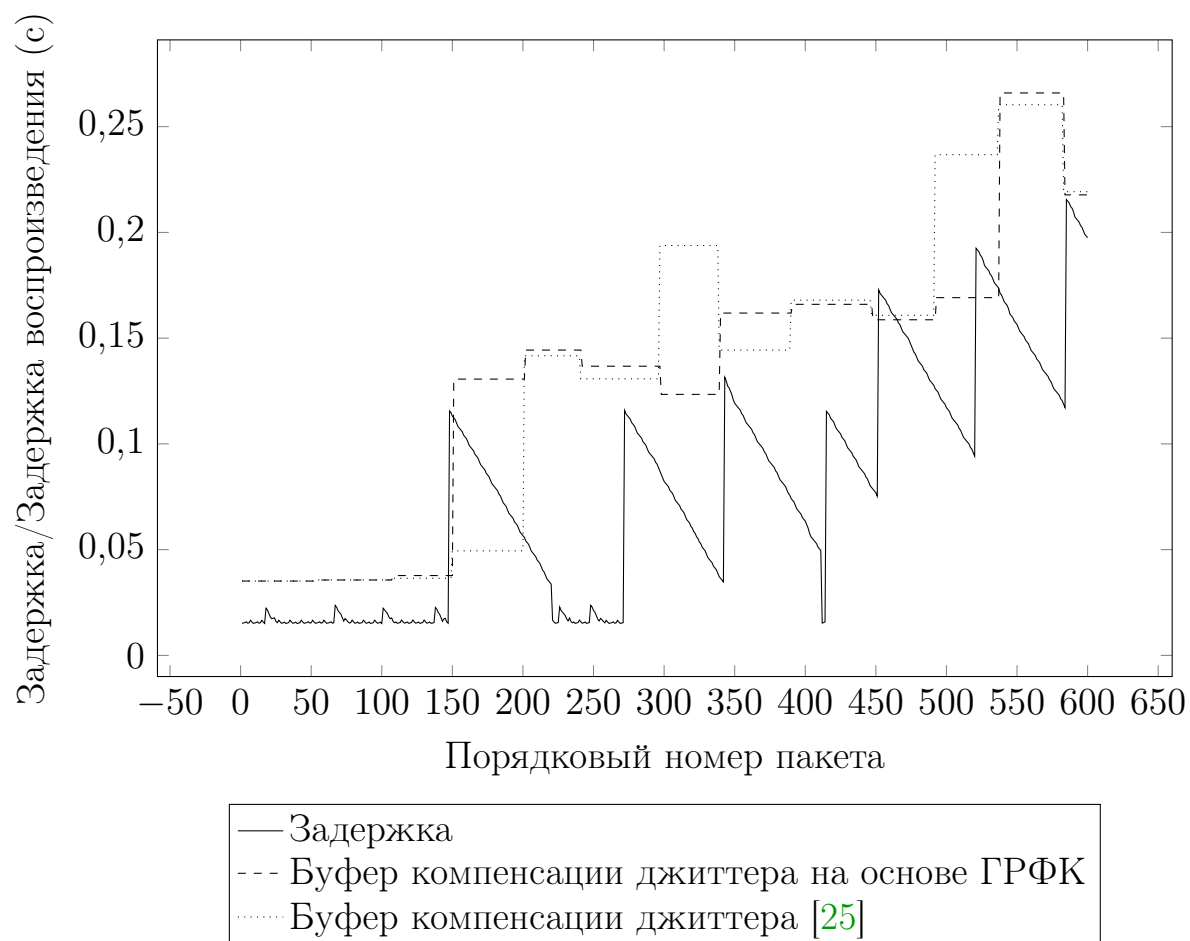


Рис. 5.12: Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [25] в ситуации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE

## 5.6. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех

Проведем моделирование оценки буфера компенсатора джиттера в ситуации перегрузки в сети. Как уже упоминалось во втором разделе, внутрисистемные помехи могут привести к значительным пакетным потерям во время действия помехи и к длительным скачкообразным изменениям сетевой задержки (рис. 5.13).

В текущей реализации благодаря предложенному методу компенсации джиттера удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 173 мс до 152 мс, при этом вероятность потери пакетов осталась на уровне 7%. В текущей реализации оценка качества на основе E-модели показала улучшение качества на 1 пункт.

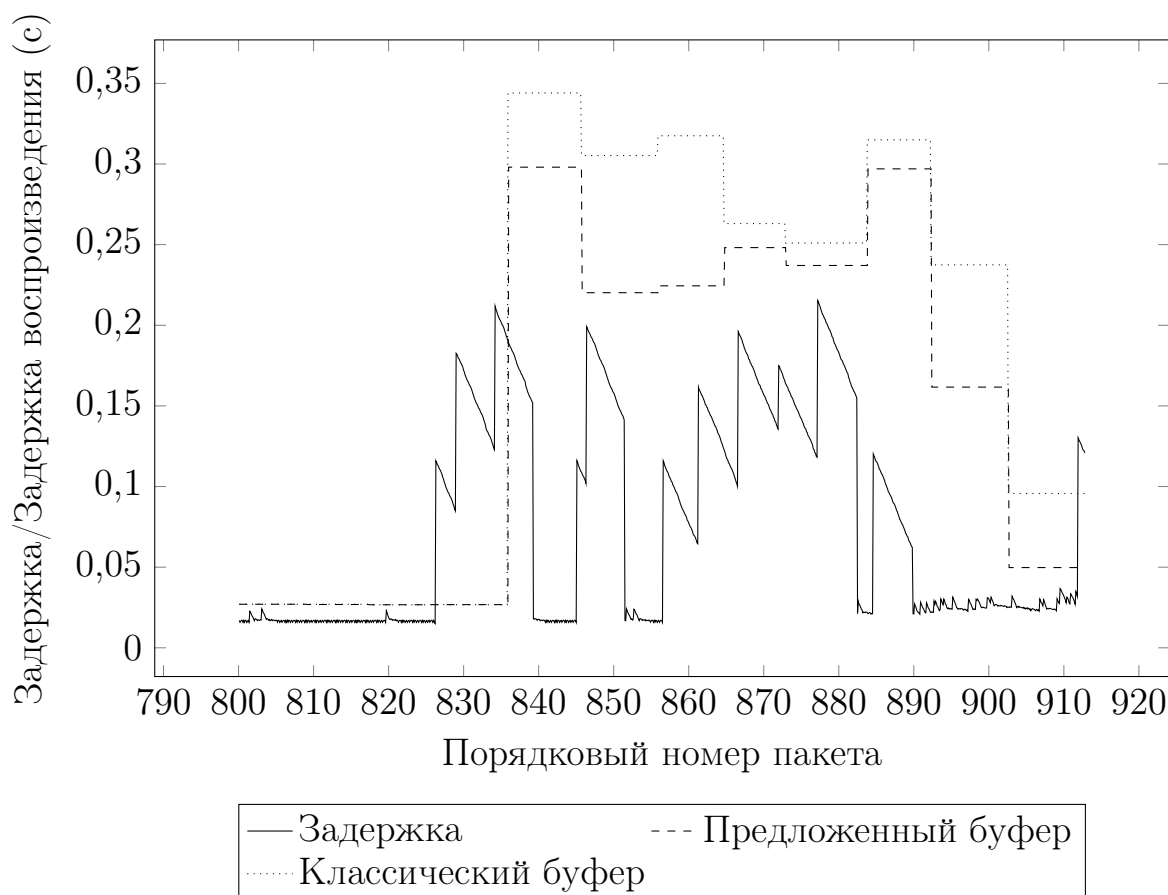


Рис. 5.13: Сравнение предложенного алгоритма с классическим буфером компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех

#### 5.7. Анализ эффективности работы предложенного буфера компенсации джиттера по сравнению с классическим буфером

Проведем сравнительное моделирование работы предложенного буфера и классического адаптивного буфера для оценки эффективности предложенного метода. В качестве входных данных будем использовать формирующий фильтр и математическую модель, описанную во втором разделе, используемую для зашумления стационарной модели скачками и выбросами.

Рассмотрим результаты моделирования зависимости качества передачи речи от вероятности появления скачка задержки на рис. 5.14. Для моделирования входной последовательности использовались следующие пара-

метры модели:  $\xi_{id}(k), \nu_{id}(k) \sim N(0, 1)$ ;  $\xi_{di}(k) \sim N(40, 10)$ . В результате можно видеть, что чем больше вероятность появления скачка, тем хуже решает поставленную задачу классический адаптивный буфер. В то время как предложенный буфер позволяет получить значительное преимущество, когда задержка прибытия пакетов нестационарна.

Результаты сравнительного моделирования зависимости качества передачи речи от амплитуды скачка задержки показаны на рис. 5.15 с параметрами для входной последовательности:  $\xi_{id}(k), \nu_{id}(k) \sim N(0, 1)$ ;  $P[r_s = 1] = 0,001$ .

Результаты сравнительного моделирования зависимости качества передачи речи от вероятности появления выброса задержки показаны на рис. 5.16 с параметрами для входной последовательности:  $\xi_{id}(k), \nu_{id}(k) \sim N(0, 1)$ ;  $\nu_{di}(k) \sim N(40, 10)$ .

Результаты сравнительного моделирования зависимости качества передачи речи от амплитуды выброса задержки показаны на рис. 5.17 с параметрами для входной последовательности:  $\xi_{id}(k), \nu_{id}(k) \sim N(0, 1)$ ;  $P[r_v = 1] = 0,001$ .

В результате сравнительного моделирования можно увидеть, что чем значительнее отклонение входной последовательности от стационарной модели, тем значительнее классический буфер уступает предложенному методу компенсации джиттера.



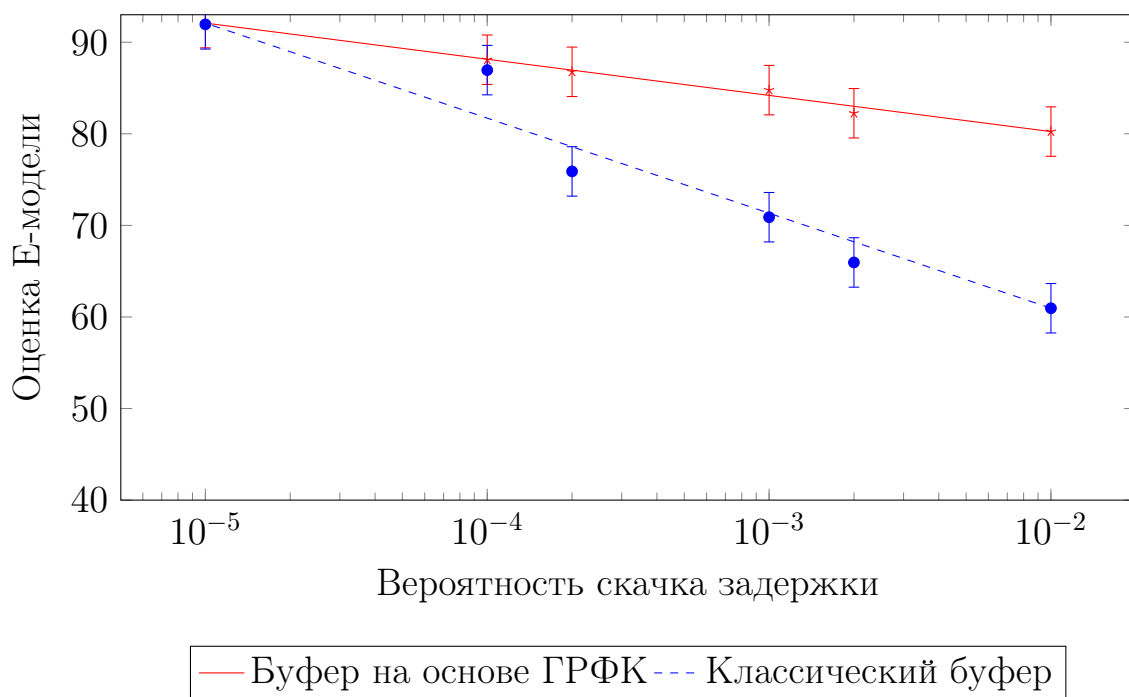


Рис. 5.14: Зависимость качества передачи речи от вероятности появления скачка задержки

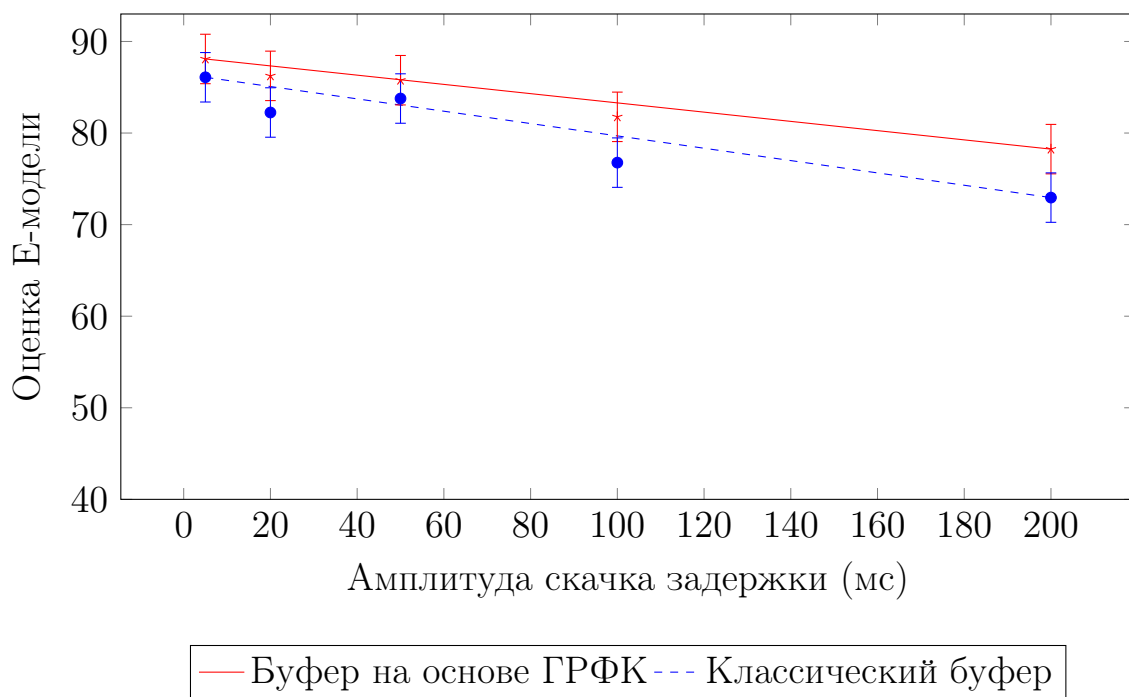


Рис. 5.15: Зависимость качества передачи речи от амплитуды скачка задержки

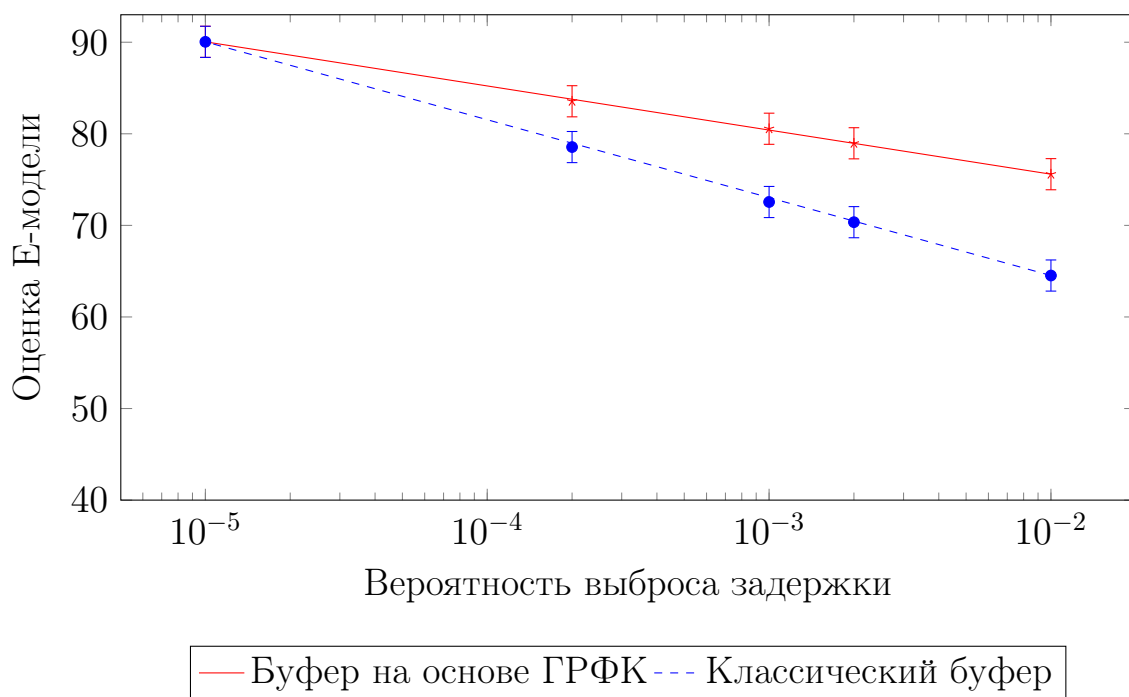


Рис. 5.16: Зависимость качества передачи речи от вероятности появления выброса задержки

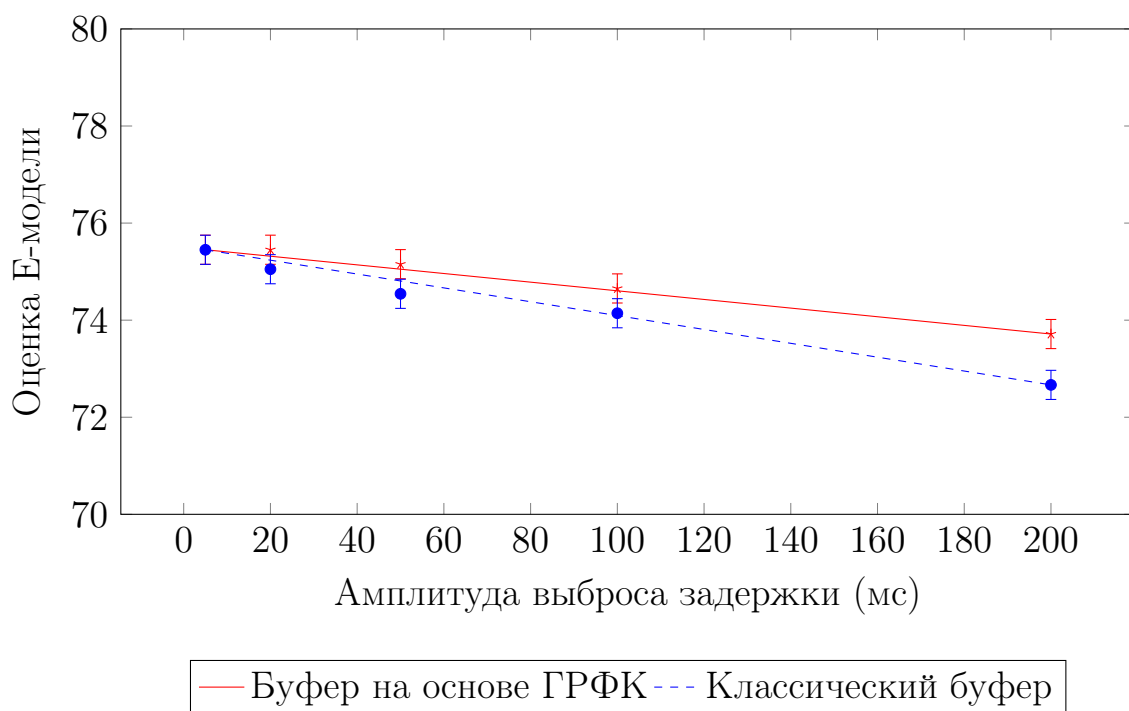


Рис. 5.17: Зависимость качества передачи речи от амплитуды выброса задержки

## 5.8. Использование концепции потоковых агентов, качестве платформы для предварительной компенсации джиттера в LTE

При передаче мультимедийной информации по комбинированным сетям с учетом различных механизмов распространения с различными технологиями, важным является выполнение требований по качеству предоставления мультимедийной информации пользователю. При этом важными являются такие характеристики: задержка, джиттер, число потерянных и поврежденных пакетов. Как показывает практика, наибольшие потери качественных характеристик происходят на границах операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения. Возникает необходимость установки соответствующих агентов, обеспечивающих мониторинг на том или ином промежутке сети. Вместе с тем от числа и места этих агентов существенно зависит качество мониторинга. Потоковый агент (ПА) это агент, который находится на базовой станции на пересечении проводной и беспроводной сети (рис. 5.18). 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.

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

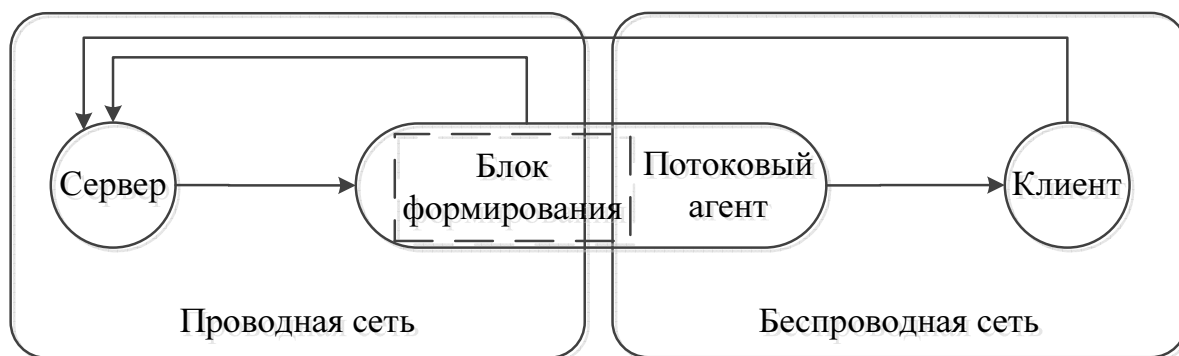


Рис. 5.18: Блок схема функционирования потокового агента

Блок формирования реагирует на заполненность очереди, отбрасывая пакеты до прибытия их к агенту.

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

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

Использование ПА, как платформу для внедрения буфера компенсации джиттера позволяет выполнять предварительную компенсацию джиттера в сети и тем самым упростить задачу буфера воспроизведения на конечном устройстве.

## 5.9. Выводы к пятому разделу

1. В качестве методики оценки эффективности предложенного метода компенсации джиттера использовалась Е-модель, разработанная Международным Союзом Электросвязи (МСЭ) [?], которая является инструментом планирования систем передачи речи и обеспечивает прогнозирование ожидаемого качества речи, как она воспринимается типовым пользователем во время телефонной связи в разговорных условиях.
2. В результате исследования было проведено сопоставление предложенных решений с уже известными ранее. В качестве исходных данных задавались основные источники джиттера в гибридных сетях:
  - изменение маршрута передачи пакетов;
  - хэндовер между базовыми станциями;
  - изменение расстояния между абонентом и базовой станцией;
  - внутрисистемные помехи.

Анализ эффективности предложенного метода компенсации джиттера производился с помощью имитационного моделирования в сетевом симуляторе NS3. Анализ показал, что по рейтингу Е-модели качество возросло до 5 пунктов. При переходе на физические параметры во время моделирования удалось уменьшить сквозную задержку на величину до 50 мс и пакетные потери на величину до 18%.

3. Выработана рекомендация 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. Поточковый агент представляет собой программный пакет, установленный на граничном

узле. Основными функциями потоковых агентов являются сбор и отправка статистических данных и своевременная обратная связь.

Основными преимуществами данного предложения является:

- 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.

## 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.